

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

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インベントリーへの適用研究 (2-1601)

平成28年度～平成30年度

Evaluation Study on the Soil Carbon Changes through the Land Use Changes between Forest Land and Cropland and its Application to GHG Inventory

<研究代表機関>

早稲田大学

<研究分担機関>

国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター

<研究協力機関>

三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社

2019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. 研究開発の方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた主な成果		
6. 研究成果の主な発表状況		
7. 研究者略歴		
II. 成果の詳細		
II-1 森林・農地間における土地利用変化のあった部分の扱いとNIRへの反映	・・・・	11
（早稲田大学）		
要旨		
1. はじめに		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた成果		
6. 国際共同研究等の状況		
7. 研究成果の発表状況		
8. 引用文献		
II-2 農地から森林への土地利用変化に伴う土壌炭素変化の解明とモデル化	・・・・	27
（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. はじめに		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた成果		
6. 国際共同研究等の状況		
7. 研究成果の発表状況		
8. 引用文献		
II-3 北日本における森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素量変化の解明	・・・・	40
（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター）		
要旨		
1. はじめに		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発方法		

4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

II-4 西日本における森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素量変化の解明・・・・・・・・ 55

(国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター)

要旨

1. はじめに
2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

II-5 森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素量変化のモデル化・・・・・・・・ 62

(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変動研究センター)

要旨

1. はじめに
2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

III. 英文Abstract

・・・・・・・・ 80

I. 成果の概要

課題名 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インベントリーへの適用研究
 課題代表者名 天野 正博（早稲田大学名誉教授 持続型食・農・バイオ研究所招聘研究員）
 研究実施期間 平成28～30年度
 累計予算額 128,650千円
 （うち平成28年度：43,610千円、平成29年度：43,610千円、平成30年度：41,430千円）

本研究のキーワード 土壌炭素、土地利用変化、国家インベントリー報告書(NIR)、森林、農地、Equivalent Soil Mass法、ペアサンプリング法

研究体制

- (1) 森林・農地間における土地利用変化のあった部分の扱いとNIRへの反映（早稲田大学）
- (2) 農地から森林への土地利用変化に伴う土壌炭素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）
- (3) 北日本における森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素量変化の解明（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター）
- (4) 西日本における森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素量変化の解明（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター）
- (5) 森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素量変化のモデル化（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変動研究センター）

研究協力機関

三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社

1. はじめに(研究背景等)

IPCC2006インベントリー・ガイドライン（以下、IPCC2006ガイドラインとする）は、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ー報告書（NIR）において、土地利用変化があった部分については変化がない土地とは別区分にし、炭素プールの変化量を報告することになっている。とくに、土地利用変化後の土壌炭素量の変動速度はバイオマスの変動に比べ緩慢であるため、土地利用変化が無い土地に統合するまでの遷移期間について、IPCCは20年をデフォルト値としている。しかし、我が国のみならず多くの国では農地から森林、森林から農地といった土地利用変化に伴う土壌炭素量の変動プロセスについて、科学的な知見が蓄積されていない。

加えて、我が国では各土地利用部門を担当する行政部門が縦割りの形で土地利用変化面積の算定に用いる統計や土壌炭素量算定モデルの採用などを行っており、土地利用の8割を占める森林と農地間の土地利用変化においても連携が取れていない。

我が国の土地利用変化による土壌炭素変動量の算定は、担当部局毎に各土地利用の全国平均炭素量を求め、その差を遷移期間で割った数値を便宜的に土地利用変化による毎年のGHG吸排出量として報告している。しかし、土壌炭素量のデータが整備されてくるにつれ、森林の平均土壌炭素量が農地のそれに比べて少ない状況になってきている。これは一般的に考えられている森林土壌は農地土壌に比べ炭素量が多いという傾向とは逆である。また、土壌炭素の蓄積量は土壌タイプ、気候、地形などの立地条件や土地の管理方法により異なることから、土地利用変化による土壌炭素量の変動プロセスもこうした要因の影響を受け、単純に土地利用間の平均土壌炭素量を直線で近似するような吸排出傾向ではないと考えられる。事実、炭素蓄積量が多い火山灰土壌は農業に適した平坦地に多いことから、全国平均での森林土壌ではなく、傾斜が緩やかな地形の森林土壌の炭素量と比べるべきかもしれない。

2. 研究開発目的

(1) 我が国土地利用の約8割を占める森林と農地を対象に、両者間での土地利用変化に伴う土壌炭素変動量をIPCC2006ガイドラインに則した形で評価できるようし、ガイドラインが不十分な場合は改善策を提案する。土地利用変化は土地セクターからのGHG排出の重要な要因となっているが、土地セクターでは最も大きな炭素プールである土壌の炭素量については、土地利用変化が生じたの前後をモニタリングした参考値が極めて少ない。そこで、森林から農地、農地から森林に変化した場所を全国規模で抽出し、そこでの土壌炭素量の変化を科学的に計測する調査手法を開発するとともに、本研究で計測した結果を行政に提示する。

(2) 森林および農地の土壌炭素量を推定するモデルは担当部局が異なることから、別々の構造を持ちインプットする変数も違うモデルが開発されてきた。このため土地利用変化による土壌炭素量の変化をシームレスに表現することができていない。本研究では両者を統合するハイブリッド型モデルを開発し、1 km x 1 km程度の地域を単位として、過去の土地利用変化を100mグリッドでトレースした空間情報に基き、モデルを用いた広域での土地利用変化における土壌炭素の変動量算定への適用可能性を検証する。

(3) IPCC2006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たGHG排出量の報告を求めている。本研究で開発するモデルは森林・農地間での土地利用変化に限定しているものの、将来的には6つの土地利用区分に拡張することを視野に入れて研究を行う。

(4) 本研究に関係する研究者や行政担当者に、各国の土壌炭素量算定がどのように実施されているかを、整理して提示し、本研究における成果をNIRに反映させる意義を明らかにする。また、IPCCインベントリー・ガイドラインや排出係数データベースへの貢献も行政ニーズとして求められていることから、全国規模での調査によりNIRに利用できる排出係数の算定を目指すとともに、研究成果をIPCCインベントリー・ガイドラインのGood Practice Guidance 2019 Refinementへ反映させることも、目的としている。

3. 研究開発の方法

(1) 森林・農地間における土地利用変化のあった部分の扱いとNIRへの反映

IPCC1996インベントリー・ガイドライン(以下、IPCC1996ガイドラインとする)からIPCC2006ガイドラインに変更された際の相違点を明らかにするとともに、その背景を分析し土地利用変化が生じた際の土壌炭素量算定の重要性を示す。次に各国のNIR作成に向けた調査方法を土壌炭素量の算定手法に焦点を当てて分析するため、UNFCCC附属書I国のNIRを収集し、土壌炭素量算定方法、土地区分と面積算定方法、算定する土壌深度、算定単位の5項目についてデータベースを作成した。このデータベースとサブテーマ1の研究分担者、協力者がNIRのレビュアーとしてNIRの審査に携わった際の経験にもとづき、農地と森林間で土地利用変化が生じない場合、および両者間で土地利用変化が生じた場合の各国の土壌炭素量算定手法をTier別だけでなく、それを細分化した算定方法のタイプ別に整理した。

また、土地利用の6区分全体に拡張した際に問題となる開発地について、土地利用変化における土壌炭素量算定における課題の整理を行った。

(2) 農地から森林への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

土地利用変化した転用先の森林と土地利用変化しなかった隣接する農地の双方から土壌を採取し、それぞれの土壌に蓄積されている炭素量を比較した（ペアサンプリング法）。従来法（深さ30cmまでの土壌炭素量）および土壌重量均等法Equivalent Soil Mass法（以下、ESM法、同じ土壌重量あたりに含まれる炭素量の比較）による土壌炭素蓄積量評価を行った。

これらの分析結果を用いて、土地利用変化後の経過年数にしたがって土壌炭素蓄積量の変化を推定することができるモデルをの候補を用意し、上記サンプリング調査により得られた土壌炭素変動量の計測結果を精度良く再現できるようなモデルを開発した（サブテーマ5に一括して記載）。

(3)北日本における森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素量変化の解明

北海道を中心とする北日本を対象地域とし、グリッド調査データと航空写真による判別にもとづき、森林から農地への土地利用変化が起こった場所の把握と調査地の選定、調査許可の取得、ペアサンプリング法により土壌サンプル採取と分析、の順で現地調査を行い、ESM法により土壌炭素量の評価を行った。

(4)西日本における森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素量変化の解明

西日本を対象として、森林から農地への転用が起きた農地およびそれに隣接する森林においてペアサンプリング法による土壌調査を行い、ESM法により、農地、森林それぞれの土壌炭素量を算出した。これをもとにして、森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素の変動量を表す係数(土地利用変化係数)を導出した。また、農地転用後の経過年数や農地の利用形態、調査地の土壌タイプが土地利用変化係数に及ぼす影響を評価した。

(5)森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素量変化のモデル化

新規植林、再植林、森林伐採が起きた地点の位置情報を示すポイントデータと過去から現在までの空中写真などから、森林から農地に変化した場所と、変化せずに森林が残っている場所の2つが近接している調査候補地を選定し、森林と農地をペアとした土壌調査と土壌試料のサンプリングを行った。この際、農地と林地を、同じ0-30cm深さまでの土壌炭素量で比較するやり方(従来法)と、土壌の質量をそろえて比較するESM法の2つの方法で評価を行い、結果を比較した。現在のインベントリー報告において森林で使われているCENTURYモデルと農地で使われているRothCを統合し、森林と農地の両方に適用可能な統合モデルを開発した。そのモデルを本プロジェクトの調査地に適用し、実測値との比較を行った。さらに、広域評価につなげるため、面的にモデルを適用する計算の試行を行った。

4. 結果及び考察

(1)森林・農地間における土地利用変化のあった部分の扱いとNIRへの反映

1996年ガイドラインでは農業はその他の土地利用とは切り離してGHG吸排出量を報告していた。2006年ガイドラインでは農業を他の土地区分と統合し、土地セクター(AFOLU)としてNIRで吸排出量を報告することになった。この背景には、森林から農地への土地利用変化時に大量のGHGが排出されることがあった。また、土地利用変化が生じた場所は変化がない部分とは異なる土壌炭素量の変動プロセスをとることから、一定期間(デフォルト値は20年間)は両者を切り離して吸排出量を報告することが求められた。我が国を含めて多くの国は農地と森林の土壌炭素量算定モデルは異なっているため、IPCC2006ガイドラインに対応して森林と農地間での土地利用変化による土壌炭素の変動量を算定するには、モデルの修正か新たなモデルの開発が必要となった。

UNFCCC附属書1の41カ国のNIRを調べると、転用のない農地土壌の炭素量を算定するのにモデルを用いている国は9カ国、森林土壌のそれは10カ国であり、そのうちオーストラリア、フィンランドは農地土壌、森林土壌とも同じモデルで炭素量を算定しており、土地利用変化における土壌炭素量の算定についても、同じモデルを使用して変動量の算定を行っていた。一方、農地と森林で異なるモデルを使用している国は、土地利用変化についてはカナダを除いてTier2を利用している。カナダは土地利用変化係数の算定に、別のモデルを使用していた。

土壌炭素量の変化を計測する対象とする土壌深度について、多くの国がデフォルトの30cmを採用していた。それ以外の土壌深度としてはデンマーク、フィンランドなど5カ国が100cm、スウェーデン、オーストリアが50cmを採用している。農地と森林で異なる土壌深度を採用していたのは米国、ノルウェーなど4カ国あり、どの国も森林土壌の方が農地土壌の深度よりも深かった。なお、ESM法を採用している国はなかった。

土地利用変化が生じたときに、転用がなかった土地と併合するまでの遷移期間については、ほとんどの国がデフォルトの20年間を採用していた。ただ、イギリスは50年から750年という長い遷移期間を採

用していた。

IPCC2006ガイドラインでは、Tier2として参照する土壤炭素量を、気候帯区分および土壤タイプに応じて設定することとしているが、土壤タイプ別に設定している国は少ない。多くの国は加重平均等により土地利用区別の平均値を設定しており、我が国も同様である。

以上のように各国のNIRでの土地利用変化による土壤炭素変動量の扱いを整理すると、本研究で各サブテーマが提案したペアサンプリング法による土壤調査方法、ESM法を用いた土地利用変化にともなう土壤炭素量の変化係数の算定は、我が国のNIRの問題点の改善に資するだけでなく、IPCCインベントリー・ガイドラインに貢献すると判断した。また、土壤炭素量の挙動を表現するモデルは、NIRにおいて気候帯区分、土壤タイプを考慮しながら広域での土壤炭素変動量の推定に有効であるだけでなく、土地管理方法の変化、遷移期間の設定などにも活用できることが分かった。

(2) 農地から森林への土地利用変化に伴う土壤炭素蓄積変化の解明とモデル化

近年の農地から森林への土地利用変化は、植林活動が行われた地点が多かった。農地を細分化すると畑地が森林に転用された地点が最も多く、次いで水田が森林に転用されたものが多かった。北海道ではカラマツが、本州ではスギ・ヒノキが植栽樹種として多く選定されていた。放棄された場所で植生が回復しているケースでは、ニセアカシアが多く見られた。

農地と森林の土壤炭素量比率（以下、土地利用変化係数、転用後の森林の土壤炭素蓄積量を転用前の農地の土壤炭素蓄積量で除した値）は、表層の深度30cmまでの土壤を比較した方法（従来法）では平均値で0.98となり、農地の方が森林よりも多くの炭素を蓄積していた。一方、等しい重量の農地土壤、森林土壤を用いて比較するESM法では、平均値で1.09であり、森林の方が農地よりも多くの炭素を蓄積している結果となった。科学的な常識では、農地から森林への転用によって土壤炭素蓄積量は増加すると考えられているため、ESM法の方がより信頼性が高く、土地利用変化係数を算定するためにはESM法を採用することが重要であるとの結論が得られた。

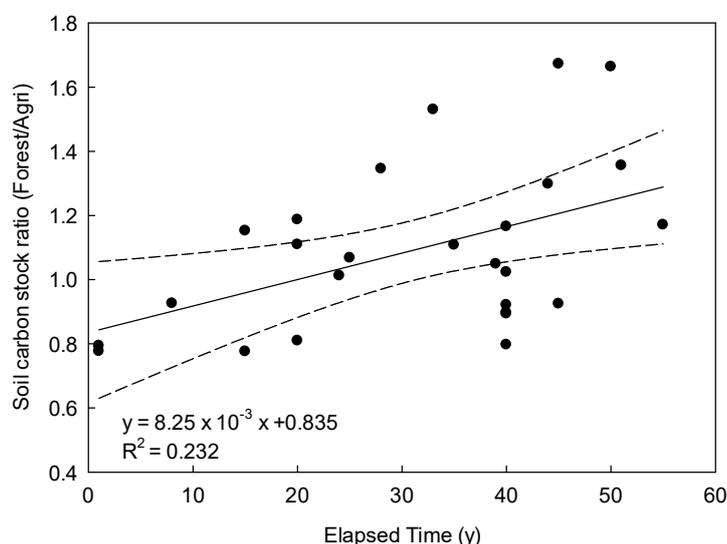


図1 森林への転用後の年数と土地利用変化係数の関係

遷移期間について図1を用いて分析してみる。図の縦軸は土地利用変化係数であるが、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、転用後の年数が長いほど農地よりも森林の土壤炭素蓄積量が大きくなる傾向があることが明らかになった。この結果から、NIRにおいて、農地から森林への転用時の土壤炭素蓄積量の変動を算定するには20年よりも長い遷移期間を設定することが、より精度の高い推定になると考えられた。これらの結果を踏まえ、最終的に何年経過すると土壤炭素蓄積量が一定になるかという数値については検討の余地があるものの、40年程度の遷移期間が望ましいことを提案した。

(3) 北日本における森林から農地への土地利用変化に伴う土壤炭素量変化の解明

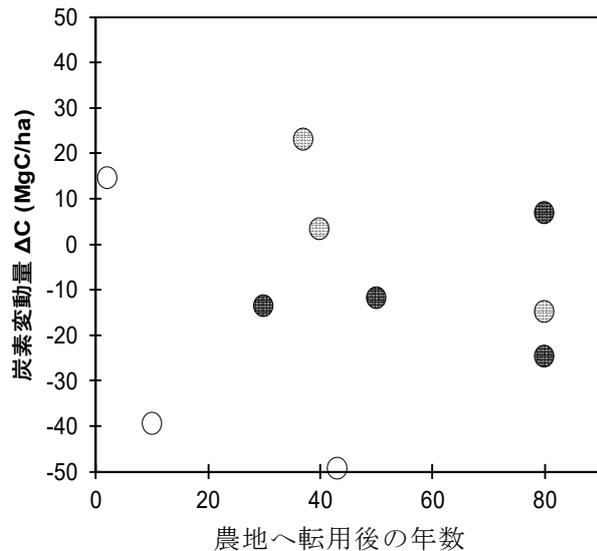


図2 農地への転用後の土壤炭素変動量

北海道の土地利用変化が生じた10地点で調査を実施した。寒冷地における森林から農地への土地利用変化に伴う土壤炭素量の増減を明らかにした。図2に示すように農地転用後2年の地点において土壤炭素量が大幅に増加するなど、農地転用の際に土壤炭素量が一時的に増加することを明らかにした。なお、図で白色は堆肥投入なし、灰色は0.1-0.3tC/haの堆肥投入量、黒色は堆肥投入量が0.3tC/ha以上の地点を示す。この土壤炭素量の増加は、作物の作付け時の植物残渣由来の炭素が表す軽質画分の土壤炭素量の増加によって引き起こされた。農地転用後10年を超える地点では土壤炭素量の増加はほとんど見られず、長期的には森林から農地への転用は寒冷地においても土壤炭素量を減少させることが明確になった。北海道のような冷涼地域では、炭素分解速度が遅いことも炭素量の減少が緩やかになる原因と考えられる。冷涼地帯における土地利用変化が土壤炭素量に与える影響を調べた事例はほとんどなく、世界的に貴重な結果である。

(4) 西日本における森林から農地への土地利用変化に伴う土壤炭素量変化の解明

西日本を対象に12地点（畑5地点、放牧地6地点、樹園地1地点）で調査を実施した結果、森林から農地への土地利用変化に伴う土壤炭素量の変化係数（土地利用変化係数）は 0.73 ± 0.23 であり、農地への

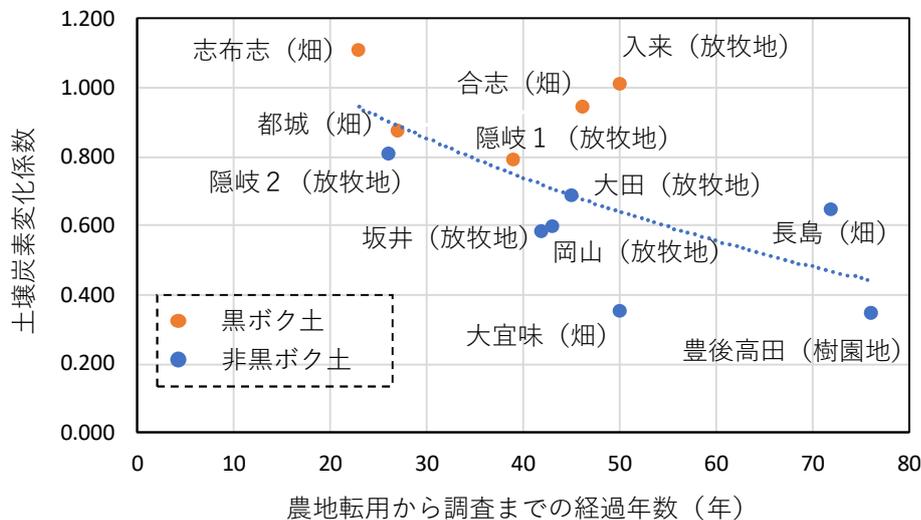
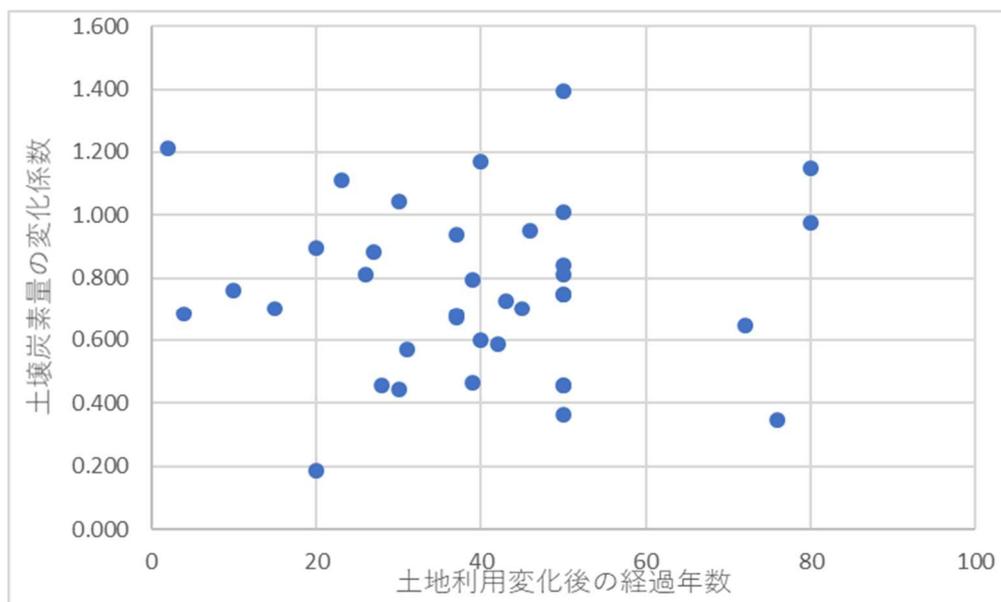


図3 農地転用から調査までの経過年数と土壤炭素変化係数との関係
(図中に全12地点の回帰曲線を示す。)

転用以降の経過年数が長いほど変化係数は小さかった。その傾向は、火山灰土である黒ボク土よりも非黒ボク土（本研究では、赤黄色土と褐色森林土）で顕著であった（図3）。従来法（深さを一定にして土壤炭素量を評価する手法）によって求めた12地点の土地利用変化係数の平均値は0.83であり、ESM法で求めた0.73よりも13%大きかった。従来法による土地利用変化係数の過大評価は、黒ボク土で顕著だった。森林と農地間の土地利用変化に伴う土壤炭素量の変動を求めるには、とりわけ黒ボク土のような農地と森林で土壤の容積重の差が生じやすい土壤でESM法の適用が不可欠であると考えられた。

(5) 森林から農地への土地利用変化に伴う土壤炭素量変化のモデル化

森林から農地に変化する時の土壤炭素量の土地利用変化係数は、全国の現地調査38地点の平均と比較すると、従来法では0.95、ESM法では0.75であった。一方、この係数と土地利用変化が起きてから



の年数との間には明瞭な関係がみられなかった(図4)。これは、土壤炭素量の動態には気象、土壤タイプ、地目(畑、樹園地、草地)、有機物投入量(堆肥)など様々な要因が関係しているためであると考えられる。これらの要因でグループ分けして解析を行うと年数との間に関係がみられることも考えられるが、その解析

図4 土地利用変化後の経過年数と土壤炭素量の変化係数の関係

を行うには標本数が少ないため、今後のさらなるデータの蓄積が求められる。後述する炭素動態モデルでは、上述したような気象、土壤タイプ、地目(畑、樹園地、草地)、有機物投入量などの重要な要因はモデルの中で既に考慮されていることから、要因ごとの解析のために細分化していくと標本数が減ってしまうという問題は回避できる。このため、データを増やすことも大事であるが、合わせて今後は少ないデータで効率よく土地利用変化による土壤炭素量の挙動を表現できるモデルの活用を重視するべきであろう。

KNT-D03 広葉樹林 → 水田

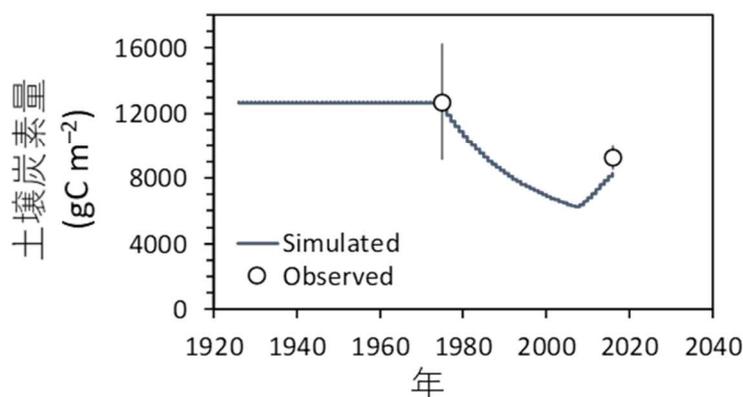


図5 KNT-D03サイトの事例(バーはn = 6の実測値(ESM法の補正後)の標準偏差)

放置され大きく土壤炭素蓄積量が減少した後に水田に転用され、堆肥の投入に応じて土壤炭素蓄積量が減少から増加に転じている様子がモデルにより再現されており、実測値ともよく適合した。さらに、広域評価のための面的な計算も試行し、将来の全国計算へのモデル活用の可能性を示したが、そのためには土地利用変化や土壤炭素の動態に影響を与える面的空間情報の整備など解決すべき問題点が多いことも指摘した。

本研究で開発したCENTURYとRo t hCの統合モデルは多くの調査地で実測値を概ね再現でき、土地利用変化が生じた際の土壤炭素量の挙動メカニズムを考慮したモデルによる算定値は、単純な係数を用いた原単位法に対する有効性が示された。図5は関東地域のサイトで、広葉樹林から水田に土地利用が変化した事例である。森林の伐採後にいったん土地が

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

1) IPCCインベントリー・ガイドラインでは土地利用変化への対応は不十分

従来の各土地利用区分の土壤炭素量を算定するための方法は、IPCC2006ガイドラインやその後のグッドプラクティスなどで明示されていたが、土地利用変化による土壤炭素量については明示されていなかった。このため、我が国を含めた多くの国では農地と森林間で土地利用変化が生じた場合は、農地と森林の平均土壤炭素量の間で変動すると仮定し、便宜的に吸排出量を計算していた。しかし、傾斜地に多く存在する森林と炭素含有量が高い火山灰土の土壤タイプが多い平坦地を適地とする農地を比べると、立地条件の違いが両者の平均値に反映されてしまい、土地利用変化による土壤炭素量に平均値を用いることは科学的とはいえない。本研究では気候や土壤タイプにより土壤炭素量が異なること、農地では堆肥として人為的に炭素が土壤に供給され、森林は樹木のリターの形で自然生態系の中で炭素が土壤に供給されていることから、土地利用変化が生じた場所の立地条件や土地管理方法といった要因に配慮して、土壤炭素量の変動を見る必要があることも示した。

2) 異なる土地利用における土壤炭素量の比較方法

前項の考えを具体化した調査方法として、例えば森林から農地に変化した場所に赴いて転用された農地の近隣にある土地利用変化前の状況に近い森林土壤をペアで採取するペアサンプリング法を提案した。また、IPCCでは計測する土壤の採取は深度30cmをデフォルトとしているが、農地では農業機械が農地上を走り回るため、森林土壤に比べ圧密状態になっている。このため、農地土壤の深さ30cmは森林土壤の深さ40～50cmに相当することから、同深度の土壤サンプルを採取した場合、農地土壤の炭素量を過大に評価することになる。そこで、土壤深度ではなく土壤重量均等法（ESM法）により土壤炭素量を比較することで、土地利用変化前と変化後の土壤炭素量の比（土地利用変化係数）を科学的に算定できることを示した。

3) モデルによる土地利用変化時の土壤炭素変動量の推定

森林および農地で使用している土壤炭素量推定モデルであるCENTURYとRothCの統合モデルを開発し、立地条件や土地管理方法といった土壤炭素量に影響を与える要因をパラメータとして投入することにより、土地利用変化が生じた際の土壤炭素量の挙動を実測値に近い形でトレースできるようにした。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

1) 行政と連携した研究の進行管理

本研究では環境省、農水省の土地セクターのNIRデータの取りまとめ担当者がアドバイザーボード会合に参加し、研究計画や成果についての議論に行政担当者として関わっている。また、これとは別に年1回の頻度で行政担当者との勉強会も開催し、研究者と行政担当者との意思疎通に努めており、行政担当者は研究の動向をリアルタイムに近い形で意識し、行政が成果を速やかに業務へ反映する仕組みを作っている。

2) 研究成果のNIRへの反映

本研究で提案した方法論は、平成30年度環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会の優先検討事項として取り上げられた。また、我が国のNIRの土地セクター取りまとめ担当者が研究協力者として本研究に参画しており、新しい土地利用変化係数による試算をリアルタイムで行うなど、研究成果をNIRへ反映させる準備は進んでいる。研究サイドも行政の意向を直接聞くことにより、社会実装を意識した成果、具体的にはNIRへの反映を指向することができる。

<行政が活用することが見込まれる成果>

1) 土地利用変化による土壤炭素変動量の問題点を提示

科学的意義でも述べたが、現行の方法論では農地と森林の平均土壤炭素量の差をもとに、農地と森林間の土地利用が変化したときの土壤炭素の変動量を算定している。傾斜地に存在する森林に比べ農業

適地である平坦地は土壌蓄積量が多い火山灰土壌が広く分布している。こうした立地の違いもあって、土壌調査箇所が増えるにつれ森林の土壌炭素量の下方修正があり、今後も森林土壌の炭素量が農地の土壌炭素量をより一層下回るといふ、科学的な常識とは異なるNIRになることを具体的な数値で行政に示すことができた。

2) ペアサンプリング法により土地利用変化時の土壌炭素量の実態を解明

実際に土地利用変化が生じた場所の立地条件を考慮した土壌調査を行うため、衛星写真、地形図、土壌図を用いて土地利用変化に対応した調査箇所の選定方法を示すことができた。これに基づいて全国の土地利用変化箇所165カ所でペアサンプリング法による土壌調査を行い、我が国の森林と農地間での土地利用変化による土壌炭素変化量を示す全国規模のデータを用意できた。

3) 異なる土地利用間での整合性のとれた土壌炭素量の比較方法

IPCCでは土壌深度のデフォルト値を30cmとし、通常はその深度までの土壌炭素量を各土地利用の炭素量の値としている。しかし、森林ではリターの分解により土壌の団粒構造が進み空隙が発達する一方で、農地では農業機械が走り回るなど土壌の圧縮・膨潤が生じている。こうした土地利用変化がもたらす土地管理方法の違いも考慮して土壌炭素量の変動を算定するには、土壌重量均等法（ESM法）が望ましいことを示した。

森林から農地に変化する際の土壌炭素量の変化率（土地利用変化係数）は、全国からの38地点の平均で、深さを30cmにそろえて計算した場合は0.95となり、森林から農地への変化で土壌炭素量が約5%減少するという結果となった。

4) NIRへの貢献

ペアサンプリング法とESM法を組み合わせたデータにより、全国規模での土地利用変化による排出係数をNIRに提供することができた。ただ、水田や畑作、果樹園など土地管理方法が異なるケースや、土壌タイプ別、気候区分別に対応できるだけのデータは、3年間の期間では用意できなかったため、今後の追加的な研究で補完する必要がある。

5) 国際的な貢献

IPCCで作業中のGood Practice Guidance 2019 RefinementにLAとして当課題の研究者が携わっており、ESM法はドラフト段階ではあるが特記されている。Refinementは近日中（2019年5月）に採択される予定で、将来は本方法を用いた土地利用変化係数（土地利用による土壌炭素排出係数）の算定が主流になると考えられる。

6) 適正な遷移期間の設定

土地利用変化が生じた場所について変化しない土地と区分して土壌炭素の変動量をNIRで報告することが、IPCCインベントリー・ガイドラインで決まっている。土地利用変化のあった土地を変化がなかった土地に併合するまでの遷移期間のデフォルト値は20年である。我が国も科学的な裏付けがないまま20年の遷移期間を採用している。本研究では土地利用変化後の背に期間について、我が国の森林は40年、農地は20年とすることが望ましいとの結果を得た。

7) モデルの開発

土地利用変化が生じると、土壌中に有機物を供給する生態系が変わるだけでなく、土地管理方法も大幅に変化する。また、気候や土壌タイプといった立地条件も土壌炭素量の変動に影響を与えている。こうした要因に対応するには、現地調査の点数を増やすだけでは無理なので、関連する要因を変数にして土壌炭素量の変動を予測できるモデルを開発した。このモデルを用いることにより、森林と農地間における広域での土地利用変化による土壌炭素量の変動を算定することが可能となった。

8) 土地利用変化における開発地の問題点を整理

森林と農地間での土地利用から土地セクター全体にNIRの土地利用変化対象を拡げたとき、本研究の成果だけでは解決が難しいと思われる課題を整理し、インベントリー担当者に検討を促す資料を各国のNIRを分析し作成した。我が国では森林、農地に続く重要な土地利用部門は開発地であり、大きな違いは開発地における客土の扱いである。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) 鳥山淳平ら.九州森林研究, 72, 91-93, (2019) 農耕地への植林に伴う土壌炭素蓄積量の変化 - 八女, 竹田, 都城の事例-
- 2) S. Shimoda and F. T. Koyanagi: Sustainability, 9(11), 1973 (2017), Land use alters the plant-derived carbon and nitrogen pools in terraced rice paddies in a mountain village
- 3) S. Shimoda, K. Wakabayashi, M. Koshimizu and K. Niwa: Sustainability, 10(12), 4587 (2018) Rapid increase and long-term slow decrease in soil C stock due to agricultural development in Hokkaido Tokachi District

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 森下智陽ら. 東北地方における土地利用変化による土壌炭素蓄積量の変化(速報) - 秋田県における調査事例と今後の研究展開 -, 日本土壌肥料学会東北支部大会, 1-1-16, 2017.07.
- 2) 白戸康人ら. 林地から農地への土地利用変化が表層30cmの土壌炭素量に及ぼす影響~Equivalent Soil Mass法による評価~, 日本土壌肥料学会講演要旨集, 63:8-2-15, 2017.09.
- 3) 片柳薫子ら. 森林-農地間の土地利用変化による土壌炭素蓄積量変化をプロセスモデルで予測する, 日本土壌肥料学会講演要旨集, 63:8-2-14, 2017.09.
- 4) 酒井寿夫. 棚田跡地に植林されたヒノキ・スギ混交林における土壌炭素蓄積速度の推定について, 応用森林学会大会研究発表要旨集, 68:30, 2017.11
- 5) 鶴田健二(森林総研PD)ら. 森林と農地間の土地利用変化が土壌炭素量に及ぼす影響-モデル構築と検証-, 日本森林学会大会学術講演集, 129:P2-188, 2018.03.
- 6) 石塚成宏, 金子真司, 鶴田健二(森林総研PD), 橋本昌司ら, 農地から森林への土地利用変化が土壌炭素量に与える影響-観測結果-, 129:P2-187, 2018.03.
- 7) 石塚成宏ら. 農地から森林への土地利用変化が土壌炭素量に与える影響-続報-. 日本森林学会講演要旨集, 130:ページ未定, 2019.03.
- 8) 鶴田健二(森林総研PD)ら. 森林と農地間の土地利用変化に伴う土壌炭素量の変化予測. 日本森林学会講演要旨集, 130:ページ未定, 2019.03.
- 9) 下田星児・若林勝史・輿水美奈・丹羽勝久, 北海道十勝地方の農地化年代の異なる圃場における森林との有機物層の違い, 日本土壌肥料学会2018年全国大会, 講演要旨集153P
- 10) 古賀伸久, 新美洋, 山根剛, 草場敬, 島武男: 2017年度日本土壌肥料学会九州支部例会 (2017) 「森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素量の変化 -九州沖縄農業研究センター隔離ほ場での測定事例-」
- 11) Nobuhisa Koga, Takashi Kusaba, Hiroshi Niimi, Takeo Shima, Tsuyoshi Yamane: The 21st World Congress of Soil Science, Rio de Janeiro, Brazil, 2018
“Measuring changes in soil carbon stocks in western Japan as influenced by land conversions from forest land to cropland”
- 12) Yasuhito Shirato, Hiroshi Obara, Kazunori Kohyama, Takashi Kanda, Haruna Inoue, Seiji Shimoda, Katsufumi Wakabayashi, Mina Koshimizu, Katsuhisa Niwa, Nobuhisa Koga, Tsuyoshi Yamane, Takashi Kusaba, Hiroshi Niimi, Takeo Shima, Shigehiro Ishizuka, Shinji Kaneko, Shoji Hashimoto, Yoshiki Shinomiya, Shuhei Aizawa, Eriko Itoh, Toru Hashimoto, Tomoaki Morishita, Kyotaro Noguchi, Kenji Ono, Nobuko Katayanagi, Kazuyuki Atsumi: The 21st World Congress of Soil Science (2018) “Soil carbon stock change after land use change from forest to cropland”

in Japan”

7. 研究者略歴

研究代表者：天野 正博

名古屋大学農学研究科、農学博士、早稲田大学教授、現在、早稲田大学持続型食・農・バイオ研究所招聘研究員

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、現在、農研機構農業環境変動研究センター気候変動対応研究領域土壌炭素窒素モデリングユニット長

2) 金子 真司

筑波大学農学研究科修士課程修了、土壌学博士、現在、森林総合研究所 戦略研究部門 震災復興・放射性物質研究拠点長

3) 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、森林総合研究所 立地環境研究領域土壌資源研究室長

4) 下田 星児

北海道大学農学部卒業／筑波大学生命環境科学研究科博士課程単位取得退学、博士（理学）、現在、農研機構北海道農業研究センター上級研究員

5) 古賀 伸久

九州大学大学院農学研究科博士課程単位取得退学、博士（農学）、現在、農研機構九州沖縄農業研究センター土壌肥料グループ長

6) 橋本 昌司

東京大学農学部卒業、現在、森林総合研究所土壌資源研究室主任研究員、東京大学大学院農学生命科学研究科 准教授（クロスアポイントメント）

II. 成果の詳細

II-1 森林・農地間における土地利用変化のあった部分の扱いとNIRへの反映

学校法人早稲田大学

人間科学学術院	人間環境科学科	天野 正博
人間科学学術院	人間環境科学科	平塚 基志

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
------------------------	------

平成28～30年度累計予算額：12,363千円

(うち平成28年度：4,191千円、平成29年度：4,191千円、平成30年度：3,981千円)

累計予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

IPCCインベントリー・ガイドラインが2006年に改訂された内容と背景を調べると、本研究のテーマである土地利用に変化が生じた際の土壌炭素変動量の評価が土地セクターでは重要であることが分かった。

従来の我が国の土地利用変化における土壌炭素量の算定方法は、既存の農地、森林の土壌炭素量の平均値を直線で回帰させるという初歩的な段階である。UNFCCC附属書I国の温室効果ガスインベントリー報告書(NIR)を集めて分析してみると、多くの附属書I国がこの算定方法を採用していることも分かった。

一方で、土壌炭素量の調査が進んでいる一部の国では、土壌タイプや気候などの立地条件による地帯区分毎に土地管理方法なども考慮した算定をしており、IPCCインベントリーが求めている炭素係数などの要件に対応しつつあることも明らかになった。将来的には、このような試みが国際的に標準化され、各国に同様の算定方法が求められることになる。そこで、①当課題が開発している新しい算定方法が世界の潮流のどこに位置するか、②農地・森林間だけでなく6土地利用区分にまで拡大したとき、土地利用変化による土壌炭素量を算定するのに何が課題になるか、という2つの点を明らかにした。

[キーワード]

土壌炭素量、算定方法、国家インベントリー報告書(NIR)、土地利用変化、IPCCインベントリー・ガイドライン

1. はじめに

1996年ガイドラインでは農業とそれ以外の土地利用は別の章に分かれており、両者を統一的に評価するインベントリー体系ではなかった。しかし、IPCC2006ガイドラインではリモートセンシング技術の進展もあって農業(Agriculture)、森林(Forest)、その他土地利用(Other Land Use)を土地セクター(AFOLU)としてwall to wallの形でまとめて報告することになった。この変化には、土地利用セクターからの人為的なGHG排出量が化石燃料に次いで多いという背景があった。我が国では炭素蓄積量が多い火山灰土壌が発達しており、森林と農地間での土地利用変化時に土壌攪乱があれば、GHGの大きな排出源となる可能性がある。しかし、現行のNIRでは土地利用変化による土壌炭素量変動のメカニズムをブラックボックスにしたまま、両土地利用間での平均的な土壌炭素量の差がGHG吸排出量として報告されている。

2. 研究開発目的

(1) 今回の研究が必要となった背景に、IPCC1996ガイドラインからIPCC2006ガイドラインへの変更

ともない、国別温室効果ガスインベントリー報告書（NIR）に求められる内容が変わったということがある。そこで、2つのガイドラインの違いとその背景を先に明らかにする。

(2) NIRにおける土壌炭素の変動量に関連する項目の整理と各国の対応方法の調査を行い、土地利用分野（6つの土地利用区分）における土壌炭素量の算定方法を分析・整理し、我が国の土地利用におけるインベントリーの現時点での位置づけ、そして本研究が目指す方向を明らかにする。また、森林と農地間の土地利用変化を中心に算定上の問題点を抽出・精査し、各サブ課題の研究者と協力して報告方法を整理する。

(3) 森林と農地間での土地利用変化から6土地利用区分に拡張したとき、土地利用変化による土壌炭素量の変動を算定する上で解決すべき課題を明らかにする。

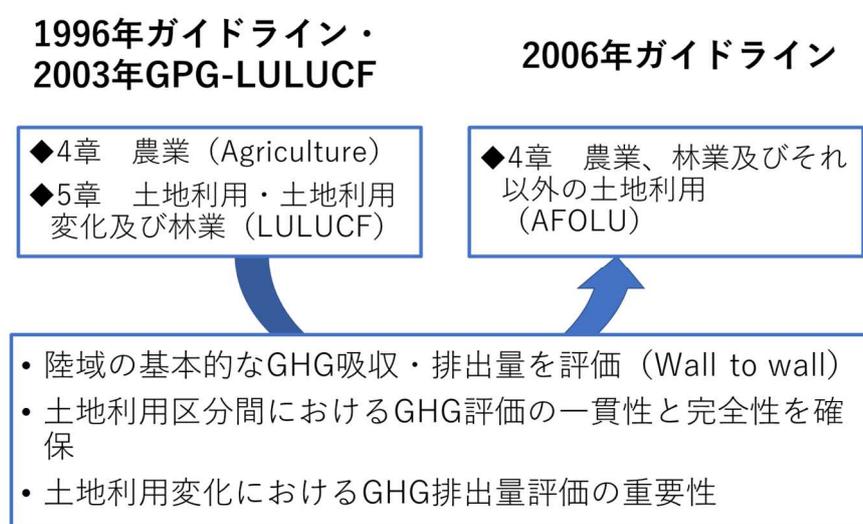
3. 研究開発方法

IPCC1996ガイドラインからIPCC2006ガイドラインに変更された際の相違点を明らかにするとともに、その背景を分析し土地利用変化が生じた際の土壌炭素量算定を別区分で報告することの重要性を示す。つぎにUNFCCC附属書I国のNIRを収集し、各国のNIR作成に向けた調査方法を土壌炭素量の算定手法に焦点を当てて整理する。また、サブテーマ1の研究分担者、協力者がNIRのレビュアーとして携わった際の経験も参考にしながら、農地と森林間で土地利用変化が生じない場合、および両者間で土地利用変化が生じた場合の土壌炭素量算定手法をタイプ別に区分する。

最後に、森林・農地間だけでなく土地セクターの6区分全体で土地利用変化係数を算定する上での問題点についても考察する。

4. 結果及び考察

(1) NIRにおいて土地利用変化時の土壌炭素量の把握が重視された経緯

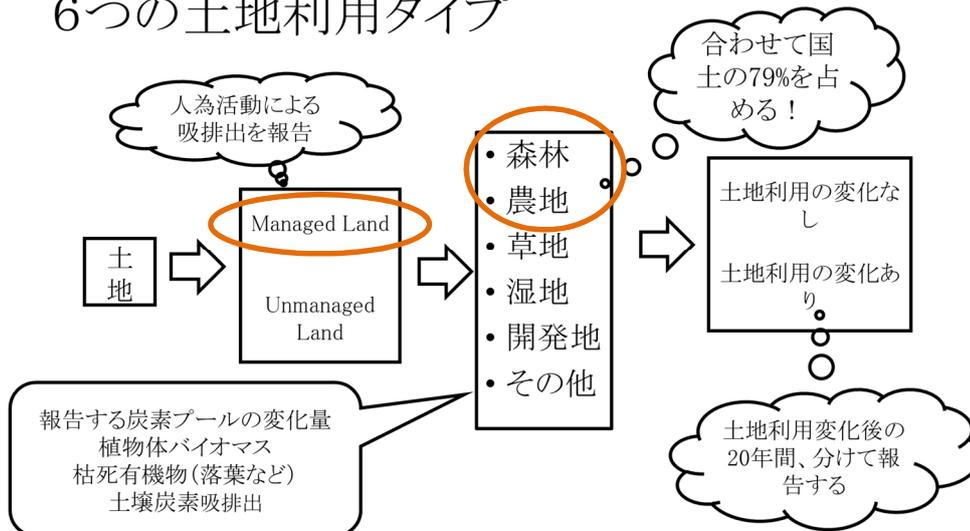


図(1)-1 IPCC1996ガイドラインと2006ガイドラインの違い

IPCC1996年ガイドラインでは農業とそれ以外の土地利用は別の章に分かれており、両者を統一的に評価するインベントリー体系ではなかった。しかし、IPCC2006年ガイドラインではリモートセンシング技術の進展もあって農業 (Agriculture)、森林 (Forest)、その他土地利用 (Other Land Use) を土地セクター (AFOLU) としてまとめて報告することになった。修正された概略は図(1)-1のようになる。

このとき、土地利用セクターは図(1)-2に示したような6つの土地利用に区分され、土地は自然に放置されている土地と人為活動に供する土地に区分された。土地セクター全体は図にあるように、森林、農地等の6つに区分され、それぞれ土地利用が変化しない土地、変化した土地に区分して報告することになった。土地利用変化があった場合、地上部バイオマスや構造物などによるGHG吸排出量は即座に算定できるが、土壌中の炭素蓄積量は土壌中の小動物や微生物の働きにより時間をかけ変化する。このため、デフォルトで20年間は土地利用変化がない部分と変化があった部分を分けて報告することを求められている。また、NIRとは別に京都議定書の目標達成に向けた報告では、Managed Landと呼ばれる部分

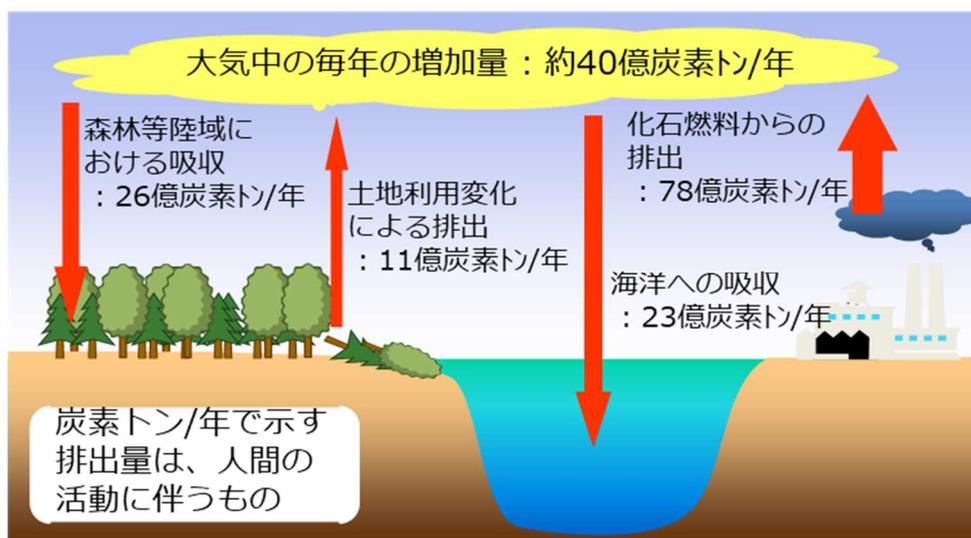
6つの土地利用タイプ



図(1)-2 IPCC2006ガイドラインによる土地利用セクターの区分

土地面積の79%を両者が占めていることから、まずは図(1)-2の茶色で記した土地利用変化における土壌炭素量の変動を明らかにするためである。

IPCC2006ガイドラインが土地利用変化によるGHG吸排出量に注目する理由を述べる。IPCC第5次評価



図(1)-3 大気中の炭素循環(2000年代) IPCC第5次評価報告書より作成

の2倍に匹敵する。土地利用変化を起因として土壌が攪乱されることにより、土壌中の炭素が大気中に放出されている実態を明らかにするため、土地利用変化過程における土壌炭素量の変動を別に報告することになった。

(2) IPCC2006ガイドライン¹⁾の土壌炭素量算定方法で求められる要件と各国の対応状況の概要

我が国の農地と森林間での土地利用変化に伴う土壌炭素量の変化は、現行のNIRでは農地と森林の土壌炭素の平均値をもとに、その差分から20年の遷移期間を線形補間して報告していた。IPCC2006ガイドラインの意図に沿って土地利用変化が生じた場所の土壌炭素量を科学的に評価するシステムを開発することが行政のニーズとして高まっていた。

このサブテーマではGHGインベントリーへの取り組みが進んでいる国連気候変動枠組条約(UNFCCC)附属書I国(先進国・市場経済移行国)41カ国のNIR²⁾⁻³¹⁾を対象に、森林・農地間における土地利用変化に限らない6つの土地利用区分に拡張して、土壌炭素量を中心とした算定方法論、土地利用変化にお

についてのみ、各国の目標値の算定に用いることが決められた。Unmanaged Landの吸排出量は自然の摂理によるもので、人為活動ではないとの考えにもとづく。我が国の森林でも保安林以外の天然林の炭素吸収量は京都議定書では算定されなかった。当該課題【2-1601】では森林、農地間での土地利用変化に焦点を合わせているが、これは我が国の土

報告書の地球レベルでの炭素循環の数値を図(1)-3のように整理すると解りやすい。通常は陸域生態系の多くはGHG吸収源であるが、土地利用変化が生じたときには大きな排出源になっている。長年月の陸域植生の光合成により膨大な量の炭素が土壌中に蓄積されており、土壌中の炭素量は大気中のそれ

ける取り組みを一覧で整理する。とくに、IPCC のデフォルト標準手法以外の独自の知見や工夫を行っている事例に着目し、その特徴を幾つかの表にまとめた。なお、土地利用変化が生じた際の土壤炭素蓄積量の変化の算定方法を Tier 別に示すと以下のようになる。

Tier.3 (高次の方法論)

- ・モデルの適用
- ・土壤インベントリーの経年変化等の実測結果を利用

Tier2 (国独自のデータを利用)

- ・参照土壤炭素蓄積量に独自の炭素係数 (土地利用変化係数) を乗ずる標準手法
- ・土地利用変化が生じた土地区分の平均土壤炭素量を比較する変形手法

Tier1 (デフォルトデータの利用)

- ・国独自の参照土壤炭素蓄積量にデフォルト炭素係数 (土地利用変化係数) を乗ずる標準手法
- ・デフォルト参照土壤炭素蓄積量にデフォルト炭素係数 (土地利用変化係数) を乗ずる標準手法
- ・土地管理方法や土地利用変化無しとして、土壤炭素量の変化なしと報告する方法

土壤炭素量変化の計算の実施はこの 5-6 年で一気に進展した。2016 年から 2017 年の間においても再計算を実施した国は少なくない。土地利用変化に伴う土壤炭素蓄積量の変化の算定は、その国で得られる土壤データに依存する面が大き。それなりにデータのある国では、異なる土地利用における平均土壤炭素量の設定が可能であり、土地利用変化による土壤炭素変動量の算定では、土地利用間の平均土壤炭素量を比較するアプローチを採用するケースも我が国も含めて多かった。2016 年の附属書 I 国 (先進国) が温室効果ガスインベントリーにおいて、森林 (転用のない森林)、農地 (転用のない農地)、土地利用変化に適用されている方法論の概要は表(1)-1 以下のとおりである。

表(1)-1 適用している Tier 別の算定方法概要

算定対象	Tier.3		Tier.2			Tier.1	
	モデル	実測	標準手法	変形手法	標準手法	変化なし	未推計
森林	10	6	0	3	0	18	5
農地	9	1	8	8	5	9	2
森林と農地 間の変化	6	0	5	28	6	3	3

※ここでの標準手法は $(SOC = SOC_{ref} * F_{LU} * F_{MG} * F_I)$ の形式に則ったものである。変形手法は $(SOC_2 - SOC_1) / T$ を適用しているが、 $(SOC = SOC_{ref} * F_{LU} * F_{MG} * F_I)$ は適用していない場合として整理した。つまり、2 つの異なる土地利用間での平均的な土壤炭素量の差を、土地利用変化における排出量と置き換えている方法である。ここで、各変数は、土壤炭素量 (SOC)、参照土壤炭素量 (SOC_{ref})、土地利用変化前の SOC (SOC_1)、土地利用変化後の SOC (SOC_2) であり、各係数は、土地利用変化に関する係数 (F_{LU})、管理に関する係数 (F_{MG})、投入に関する係数 (F_I)、遷移期間 (T) である。

(3) IPCC2006 ガイドラインが求める要件と各国の対応

IPCC2006 ガイドラインで、土地利用の変化の有無にかかわらず土壤炭素量の算定で求められる要件を、下記のように整理した。

1) 鉱質土壌 (Mineral Soil) と有機質土壌 (Organic Soil) の分離

(IPCC2006 ガイドライン上の整理)

有機質土壌において GHG の発生メカニズムが異なるため、両者を分離している。これまでの国内での整理では次のようになっている。

- 北海道を中心に泥炭土、黒泥土等の有機質土壌が存在しているが、農地利用する際は客土することが一般的である。このため、表層はほぼ鉱質土壌となっているが、過去の国内調査での排出は、客土なし有機質土壌 > 客土あり有機質土壌 > 鉱質土壌、という傾向がある。したがって、客土した有機質土壌の農地も有機質土壌地として扱っている。

- 農地・森林においては、不良土を農地化、森林化する事例は少ないと整理しており、国内の土地利用変化でも客土をあまり重要視していない。

(IPCC2006 ガイドライン上の課題)

- IPCC2006 ガイドライン上の客土の場合の取り扱いは明確ではなく、国際基準がない。

(開発地への拡張時の留意点)

- 開発地への転用（土木工事）においては、不良土上でも施工される。泥炭等の高有機質土壌については、以前は盛土には使えず捨土としていたようであるが、最近は固化材混合により有効利用が進んでいるようである。このようなケースの GHG 排出への影響は各国の NIR でも不明である。

2) 土壌の深さ及び参照土壌炭素量 (SOC_{ref}) の設定

(IPCC ガイドライン上の整理)

IPCC2006 ガイドライン¹⁾では、Tier.1 適用時には深さ 30cm がデフォルト深度で、Tier.2 以上でデータがある場合には、それより深い深度を選択できる、と記載されている (IPCC2006 ガイドライン p2. 29)。これは、逆にいえば 30cm より浅い深度は基本的に選択できないということの意味する。各国の土壌深度の扱い状況を見ると

ア) 7 割近い国がデフォルトの 30cm を利用。

イ) それ以外を利用している国では、20cm (クロアチア)、40cm (オーストラリア、ブルガリア、ポルトガル、スロベニア)、50cm (スウェーデン、オーストリア (森林))、100cm (デンマーク、フィンランド、イギリス、米国、ノルウェー (森林)) となる。

ウ) 土地転用時とそれ以外で土壌深度を使い分けている国もある (オーストリア、米国)。

エ) 国内で異なる土壌深度を用いているケースとしては、オーストリア (森林は 50cm、農地・草地は 30cm、土地利用変化時は転用先の深さに合わせる)、スウェーデン (50cm、農地のみ 25cm、土地利用変化は転用前の土地に炭素係数を乗ずる)、米国 (100cm、土地利用変化は一律 30cm)、ノルウェー (森林は 100cm、農地と土地利用変化は 30cm) などがある。

Tier.2 として参照する土壌炭素量 (SOC_{ref}) に国独自のデータを反映する場合、①土壌グループを適切な気候帯および土壌区分を用いて区分化すること、②参照とする土壌の状況を考慮すること、③土壌深度に応じた炭素蓄積量の増加・減少状況を考慮すること、の 3 点が必要とされている。なお、②については、SOC_{ref} デフォルト値と同様の自然状態 (native land) 以外の状況を参考にできる、とされている。③については、管理や土地利用変化の影響が 30cm 以上で及ぶことは明確なので、30cm 以上の深度で計算をすることは、十分なデータがある場合には良好な手法であるとされている。

参照土壌炭素量は、30ヶ国以上が国独自の値を用いているが、土壌タイプ別の設定値を設けている国は少なく、加重平均などにより土地利用区別の平均値を設定している場合が多い。この点はガイドラインの内容が十分に反映されていないといえる。表(1)-2に、算定において工夫がみられる事例を記載する。

我が国においては、土地利用の変化の有無にかかわらず、火山灰土の多い土壌分布特性を考慮して、代表性をもつ土壌、地域をどのように分類するかを検討すべきである。

表(1)-2 土壌炭素量算定における工夫の事例

事例	対象国
土地ユニットごとに算定	加、豪、米、チェコ
土壌炭素量設定を 詳細レベルで実施	オランダ、ポーランド
	オーストリア
土地利用変化を表 す炭素係数の設 定、精査	ラトビア、スウェーデン
	ルクセンブルク
	参照土壌炭素量は国一本で設定するが、土地利用変化係数を、土壌別情報の面積加重平均によ

る土地利用ごとの係数として作成
 土壤分類別炭素量設定+土地利用変化係数の精査(各土地利用の立地条件の違いを踏まえ、例えば農地は存在しているが森林が立地していない土壤は、森林から農地への転用時には対象から除外するなどの処理を行い、土地転用時の変化量を設定) ハンガリー

ウ) 土地利用が変化したときの遷移期間の設定

土地利用変化時の土壤炭素量の算定で、遷移期間をどのように設定するかは重要である。各国が設定している遷移期間は、以下のとおりである。

- ✓ ほとんどの国がデフォルトの20年を設定している。我が国もこれまでは20年としている。
- ✓ それ以外を利用：ノルウェー（農地のみ30年）、デンマーク（50年、100年）、カナダ（一部で50年）、イギリス（50～850年）。
- ✓ イギリスは指数変化も適用。

(4) 各国の土壤炭素量算定方法

1) 森林土壤の算定方法

森林（転用のない森林）に適用された各国の方法論をみると、管理状況の顕著な変化を統計、センサスなどの情報で把握することが難しいため、標準手法は全く適用されていなかった。森林土壤炭素の算定は、Tier.3の適用か、変化なしとして報告するかの状況に二分されていた。変化なしの報告には、単にそのような推定をしている場合と、実測やモデル算定の結果でほとんど変化が見られていないことを根拠にしている場合があった。

以下に主な特徴を列挙する。

- ✓ 多くの国が国独自の土壤調査の情報を何らかの形で保有しており、森林土壤中の炭素量(SOCforest)としての土壤炭素蓄積量は、国独自の値が使われていることがほとんどであった。
- ✓ Tier.3については、CENTURY、Roth C、Yasso07などのモデルを活用して算定している場合と、経年的な土壤調査の結果を用い、年間変化係数を設定するなどして算定している場合があった。
- ✓ モデルは、土壤炭素蓄積量の変化を計算するために用いている場合のほか、土壤調査の結果から土壤炭素量を推計する過程で用いている場合もあった。
- ✓ 一部の国においては、モデルを用いた計算結果を「変化が生じていない」、もしくは「排出になっていない（京都議定書報告で認められている報告手法）」ことの証明に使っていた。

各国の土壤炭素量を整理したのが表(1)-3である。

表(1)-3 各国の森林の土壤炭素蓄積量変化の算定方法の一覧

Tier	方法	適用している国
Tier.3	CENTURY	日本
	DAYCENT biogeochemical model (CENTURY型)	米国
	Roth C	オーストラリア
	Yasso07	オーストリア、スイス、フィンランド、ノルウェー
	Carbon Budget Model ⁺	カナダ、ブルガリア
	CARBINE ⁺	イギリス
	実測	ベルギー、ベラルーシ、ドイツ
	実測の直接利用	スウェーデン（エストニア）
	実測を用いた平均土壤炭素+森林面積変化	ロシア
	Tier.2	標準

Tier	方法	適用している国
Tier. 1	土地細区分別炭素量比較	ポルトガル、ニュージーランド
	土壌面積変化による炭素変化量の算定	ポーランド
変化なしと仮定	根拠有	リトアニア、ラトビア、ルーマニア、スロベニア、ウクライナ
	推定	チェコ、スペイン、フランス、ギリシャ、クロアチア、リヒテンシュタイン、ルクセンブルク、オランダ、スロバキア
排出になっていないと報告 未推計		デンマーク、ハンガリー、アイルランド”、イタリア” キプロス、アイスランド、カザフスタン、トルコ、マルタ (NO)

+ : 一般的なモデル名ではなく国独自の呼称

“ : インベントリーには採用していないが別途Tier. 3の推計値が存在

2) 農地土壌の算定方法

表(1)-4 に、農地（転用のない農地）に適用された方法論の概要を示す。7 割以上の国が転用のない農地の鉱質土壌の炭素蓄積量を推計していた。これは、転用のない土地利用区分の中では、最も多くの国が算定結果を提供できている。

主な特徴を以下に示す。

- ✓ 農地土壌炭素の算定には、Tier. 3、Tier. 2、Tier. 1 が万遍なく利用されており、未推計もしくは変化なしと報告している国は全体の 1/4 程度であった。
- ✓ 方法論としては主に以下のパターンに分かれていた。
 - Tier. 3 のモデルを用いて算定する。
 - 土地管理変化、営農状態変化から Tier. 2、Tier. 1 の標準手法で算定する。
 - 農地内の地目の変化（例：Annual Crop⇔Perennial Crop）において、転用前後の土壌炭素量の比較を行う。
- ✓ モデルを適用している場合でも、森林と農地を同じモデル内で計算している場合と、それぞれ別のモデルで算定している場合があった。
- ✓ Tier. 2 については、土地転用がない場合の管理変化を計上する標準手法のほか、単年生作物と木本作物間の転用といった地目変化を計算している方法も採用されていた。

表(1)-4 各国の農地の土壌炭素蓄積量変化の算定方法の一覧

Tier	方法	適用している国
Tier. 3	Roth C	日本、オーストラリア
	Yasso07	フィンランド
	C-TOOL+(CENTURY 型)	デンマーク
	Can Ag-MARS+ (CENTURY 型)	カナダ
	DAYCENT biogeochemical model (CENTURY 型)	米国
	ICBM+	スウェーデン
	イン・アウトを踏またモデル	ロシア
Tier. 2	窒素バランスと連動 実測データなど	ウクライナ ベルギー
	標準（地域レベル）	オーストリア、カザフスタン、イギリス**、ノルウェー**
	標準（細区画）	チェコ、ポルトガル
	標準（国）	スペイン、フランス
	農地内平均	トルコ
	炭素量比較 （単年生⇔ 多年生）など	ハンガリー、ルクセンブルク
	国全体（土壌立地条件を加味） 国全体（単純平均）	ブルガリア、クロアチア、スロベニア、ニュージーランド

Tier	方法	適用している国
Tier.1	標準手法	エストニア、アイルランド、マルタ、リトアニア、スロバキア
	土壌面積変化による炭素変化量の算定	ポーランド
	変化なしと仮定	スイス
	根拠有推定	ドイツ、ギリシャ、アイスランド、イタリア、ラトビア、オランダ、ルーマニア、リヒテンシュタイン
	未推計	ベラルーシ、キプロス

+ : 一般的なモデル名ではなく国独自の呼称

++ : モデルで係数を設定

3) 森林⇄農地間の土地利用変化に伴う土壌炭素の算定状況

森林、農地間の転用は、炭素係数を使わずに平均炭素量の比較を行う国が多かった。平均炭素量は単純平均を行っている国以外に、土地細区分や土壌立地条件を加味して算定している国もあった。土地利用変化時に適用された方法論の概要は表(1)-5のようになる。また、以下に主な特徴を列挙する。

- ✓ 土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積量変化の算定にモデルを直接適用している国の数は、転用のない土地における土壌炭素蓄積量変化の算定に適用している国と比べると少なく、多くの国が自国の土壌データを用いた Tier.2 を適用している。
- ✓ 転用前後の土地利用の平均土壌炭素量を単純比較することで、遷移期間の土壌炭素変化量を推計する方法を適用している国も多く見られた。例えば、森林よりも農地の土壌炭素量が多くなっているというように、土地利用変化の効果よりも立地条件の違いを拾っていると考えられる事例も散見された。これは、両者を比較するにあたり、土壌タイプの違いを無視して単純に農地あるいは森林の土壌炭素量の値を用いるためである。
- ✓ ただし、上記のような常識に反する結果が出る事例でも、明示的に改善計画を記載している国は少なく、現在の UNFCCC 審査でもそれほど問題視はされていない。つまり、国際的に土地利用変化時に転用前後の平均値を単純比較する手法の問題点があまり認識されていない。
- ✓ 開発地への転用については、平均土壌炭素蓄積量を設定するのではなく、IPCC2006 ガイドラインの方法論 (paved over された土地では元の炭素の 80%となる) というデフォルトの手法が活用されている事例があった。その理由としては、IPCC2006 ガイドラインの標準手法に則っている場合と、単にデータが不足していることが理由の場合の両方が考えられる。
- ✓ 土地利用ごとの土壌タイプの分布の違いを踏まえて Tier.2 を適用している国には以下のような事例があった。
 - 転用が実際に生ずる土壌のみで変化を算定している (ハンガリー)。
 - 土壌ごとに転用による変化量を推計したのち土壌面積分布で加重平均している (ルクセンブルグ)。
 - できるだけ均一な土壌タイプが分布しているユニットや地域レベルで、土壌炭素量の変化を計算した値を集計している (チェコ、カナダ、スイスなど)。これは、京都 LULUCF 報告の報告方法 1 を適用しているようなパターンである。
 - 初期値に変化割合を乗ずる形式で遷移期間の土壌炭素変動量を算定している (アイルランド、ノルウェー)。

表(1)-5 各国の土地利用変化 (森林、農地間) の土壌炭素蓄積量の変化算定方法の一覧

Tier	方法	適用している国
Tier.3	Roth C	オーストラリア、ロシア (LG)
	Yasso07	フィンランド
	モデルによる係数設定	カナダ
	CENTURY	イギリス
	CARBINE	米国 (LC, LG の一部)
	DAYCENT biogeochemical model	

	実測を用いた平均土壌炭素＋森林面積変化		ロシア (LF)
Tier.2	CS-SOC _{ref} + CS 炭素係数 平均炭素量比較	国全体平均 土壌別 Wall to wall 土地利用細区分別 土地利用中区分別 地域別 国全体 (土壌立地条件を加味) 土地利用大区分別 (単純平均)	ラトビア、スウェーデン 米国 (LF、一部 LC、LG) オランダ チェコ、スイス (リヒテンシュタイン)、 ポルトガル (18 区分)、ニュージーランド (12 区分) オーストリア (F 関係)、フランス ハンガリー、ルクセンブルク オーストリア (C, G 関係)、ベルギー、ブルガリア*、ドイツ#、デンマーク、エストニア (CF) *、クロアチア、イタリア、ノルウェー*、ルーマニア、スロバキア、スロベニア、トルコ、リトアニア (CG、GC)、スウェーデン (LF) *、スペイン、ニュージーランド、日本
Tier.1	土地利用変化係数 他国の係数を利用 CS-SOC _{ref} + デフォルト炭素係数 デフォルト SOC _{ref} + デフォルト炭素係数	国全体	アイスランド エストニア (LC、CF 以外) エストニア (LC)、ギリシャ、アイスランド (GC) ウクライナ、ポーランド※実質 IE マルタ (CG、GC)、 アイルランド (LF)、マルタ、カザフスタン アイルランド (LC) ベラルーシ、キプロス、リトアニア (LF)
	変化なしと仮定 転用が生じていない 未推計		

*：日本と同様の森林・農地の土壌炭素量の間で逆転現象が生じている国。

#：土壌炭素量について大きな森林<草地の差異が存在。

農地土壌の炭素蓄積量が森林土壌よりも多くなるという逆転現象がいくつかの国で見られる。この状況を表(1)-6にまとめた。

表(1)-6 森林土壌、農地土壌の報告がある国での土壌炭素量の関係

関係	国数	国名
森林>農地	23	○SOC 比較の場合 オーストリア (Alpine ridge 以外)、ベルギー、スイス、イギリス、デンマーク、スペイン、フランス、クロアチア、イタリア、ルクセンブルク、ニュージーランド、ルーマニア、スロバキア、スロベニア、トルコ ○標準手法適用の場合 ラトビア、米国、アイスランド、スウェーデン、エストニア、ギリシャ、マルタ、ウクライナ
農地>森林	5	オーストリア (Alpine ridge)、ブルガリア、エストニア、ノルウェー、スウェーデン、日本

※表(1)-1に同じ

(5) 開発地への土地利用変化に伴う土壌炭素の算定状況

農地、森林だけでなく 6 土地利用区分に拡張して土地利用変化時の土壌炭素量変化を考える場合、我が国で重要なのは草地と開発地である。草地については農地や森林に用いた土壌炭素量の算定方法の延長で対応が可能である。一方、開発地は様々な土地被覆条件を含むことから、平均土壌炭素量を設定せず、土地利用変化前の土壌炭素量に変化係数を乗じて計算する国が、森林・農用地間の転用よりも多かった。

表(1)-7 各国の土地利用変化（開発地）の土壤炭素蓄積量の変化算定方法の一覧

Tier	方法	適用している国
Tier.3	モデルによる係数設定	イギリス
Tier.2	標準（減衰率）	スイス（リヒテンシュタイン）：構造物は0.5 デンマーク：100年で0.01 フランス：独自係数 アイルランド：森林からの転用は1、それ以外は0.5 オランダ：被覆地は0、緑地はデフォルトの0.8、被覆地：緑地割合は1:1 ロシア：Dについて一律元の土壤の0.82 スウェーデン：道路への転用0.8、パイプラインへの転用0.2、それ以外0.5 米国：一律元の土壤の0.7 ハンガリー、ルクセンブルク
	平均炭素量利用	国全体（土壤立地条件を加味） 土地利用細区分別 国全体（単純平均）
		ポルトガル（18区分）、 オーストリア、ベルギー、ブルガリア、ドイツ、クロアチア、リトアニア、カザフスタン、ルーマニア、スロバキア、トルコ、日本
		国全体（代用値） ニュージーランド（低生産性草地）、スロベニア（単年生農地の半分）、 ルーマニア：農地土壤の表層10cmを除去 イタリア エストニア
Tier.1	他国の値を利用 標準+デフォルト 変化係数 炭素係数1	国独自のSOC _{ref} 利用 デフォルトSOC _{ref} - ポーランド カナダ アイスランド ベラルーシ、キプロス、チェコ
	微小（詳細報告せず） 該当する土地利用変化なし 未推計	

(6) 土壤炭素量の算定方法に関する国別の主な特徴のデータベース化

土壤炭素量算定に関する各国の状況を迅速に把握するため、対象国の土壤炭素量算定に関する特徴を記述し、加えて以下の項目について土壤炭素量のインベントリーの実態を表現している。

- ① 土壤炭素量算定方法論
- ② 土壤炭素量算定対象土地区分
- ③ 土地利用区分面積算定方法
- ④ 土壤炭素量の算定に用いる
土壤深度
- ⑤ 土壤炭素量算定単位

以下にデータベースの例としてオーストラリアのデータ内容を示す。

オーストラリア²⁾

全土地利用（実質的には森林、農用地およびその関連する土地利用変化）を対象に National Soil Carbon map や、その他の気候・気象・営農活動、炭素プール間のマスバランスなどの情報を用いた、FullCAM という炭素のマスバランスを考慮したプロセスモデルをベースとする算定システムが適用されている。

FullCAM モデルは全炭素プールを対象としているが、生体バイオマス・腐植および土壤インプットデータまでを網羅する森林を対象とした CAMFor コンポーネント、農地・草地を対象とする CAMAg コンポーネント、これらのインプットデータを踏まえて土壤炭素プールを Roth C モデルを用いて算定する

Roth C コンポーネントの3つに分かれている。

土壌の炭素動態は、基本的に森林、農地、草地（湿地が関わる土地転用を除く）の関係する土地利用・土地転用はRoth Cモデルにより計算されている。湿地ガイドライン適用部分はTier.2、開発地への転用はTier.1、その他の土地はすべて非管理地であると想定（炭素蓄積量変化は考慮しない、またその他の土地への土地転用は想定しない）している。

FullCAMは、25m×25mの範囲の深度30cmまでの土壌炭素変化（管理活動の影響）を把握するアプローチ3のwall to wall形式のモデルである。その空間精度は、活動量として土地利用変化が把握できるリモートセンシングの最小精度に合わせて設定されたものである。入力データは、位置情報付きの気候データ、土壌の粘土含有量および水分保有量、初期条件の土壌炭素量、5年おきのセンサスから得られる生育作物のタイプ・耕起頻度や残渣処理に関する管理情報などである。有機土壌炭素や食物残渣の分解は、オーストラリアの状況で調整された一次減衰関数に応じた分解率にもとづいて設定する。モデル計算の時間ステップは月レベルである。1990年時点で管理状況を以降の年次すべてに適用するシナリオと、1991年以降も管理の状況を適時反映するシナリオの2通りで計算し、その結果の差異を管理の影響として把握している。

土壌炭素量の情報は、*Viscarra-Rossel et al. (2014)³²⁾*により得られたオーストラリア全土を網羅する土壌地図をもとにしている。土地利用区分は、国の土地利用地図（ABARES 2016）による、1) 森林、2) 農地、3) 草地、4) 森林減少地、5) 森林から農地・草地への転用地、6) 草地から森林への転用地、7) 疎な木本生植生を有する土地の分類と、リモセンの組み合わせによりIPCCの土地利用カテゴリを把握している。

項目	内容
国名	オーストラリア
土壌炭素量算定方法論	森林、農地、草地（下記を除く）：Roth Cを用いたTier.3モデル計算 湿地の絡む土地転用：湿地ガイドラインを用いたTier.1 開発地への転用：Tier.1
土壌炭素量算定対象土地区分	全土地利用一括（実質的な算定対象は、森林、農用地及びその関連する土地利用変化）
土地利用区分面積算定方法	Wall to wall形式のアプローチ3。空間解像度は25m
土壌深度	30cmまで
土壌炭素量算定単位	Wall to wallの25×25mのグリッド

※アプローチ1：各土地利用区分の面積の変化だけ時系列で示し、面積の増減がどの土地利用からの変化によるものかの情報は必ずしも明示としない方法

※アプローチ2：各土地利用区分の面積変化をマトリクスで示し、どの土地利用からどの土地利用への変化が生じたかを明示する方法

※アプローチ3：各土地利用区分の面積変化について、地理的な位置情報を踏まえて、どこの場所で、どの土地利用からどの土地利用へ変化が生じたかの情報が把握できる方法

(7) 農地・森林間から6土地利用区分での土地利用変化に拡大したときの留意事項

6土地利用区分に拡大したとき、当課題では想定していなかったいくつかの留意すべき事項がある。各国のNIRをレビューする過程で、それを下記のように整理した。

✓ 客土の扱い

- IPCC2006ガイドラインでは、mineral soilとorganic soilの大分類を行った後、mineral soilは土壌炭素量の2時点間の変化、organic soilは面積×排出係数、という形式で炭素ストック変化量を計算することを標準手法としている。
- Mineral soilは土地利用変化時には表層から一定の深さ（デフォルト30cm、日本も30cmを利用）における、土壌炭素量の変化を計算する。Organic soilはどちらかという乾燥によ

る表土からの GHG 排出というフラックス的な考えにもとづいて計算し、土壌深度の規定は設けられていない。

- 我が国では、有機質土壌を農用地化する際や農用地を住宅地として土地転用する際は、客土を行うことが一般的である。また土木工事を実施する場合でも、現場から出てきた土壌を用いて盛土などが行われる。これらの場合、元の土地利用における表層 30cm の土壌が転用先の土地利用における表層 30cm の土壌に含まれているとは限らない。
 - 開発地への転用（住宅化、土木工事）においては、もとの土壌の上に盛土などを行うことも一般的であり、転用前の土壌が地表面より深く位置することになる。この点に関しての扱いはガイダンスには明示されていない。2019 年 IPCC ガイドラインでも、研究結果の不足により、開発地への転用に関する土壌炭素蓄積量変化の方法論の改訂を断念している。
 - 開発地はさまざまな土地形態を含むことから、平均土壌炭素蓄積量の設定を断念する国も多く、IPCC ガイドラインのデフォルト手法（炭素係数を乗ずる）が活用されている事例が多い。検討が進んでいる国では、開発地内の植生被覆の状況や土地の利用状況別に土壌炭素量を検討した上で、入手できる面積データに合わせた細区分化、もしくは加重平均を実施した計算を行っている。
 - 客土の扱いは IPCC ガイドラインでも明確なガイダンスがなく、国際的な基準がない状況である。開発地への拡張を考慮する場合には客土の工法に応じた炭素係数を開発する必要があるなど、新たな土壌炭素量の算定方法の開発は避けて通れない課題である。
- ✓ 土壌タイプの代表性の扱い
- IPCC ガイドラインの Mineral soil の算定においては、Tier.1、Tier.2 の標準手法は、土壌グループ（デフォルトでは、High Activity Clay、Low Activity Clay などの分類）の土壌炭素量に土地利用、管理、投入に応じた炭素係数を乗じて算定を行う。
 - そのため、上記の方法論に準ずる場合は、土壌グループ別に、土地利用区分ごとの土壌炭素量が求められる。ただし、この方法には多くのデータが必要であることから、厳密に上記の分類に従っている国はごく少数であり、土地利用区別の平均炭素量の比較、あるいは地域別の平均炭素量の比較などを行っている。中には日本のように立地条件の違いを捨ててしまっている例もあるが、土壌タイプごとの土壌炭素量がそれほど変わらない国では、平均値の比較でも効果的に計算できると整理している。
 - 日本の場合は、土壌タイプが多様であり母材の把握が必要であることから、国独自の状況を踏まえる必要がある。

(8) まとめ

1996年ガイドラインでは農業はその他の土地利用とは切り離してGHG吸排出量を報告していた。しかし、土地利用変化時に大量のGHGが排出されることから、GHG報告することになり、2006年ガイドラインでは両者を統合し土地セクター（AFOLU）としてまとめて吸排出量をとって報告することになった。転用がない場合の土壌炭素量算定にしかし、我が国を含めて多くの国は農地と森林の土壌炭素量算定モデルは異なっているため、森林と農地間での土地利用変化による土壌炭素の変動量を算定するには、モデルの修正か新たなモデルの開発が必要となっていた。

転用のない農地土壌の炭素量を算定するのにモデルを用いている国は9カ国、森林土壌のそれは10カ国であり、そのうちオーストラリア、フィンランドは農地土壌、森林土壌とも同じモデルで炭素量を算定していた。そのため、両国は土地利用変化における土壌炭素量の算定についても、同じモデルを使用して変動量の算定を行っている。一方、農地と森林で異なるモデルを使用している国は、土地利用変化についてはカナダを除いてTier2を利用している。カナダは土地利用変化係数の設定に、モデルを使用していた。

土壌深度については多くの国がデフォルトの30cmを採用している。それ以外の土壌深度としてはデン

マーク、フィンランドなど5カ国が100cm、スウェーデン、オーストリアが50cmを採用している。4カ国は農地と森林で異なる土壌深度を採用していた。農地と森林で異なる土壌深度を米国、ノルウェーなど4カ国あり、どの国も森林土壌の方が農地土壌の深度よりも深かった。なお、ESM法を採用している国はなかった。

土地利用変化が生じたときに、転用がなかった土地と併合するまでの遷移期間については、ほとんどの国がデフォルトの20年間を採用していた。ただ、イギリスは50年から750年という長い期間を採用している。

IPCC2006ガイドラインでは、Tier2として参照する土壌炭素量を、気候帯区分および土壌タイプに応じた区分で設定することとしているが、土壌タイプ別に設定している国は少ない。多くの国は加重平均等により土地利用区分別の平均値を設定しており、我が国も同様である。

以上のように各国のNIRでの土地利用変化による土壌炭素変動量の扱いを整理すると、本研究で各サブテーマが提案したペアサンプリング法による土壌調査方法、ESM法を用いた土地利用変化にともなう土壌炭素量の変化係数の算定は、我が国のNIRの問題点の改善に資するだけでなく、IPCCインベントリー・ガイドラインに貢献すると判断した。また、土壌炭素量の挙動を表現するモデルは、NIRにおいて気候帯区分、土壌タイプを考慮しながら広域での土壌炭素変動量の推定に有効であるだけでなく、土地管理方法の変化、遷移期間の設定などにも活用できると評価できた。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

特に記載すべき事項はない

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

1) 行政と連携した研究の進行管理

本研究では環境省、農水省の土地セクターのNIRデータの取りまとめ担当者がアドバイザーリーボード会合に参加し、研究計画や成果についての議論に行政担当者として関わっている。また、これとは別に年1回の頻度で行政担当者との勉強会も開催し、研究者と行政担当者との意思疎通に努めており、行政担当者は研究の動向をリアルタイムに近い形で意識し、行政が成果を速やかに業務へ反映する仕組みを作っている。

2) 研究成果のNIRへの反映

本研究で提案した方法論は、平成30年度環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会の優先検討事項として取り上げられた。また、我が国のNIRの土地セクター取りまとめ担当者が研究協力者として本研究に参画しており、新しい土地利用変化係数による試算をリアルタイムで行うなど、研究成果をNIRへ反映させる準備は進んでいる。研究サイドも行政の意向を直接聞くことにより、社会実装を意識した成果、具体的にはNIRへの反映を指向することができる。

<行政が活用することが見込まれる成果>

1) これまで各国が統一性のない形で開発・実施してきた土壌炭素量の算定方法と、それに関連する調査方法や収集すべきデータ、メリットなどを体系的に整理することができ、我が国のNIRにおける土壌炭素量算定方法の世界での位置づけがわかり、改善すべき方向性を行政が明確に示すことができる。

2) 作成した各国の土壌炭素量算定方法のデータベースを活用することにより、行政が当課題で開発された成果についてどの国と意見交換すればよいか、どのような国々に普及していけばよいか判断する材料を提供できた。

3) 我が国からNIRのレビュアーとして参加する際にも、ここで整理された資料は有効に活用できる。

4) 本研究では農地と森林間における土地利用変化を扱ったが、このアプローチを土地セクター全体に広げたときに生じるであろう問題点を、他国のNIRを調べることで整理した。我が国では開発地の扱いが重要となるが、現行のIPCCガイドラインの方法論では対応が難しい問題点を抽出できた。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

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>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

特に記載すべき事項はない。

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「土壌が地球を救う」（主催：早稲田大学食・農・バイオ研究所、2016年11月30日、コレド日本橋ホール、観客約70名）にて講演
- 2) 一般公開シンポジウム「地球温暖化対策の手段としての森林・農業」（主催：早稲田大学食・農・バイオ研究所、2017年11月21日、コレド日本橋ホール、観客約60名）にて講演
- 3) NPO法人西川木楽会記念講演会「地球温暖化と森林生態系」（主催：NPO法人西川木楽会、2018年6月17日、飯能市西武ガスホール、参加者50名）にて講演
- 4) 農・未来塾シンポジウム「有機農業は地球の健康を守る」（主催：農・未来塾、2018年11月4日、神奈川県藤沢市相原農場、参加者約40名）にて成果紹介

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 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, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, editors. Kanagawa (JP): Institute for Global Environmental Studies. Available online at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- 2) Australian Government, Department of the Environment and Energy (2018), National Inventory Report 2016
- 3) Umweltbundesamt GmbH, Report REP-640 (2018) Austria's National Inventory Report 2018
- 4) Flemish Environment Agency, Flemish institute for technological research, Walloon Agency

- for Air and Climate, Brussels Environment, Federal Public Service of Health, Food Chain Safety and Environment DG Environment - Climate Change Section, Belgian Interregional Environment Agency and ECONOTEC (2018), Belgium's greenhouse gas inventory (1990-2016)
- 5) Executive Environment Agency at the Ministry of Environment and Water, Republic of Bulgaria (2018), National Inventory Report 2018
 - 6) Federal Office for the Environment (2018), Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990-2016
 - 7) Czech Hydrometeorological Institute (2018), National Greenhouse Gas Inventory Report of the Czech Republic
 - 8) Federal Environment Agency, Germany (2018), National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990-2016
 - 9) Danish Centre for Environment and Energy, Scientific Report from DCE No.272 (2018), Denmark's National Inventory Report 2018
 - 10) Secretaría de Estado de Medio Ambiente (2018), Espana Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2016
 - 11) Ministry of the Environment, Republic of Estonia (2018), Greenhouse Gas Emissions in Estonia 1990-2016 National Inventory Report
 - 12) Statistics Finland (2018), Greenhouse Gas Emissions in Finland 1990 to 2016
 - Centre Interprofessionnel Technique d' Etudes de la Pollution Atmosphérique (2018), Rapport National d' Inventaire pour la France
 - 13) Department for Business, Energy & Industrial Strategy, Ricardo Energy & Environment/R/3468 (2018), UK Greenhouse Gas Inventory 1990 to 2016
 - Ministry of the Environment and Energy, Greece (2018), Greece - National Inventory Report 2018
 - 14) Croatian Agency for Environment and Nature (2018), Croatian greenhouse gas inventory for the period 1990.-2016. (National Inventory Report 2018)
 - 15) Hungarian Meteorological service (2018), National Inventory Report for 1985-2016
 - Environmental Protection Agency (2018), Ireland's National Inventory Report 2018
 - 16) The Environment Agency of Iceland (2018), National Inventory Report 2018
 - Institute for Environmental Protection and Research (2018), Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2016
 - 17) Office of Environment (2018), Liechtenstein's Greenhouse Gas Inventory 1990 - 2016
 - Ministère du Développement durable et des Infrastructures - Administration de l' environnement (2018), Luxembourg's National Inventory Report 1990-2016
 - 18) Ministry of Environmental Protection and Regional Development of the Republic of Latvia (2018), Latvia's National Inventory Report 1990-2016
 - 19) National Institute for Public Health and the Environment, RIVM Report 2018-0006 (2018), Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990-2016
 - 20) Norwegian Environment Agency, Statistics Norway, Norwegian Institute of Bioeconomy Research (2018), Greenhouse Gas Emissions 1990-2016, National Inventory Report
 - 21) Ministry for the Environment (2018), New Zealand's Greenhouse Gas Inventory 1990-2016
 - 22) The National Centre for Emissions Management (2018), Poland's National Inventory Report 2018
 - 23) Portuguese Environmental Agency (2018), Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases, 1990-2016
 - 24) National Environmental Protection Agency, Ministry of Environment (2018), Romania's

Greenhouse Gas Inventory 1989-2016

- 25) Slovak Hydrometeorological Institute, Ministry of Environment of the Slovak Republic (2018), Slovak Republic National Inventory Report 2018
- 26) Slovenian Environment Agency, Ministry of the Environment and Spatial Planning, Republic of Slovenia (2018), Slovenia's National Inventory Report 2018
- 27) Swedish Environmental Protection Agency (2018), National Inventory Report Sweden 2018
- 28) Turkish Statistical Institute (2018), Turkish Greenhouse Gas Inventory 1990-2016
Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine (2018), Ukraine's Greenhouse Gas Inventory 1990-2016
- 29) United States Environmental Protection Agency, EPA 430-R-18-003 (2018), Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990-2016
- 30) Ministry of the Environment, Japan, CGER-REPORT (2016), National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan,
- 31) Environment and Climate Change Canada, (2016), National Inventory Report 1990-2016
- 32) Viscarra-Rossel et al. (2014), Baseline map of organic carbon in Australian soil to support national carbon accounting and monitoring under climate change,

II-2 農地から森林への土地利用変化に伴う土壌炭素変化の解明とモデル化

国立研究開発法人森林総合研究所

関西支所 研究専門員	金子 真司
立地環境研究領域 土壌資源研究室	石塚 成宏・橋本 昌司
立地環境研究領域 土壌調査担当チーム長	相澤 州平
震災復興・放射性物質研究拠点	篠宮 佳樹（平成28年度）
北海道支所 北方林生態環境担当チーム長	橋本 徹（平成29～30年度）
東北支所 森林環境研究グループ主任研究員	森下 智陽（平成29～30年度）
関西支所 森林環境研究グループ長	岡本 透
四国支所 森林生態系変動研究グループ長	酒井 寿夫
九州支所 森林生態系研究グループ・主任研究員	鳥山 淳平

<研究協力者>森林総合研究所非常勤特別研究員 鶴田健二

平成28～30年度累計予算額：58,788千円

（うち平成28年度：19,928千円、平成29年度：19,928千円、平成30年度：18,932千円）

累計予算額は、間接経費を含む。

【要旨】

気候変動枠組条約の国家インベントリー報告において算定が義務となっている土地利用変化時の土壌炭素量の増減の現行算定方法は、裏付けの科学的データがなく、科学的信頼性に乏しい。そこで、土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積量変化を評価するためのデータ収集とそれに伴う算定方法の開発が急がれる。本研究では、現在より60年以内に土地利用変化が起こった場所を特定し、隣接する農地と森林をペアで比較する方法により土地利用変化時の土壌炭素量変化を把握し、これらの変化をモデル化することを目的とした。全国31地点の調査結果では、深さ0-30cmで比較すると農地の方が森林よりも炭素蓄積量が大きかった。一方で、森林の表層土壌の密度の方が小さい場合が多かったため、同じ土壌量あたりの炭素蓄積量で比較するEquivalent Soil Mass (ESM) 法を導入すると森林の方が農地よりも炭素蓄積量が大きくなり、従来の概念と合致する結果が得られた。これらのことから、土地利用変化時の土壌炭素量を比較する際にはESM法を用いるのが適切であることが明らかになった。土地利用変化係数（転用後の森林の土壌炭素蓄積量÷転用前の農地の土壌炭素蓄積量）は1.09であると算出され、そのほか転用後の経過年数に応じて土地利用変化係数を変化させる2つのオプションを提示した。

【キーワード】

気候変動枠組条約、土地利用変化、土壌炭素、農地、ARD、国家インベントリー報告

1. はじめに

土地利用変化による土壌炭素量の変動は、化石燃料による二酸化炭素放出量にも匹敵すると考えられている。そのため、気候変動枠組条約の国家インベントリー報告においても、地上部バイオマス等と並んで土壌炭素量の増減も報告することになっている。しかし、実際に土地利用変化が起こった場所の土壌炭素追跡調査を実証した研究はほとんどない。現状では各土地利用の平均土壌炭素蓄積量どうしを比較し、それらの差分を20年で除することで年間変化量を算出し、これに面積を乗じて土地利用変化時の土壌炭素変化量を計算している。一方で、近年行われている土壌インベントリー調査の結果から、従来考えられているよりも森林の土壌炭素量は少ないことが明らかになってきた。全国平均値を比較すると森林の土壌炭素蓄積量よりも農地の土壌炭素蓄積量の方が大きくなる。そのため、土壌インベントリー調査の結果を反映させると、国家インベントリー報告における土地利用変化時の土壌炭素量変化は、森

林から農地に変化した場合には土壌炭素量が増加し、農地から森林に変化した場合には土壌炭素量が減少するという計算になる。これは一般的に考えられている変化とは逆の傾向であり、現行で適用されている方法の妥当性に疑義が生じる可能性が高い。しかし、これらの変化を裏付ける科学的データはほとんどなく、国家インベントリ報告の科学的信頼性を著しく損なう懸念がある。そこで、土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積量変化を評価するためのデータ収集と算定方法の開発が急がれる。

2. 研究開発目的

我が国では農地から森林、森林から農地といった土地利用変化に伴う土壌炭素の変動量について、科学的な知見がない状態で気候変動枠組条約の国家インベントリ報告（NIR）がなされており、これらの知見の収集と科学的な推定方法の提供が求められている。そこで、土地利用に伴う土壌炭素変動量を推定できるデータを集積し、これらの推定方法を提供することにより、気候変動枠組条約事務局に提出するNIRの精度向上に貢献する。本課題ではこのうち、農地から森林に土地利用変化が起こった場合について取り扱う。

3. 研究開発方法

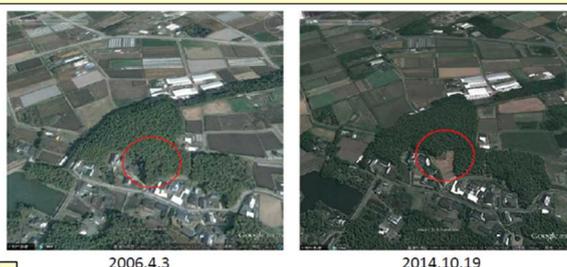
（1）土壌炭素量比較調査

土地利用変化後の森林と土地利用が変化しなかった隣接する農地の双方から土壌を採取し、それぞれの炭素蓄積量を比較する方法（ペアサンプリング法）により土壌炭素量を評価した。

1) 調査地の選定（図(2)-1）

衛星画像によるグリッド調査データ（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））と航空写真・衛星画像（国土地理院およびGoogle Map）によって農地から森林への土地利用変化が起こった場所を選定し、これらの場所が調査地として適しているかどうかを実地調査から判定した。調査地としての適性に関しては、現地において転用後の森林と対照の農地が同じ地形上に存在するかを最も重視し、土地改変に伴う表土の除去や客土などが想定される場所などについては調査対象から除外した。火山灰を母材とする土壌は炭素を蓄積しやすいことが明らかになっているため、火山灰母材の多寡による炭素蓄積速度が比較できるように、火山灰影響の大きい地点と小さい地点が同数程度になるように配慮した。また、経過年数が40年程度以内にまんべんなく選定されるように配慮した。その他、森林の前歴が対照の農地と著しく異なる場合なども除外した。これらの適性を判定した後、所有者に調査許可の承諾を得て、土壌調査およびサンプリングを行った。

4つの情報源（森林吸収源インベントリ整備事業、地理院地図、GoogleEarth、土壌図）を駆使して時系列解析



現地視察



所有者特定

許可取得

図(2)-1 調査地点の選定から調査許可取得までのフロー

2) 土壌およびリターのサンプリング

森林、農地ともに3つの試孔を作成し、これらの左右1か所ずつから層位ごとに農地は30cm程度、森林は40cm程度まで土壌を採取した（土地利用ごとに計6断面分のサンプル）。土壌の容積重を測定するための円筒試料（100mL容、Daiki）および化学分析用試料をそれぞれの層位について採取した。リターは各試孔の前方10cm程度に50cm四方の枠を設置し、その中の直径5cm未満の枝、落葉層を全量採取した。

3) 林分情報および農地の耕作履歴情報

森林の地上部バイオマス量および枯死木量（平成29年度以降）を測定した。地上部バイオマス量はおみとおし（日本森林技術協会製）を用いてカウント木の直径と樹高（ハグロフ社製、Vertex）を測定し、林分あたりの材積を計算した。各カウント木の材積は、幹材積計算プログラム（森林総合研究所、<https://www.ffpri.affrc.go.jp/database/stemvolume/index.html>）により計算し、カウント木法（ $k=4$ を使用）により林分材積を計算した。

また、土地所有者に対してヒアリングを行い、対照の農地の主たる作物の栽培状況、栽培に際しての肥料の有無や投入量、森林への転用からの経過年数について情報を収集した。

4) 土壌の分析項目と方法

円筒試料については、通常の処理を行い、根量、礫量、細土量を測定し、単位体積あたりの細土量（BD）を計算した。

化学分析用試料については、風乾後に2mmメッシュの篩を通し、さらに粉砕機（TI-200、（株）CMT製）によって微粉砕試料を作成し、乾式燃焼法（VarioMAX、エレメンタル製）により炭素含有率（TC）を求めた。さらに、火山灰の影響を評価する指標としてリン酸吸収係数を土壌環境分析法¹⁾にしたがって測定した。

5) 土壌炭素量比較の方法

従来法およびEquivalent Soil Mass（ESM）法で土壌炭素蓄積量を評価した。

従来法では森林・農地ともに深さ30cmまでの土壌炭素量を計算し比較した。土壌炭素量は、各層位の体積あたり細土量（BD）炭素含有率（TC）を乗じ、各層位の単位面積あたり体積の炭素量を算出し、深さ30cmまでの層に含まれる表層からの累積土壌炭素量（tC/ha）として算出した。

土壌の圧密や膨潤が起こる際には深さを基準に比較すると比較対象の土壌量が変化するため、対象の物質量的変化が把握できない場合にはESM法が用いられる²⁾。本研究における森林と農地の土壌炭素量比較においては、土地利用変化による深さあたりの土壌量が変化することが想定されたため、ESM法で比較した。基準の土壌量は農地の深さ30cmまでの土壌量（各サイト $n=6$ 、土壌炭素量を除く）の平均値とした。森林・農地ともにこの重量になる深さを計算し（ $n=12$ ）、その深さまでの土壌炭素量を従来法と同様の累積土壌炭素量（tC/ha）として算出した。

(2) 土壌炭素モデルの構築

土地利用変化後の経過年数にしたがって土壌炭素量の変化を推定することが可能なモデルを構築した。本モデルは、農地で現在使用されているRothCモデルと、森林で使用されているCENTURYモデルの2つのモデルをベースにして構築した。モデルの構築方法および結果、考察については、森林から農地への転用および農地から森林への転用どちらも共通して取り扱うため、サブテーマ5に一括して記載する。

4. 結果及び考察

(1) 土地利用変化の実態

グリッド調査データや衛星データなどから原則として40年以内に農地から森林（AR）（一部、森林から農地（D））への土地利用変化が確認された場所を表(2)-1のとおり全国で165か所選定した。ARおよびDの内訳は表(2)-2のとおりである。なお、2つの表の調査点数はサブテーマ2から5で実施したものの全てを合わせたものである。

表(2)-1 地方別調査地点数

	調査点数	適地点数
北海道	14	11
東北	64	24
関東	34	13
関西/中国	38	4
四国	6	6
九州	9	5
合計	165	58

表(2)-2 AR/D別調査点数

	AR	D
北海道	12	2
東北	38	26
関東	22	12
関西/中国	27	11
四国	6	0
九州	7	2
合計	112	53

これらの調査地点の地理的分布を把握するため、1989末から2013年にかけて我が国のARと判定された点数（平成26年度森林吸収源インベントリー情報整備事業（衛星画像等による土地利用変化状況調査）報告書（林野庁）および同平成25年度報告書）に占める割合を表(2)-3に示した。

表(2)-3 各調査地点の地域別実施率

	衛星点数	調査点数	実施率 (%)
北海道	185	12	6
東北	361	38	11
関東・東 海・甲信越	463	22	5
近畿・中国	248	27	11
四国	134	6	4
九州	295	7	2

表(2)-3より、各地域での調査実施率は2-11%であり大きなばらつきが認められ、特に西日本における調査点数が少なかった。しかし、地域的に大きな偏りはなく、全国を代表する調査地を確保できたといえる。

これらの地点の下見調査を行った結果、農地から森林になった場所では単に放棄されて植生が回復した場所よりも植林活動が行われた地点の方が多かった（表(2)-4）。森林に転用する前の農地種別は畑地が最も多く、次いで水田であった（表(2)-5）。

表(2)-4 調査地点の森林化の要因

地域	植林	耕作放棄	その他	総計
北海道	6	3	3	12
東北	18	11	9	38
関東	19	1	2	22
関西	12	7	8	27
四国	6			6
九州	6	1		7
合計	67	23	22	112

また、北海道ではカラマツが、本州ではスギ・ヒノキが多く植栽樹種として選定されていた。放棄された場所で植生が回復しているケースでは、ニセアカシアが多く見られた。

表(2)-5 調査地点の森林化前の農地種別

対照地	北海道	東北	関東	関西	四国	九州	総計
水田	1	6	8	4	6	3	28

畑地	9	14	9	8	2	42
草地	1	1	1		1	4
樹園地		1	2	2	1	6
未到達	1	16	2	13		32
合計	12	38	22	27	6	112

農地から森林に土地利用が変化した場合の具体的な要因やどのような農地が森林に転用されたかについてのデータはほとんどないため、これらの結果はここ30年ほどの土地利用変化の傾向を把握した貴重なデータである。

(2) ESM法と従来法の比較

(1) によって選定された地点のうち、調査適地と判定され、かつ土壌採取の許可が得られて土壌試料を採取した地点は31地点であった。これらの調査地点の位置および各種基礎データを表(2)-6に示す。

森林への転用からの経過年数は1-55年と幅広く、平均で34年であった。各地点の土壌炭素蓄積量の計算例を表(2)-7に示す。

まず、農地の深さ30cmまでの層別土壌量を計算し、その平均値を算出する(例の場合、1858Mg/ha)。さらに、この重量になるような深さを各断面別に計算し(表中の「補正深さ」、その深さまでの炭素量をESM法による炭素量(補正深さ)として計算した。また、深さ30cmまでの土壌炭素量を炭素量(深さ30cm)として計算した。森林の補正深さは最小値で25cm、最大で47cmとなり、平均33cm、中央値34cmであった。このことから、森林に転用することにより、深さあたりの重量は減少することが推測される。なお、HKD-AR08サイトについては、農地の断面に多く含まれる礫が森林の断面では観察されなかったことから、農地と森林の転用前の農地が全く異なる利用をされていたと考えられたため、今回の解析からは除外した。

この方法を用いて各調査地点の土壌炭素量を計算した結果を表(2)-8に示す。農地の炭素量

(30cm)は18.3-208.5 tC/ha(平均値75.7 tC/ha)であったが、森林(深さ30cm)では15.3-209.8 tC/ha(平均値76.2 tC/ha)であった。これをESM法で評価すると農地では18.5-214.1 tC/ha(平均値76.2 tC/ha)であったが、森林では14.7-278.0 tC/ha(平均値82.7 tC/ha)であった。ESM法では同じ土壌量に換算するため、評価する森林の深さが深くなっており、この影響により土壌炭素量が8%ほど大きく評価された。

農地と森林の土壌炭素量比率(以下、土地利用変化係数、森林の土壌炭素蓄積量を農地の土壌炭素蓄積量で除した値)は、深さ30cmまでの比較では平均値で0.98となり、農地の方が森林よりも多くの炭素を蓄積していることを示した。しかし、ESM法による比較では平均値で1.09となり、森林の方が農地よりも多くの炭素を蓄積している結果となった。従来から、農地から森林への転用によって土壌炭素量は増加すると考えられているため、ESM法の方がより信頼性が高く、土地利用変化係数を算定するのに適していると考えられる。

表(2)-6 調査地一覧

地方	Site ID	住所	緯度 (°)	経度 (°)	土壌群	変化前 (対照地)	変化後	転用後 年数 (年)
北海道	HKD-AR01	北海道芦別市	43.61	142.18	褐色森林土	ソバ	トドマツ人工林	43
北海道	HKD-AR02	北海道夕張郡 栗山町雨煙別	43.08	141.85	黒色土	馬鈴薯、麦、豆	カラマツ人工林	45
北海道	HKD-AR03	北海道札幌市 豊平区	42.99	141.39	黒色土	トウモロコシ・大 豆・ひまわり	トドマツ, エゾマ ツ, アカエゾマツ など	1
北海道	HKD-AR06	北海道夕張郡 栗山町北学田	43.07	141.85	黒色土	バレイショ・麦・ 豆	トドマツ人工林	24
北海道	HKD-AR07	北海道夕張郡 栗山町継立	43.03	141.87	褐色森林土	麦	カラマツ人工林	55
北海道	HKD-AR08	北海道夕張郡 栗山町桜山	43.07	141.86	黒色土	馬鈴薯、麦、大豆	カラマツ人工林	48
北海道	HKD-AR09	北海道上川郡 下川町班溪	44.24	142.62	褐色森林土	燕麦、じゃがいも など	トドマツ人工林	51
北海道	HKD-AR10	北海道中川郡 美深町	44.55	142.59	褐色森林土	ひまわり, じゃが いも, 牛放牧	シラカンバ二次林	20
北海道	HKD-AR11	北海道上川郡 下川町珊瑚	44.42	142.7	造成土	牧草地	ヤナギ超短伐期試 験林	8
東北	THK-AR01	秋田県秋田市	39.49	140.27	褐色森林土	耕作放棄水田	スギ人工林	15
東北	THK-AR02	秋田県鹿角郡 小坂町	40.33	140.78	黒色土	畑 (野菜)	ニセアカシア	15
東北	THK-AR04	宮城県栗原市 一迫	38.75	140.9	不明	畑	スギ林	40
東北	THK-AR07	山形県西村山 郡西川町	38.45	140.1	不明	棚田	雑木	40
東北	THK-AR08	山形県鶴岡市	38.73	139.97	不明	水田	スギ林	40
関東	KNT-AR01	茨城県小美玉 市	36.27	140.34	黒色土	ソバ畑	ヒノキ人工林	20
関東	KNT-AR06	静岡県湖西市	34.76	137.51	褐色森林土	ミカン畑	常緑広葉樹二次林	35
関東	KNT-AR08	富山県氷見市 仏生寺	36.78	136.91	褐色森林土	金時豆	スギ人工林	38
関西	KAS-AR01	兵庫県宍粟市 山崎町	35.05	134.49	褐色森林土	水田	スギ人工林	28
関西	KAS-AR02	福井県あわら 市	36.25	136.27	グライ土	水田	スギ人工林	25
関西	KAS-AR03	福井県福井市 東平	36.07	136.13	褐色森林土	水田	スギ人工林	33
四国	SKK-AR01	高知県土佐郡 土佐町	33.71	133.55	褐色森林土	水田	スギ・ヒノキ人工 林	39
四国	SKK-AR02	高知県土佐郡 土佐町	33.71	133.55	褐色森林土	水田	スギ・ヒノキ人工 林	40
四国	SKK-AR03	高知県土佐郡 土佐町	33.71	133.57	褐色森林土	水田	スギ人工林	46
四国	SKK-AR04	高知県土佐郡 土佐町	33.71	133.57	褐色森林土	水田	スギ人工林	46
四国	SKK-AR05	高知県土佐郡 土佐町	33.7	133.57	褐色森林土	水田	スギ人工林	46
四国	SKK-AR06	高知県土佐郡 土佐町	33.7	133.57	褐色森林土	水田	ヒノキ人工林	50
九州	KYS-AR01	福岡県八女市 矢部村	33.19	130.81	褐色森林土	水田	スギ人工林	20
九州	KYS-AR02	熊本県熊本市 中央区	32.82	130.74	褐色森林土	草地	アカメガシワ・ク サギ	1
九州	KYS-AR03	大分県竹田市 久住町	33.04	131.28	黒色土	トウモロコシ畑	ヒノキ人工林	43
九州	KYS-AR04	宮崎県都城市	31.67	131.07	褐色森林土	休耕地 (5年)	スギ人工林	55
九州	KYS-AR05	佐賀県佐賀市 大和町	33.29	130.26	褐色森林土	草地	スギ人工林	40

表(2)-7 土壤炭素量計算の一例 (KNT-AR01の場合)

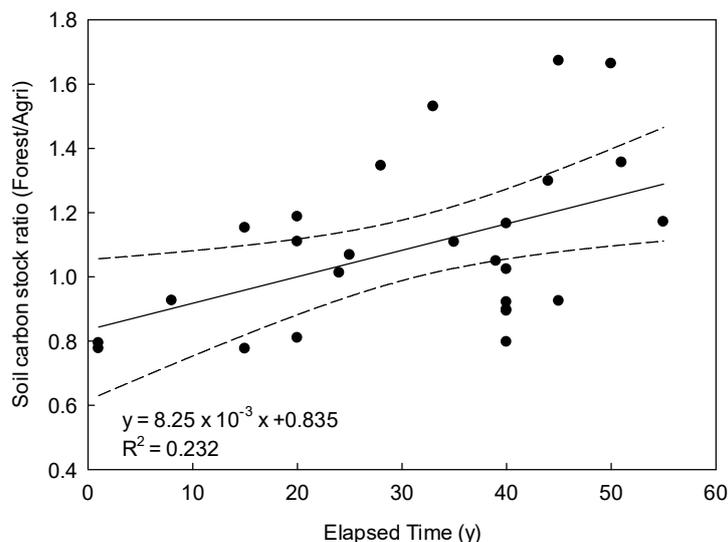
土地利用	断面番号	層位	深さ	深さ	容積重	礫率	細土容積重	炭素濃度	層別土壌量 (深さ30cm)	土壌量 (深さ30cm)	補正深さ	層別炭素量 (深さ30cm)	炭素量 (深さ30cm)	層別炭素量 (補正深さ)	炭素量 (補正深さ)	リン酸吸収係数	mgP2O5/10g乾土
			(上部)	(下部)													
農地	No.1	C1R1	0	17	0.62	0	0.620	44.9	972				47.3		47.3		2041
		C1R2	17	30	0.78	0	0.780	44.2	937	1909	29	44.8	92.1	42.4	89.7	2092	
	No.2	C1L1	0	17	0.63	0	0.630	45.9	986				49.1		49.1		
		C1L2	17	30	0.82	0	0.820	43.1	987	1973	28	45.9	95.0	40.6	89.7		
	No.3	C2R1	0	20	0.63	0	0.630	44.8	1163				56.5		56.5		
		C2R2	20	30	0.72	0	0.720	41.7	668	1831	30	30.0	86.5	31.3	87.7		
	No.4	C2L1	0	20	0.60	0	0.600	44.8	1107				53.7		53.7		
		C2L2	20	30	0.73	0	0.730	42.8	676	1783	31	31.2	85.0	34.7	88.4		
	No.5	C3R1	0	20	0.59	0	0.590	47.5	1083				56.1		56.1		
		C3R2	20	30	0.81	0	0.810	43.9	749	1832	30	35.6	91.7	36.8	92.9		
	No.6	C3L1	0	20	0.60	0	0.600	47.0	1103				56.4		56.4		
		C3L2	20	30	0.78	0	0.780	45.1	719	1822	31	35.2	91.6	37.0	93.4		
農地平均										1858	30		90.3		90.3		
森林	No.7	F1R1	0	10	0.36	0	0.355	61.8	317				21.9		21.9		2513
		F1R2	10	27.5	0.59	0	0.589	49.2	943				50.7		50.7		2421
		F1R3	27.5	40	0.60	0	0.599	27.4	143	1403	38	4.1	76.7	17.2	89.8	2583	
	No.8	F1L1	0	10	0.51	0	0.510	60.5	457				30.8		30.8		2586
		F1L2	10	27.5	0.60	0	0.605	48.6	970				51.5		51.5		2349
		F1L3	27.5	40	0.52	0	0.522	29.1	124	1550	36	3.8	86.1	13.2	95.5	2526	
	No.9	F2R1	0	10	0.47	0	0.473	85.8	403				40.6		40.6		2360
		F2R2	10	30	0.55	0	0.545	51.0	994				55.6		55.6		2361
		F2R3	30	40	0.49	0	0.492	33.6	0	1398	40	0.0	96.2	16.5	112.7	2444	
	No.10	F2L1	0	10	0.33	0	0.330	66.4	292				21.9		21.9		2362
		F2L2	10	30	0.55	0	0.547	49.8	1000				54.5		54.5		2315
		F2L3	30	40	0.46	0	0.457	34.0	0	1291	43	0.0	76.3	20.5	96.8	2387	
	No.11	F3R1	0	10.5	0.53	0	0.531	64.9	495				36.1		36.1		2456
		F3R2	10.5	25.5	0.60	0	0.605	55.2	821				50.0		50.0		2349
		F3R3	25.5	40	0.58	0	0.581	30.3	248	1563	35	7.9	94.1	17.3	103.5	2469	
No.12	F3L1	0	10.5	0.48	0	0.477	66.4	443				33.3		33.3		2338	
	F3L2	10.5	25.5	0.62	0	0.623	55.4	845				51.7		51.7		2359	
	F3L3	25.5	40	0.54	0	0.542	29.8	231	1519	37	7.3	92.2	17.9	102.9	2398		
森林平均										1454	39		86.9		100.2		

表(2)-8 各地点の土壤炭素蓄積量と土地利用変化係数

地点	農地		森林		土地利用変化係数	
	30cm	補正深さ	30cm	補正深さ	30cm	補正深さ
HKD-AR1	48.8	48.7	77.6	81.5	1.59	1.67
HKD-AR2	109.0	108.8	101.2	100.6	0.93	0.92
HKD-AR3	92.7	92.7	78.0	72.0	0.84	0.78
HKD-AR6	132.3	132.9	119.7	134.5	0.91	1.01
HKD-AR7	74.5	74.5	79.1	87.2	1.06	1.17
HKD-AR9	57.3	57.7	71.9	78.2	1.25	1.36
HKD-AR10	85.1	85.2	58.1	69.0	0.68	0.81
HKD-AR11	109.3	109.5	89.8	101.4	0.82	0.93
THK-AR1	63.3	63.3	56.5	49.1	0.89	0.78
THK-AR2	104.7	106.3	107.4	122.5	1.03	1.15
THK-AR4	85.9	98.8	85.9	91.0	1.00	0.92
THK-AR7	49.3	43.2	49.1	38.8	0.99	0.90
THK-AR8	66.6	62.5	66.1	63.9	0.99	1.02
KNT-AR1	90.3	90.3	86.9	100.2	0.96	1.11
KNT-AR6	38.5	34.7	27.0	38.5	0.70	1.11
KNT-AR8	63.5	63.6	72.8	74.2	1.15	1.17
KAS-AR1	38.2	38.2	43.3	51.4	1.13	1.35
KAS-AR2	56.3	56.4	50.4	60.2	0.89	1.07
KAS-AR3	59.3	65.2	59.3	90.7	1.00	1.39
SKK-AR1	58.8	59.0	57.6	61.9	0.98	1.05
SKK-AR2	58.8	59.0	49.2	52.7	0.84	0.89
KYS-AR1	71.4	71.3	79.0	84.6	1.11	1.19
KYS-AR2	66.6	67.2	50.1	53.3	0.75	0.79
KYS-AR3	208.5	214.1	209.8	278.0	1.01	1.30
KYS-AR4	59.6	59.7	70.2	99.4	1.18	1.66
KYS-AR5	18.3	18.5	15.3	14.7	0.84	0.80

(3) ESM法による土地利用変化後の土壌炭素量変化の評価

各調査地点の土地利用変化係数と森林への転用後の年数の関係を図(2)-2に示す。

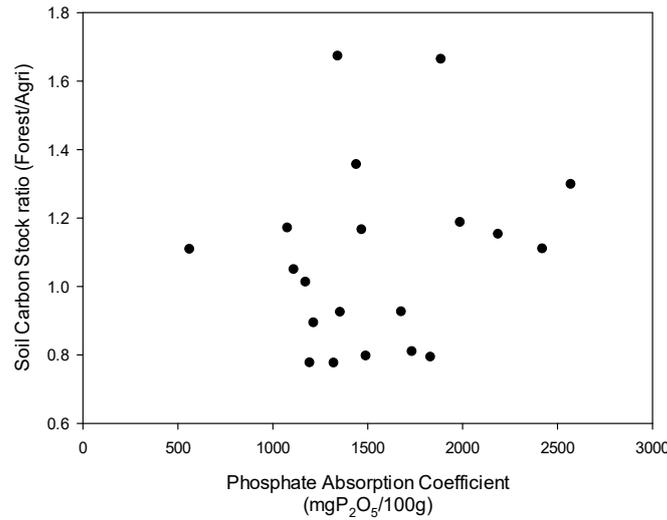


図(2)-2 森林への転用後の年数と土地利用変化係数の関係

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ことが明らかになった。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、転用時に伐根など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かった。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り、土地利用変化に伴う土壌炭素量変化が転用後どれくらいの期間で安定するのかを本研究では明らかにできなかった。

国家インベントリー報告において、農地から森林への転用あるいは森林から農地への転用に関する土壌炭素量の変化は、IPCCのGood Practice GuidanceのTier1にしたがい20年で安定すると仮定して計算を行った。この20年は主として森林から農地への転用時の安定期間をもとに設定されていると考えられるが、本研究の結果から、農地から森林への転用時においては20年よりも長い期間を設定することで精度の高い推定できると考えられる。

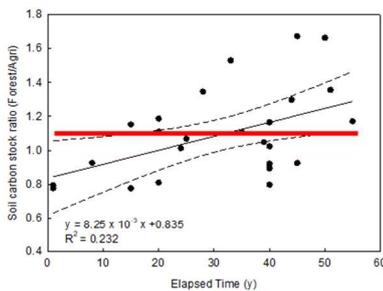
リン酸吸収係数と土地利用変化係数の関係は明瞭ではなかった（図(2)-3）。実験計画時には土壌炭素蓄積能力の高い火山灰土壌では炭素蓄積速度が大きいため、土地利用変化係数とリン酸吸収係数との相関が強いと考えていたが、この結果は炭素蓄積能力が土地利用変化後の支配的な要因とはならないことを示唆している。しかしながら、農地土壌のモデルではリン酸吸収係数と炭素蓄積速度に関係があることを利用していることから、本研究では各サイトにおける炭素供給速度や環境要因の違いによる差が大きく、火山灰の有無による違いが明瞭に表れなかったと考えられる。リン酸吸収係数の影響については、サブテーマ5のモデルの項で評価する。



図(2)-3 リン酸吸収係数と土地利用変化係数の関係

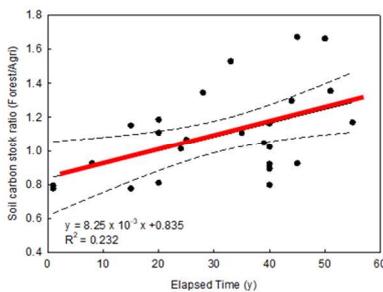
(4) 国家インベントリー報告における方法論への提示
 これらの結果を考慮して、国別土地利用変化係数 (Tier2) として下記の3種類を提案する (図(2)-4)。

土地利用変化係数 (F_{LU}) に3つの提案



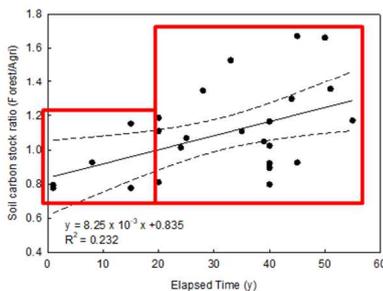
パターン1
 全部の平均を取る

$F_{LU} = 1.09$



パターン2
 回帰式をそのまま適用する

$F_{LU} = 8.25 \times 10^{-3} \cdot D + 0.835$



パターン3
 経過年数を分けて適用

$D < 20$
 $F_{LU} = 0.88$
 $20 \leq D$
 $F_{LU} = 1.14$

図(2)-4 国別土地利用変化係数の提案
 F_{LU} は土地利用変化係数、 D は経過年数を表している。

パターン1は、経過年数を考慮せず、今回の結果を一括して取り扱うものである。この場合の土地利用変化係数の値は1.09となる。このパターンでは、転用前の農地の炭素蓄積量が決めれば、転用後の最終的な炭素蓄積量が決まり、その炭素蓄積量に向けて毎年一定の速度で変化していく計算となる。

パターン2は、得られた回帰式をそのまま利用し、経過年数ごとに回帰式から変化係数を計算する方法である。このパターンでは、転用前の農地の炭素蓄積量に応じて森林への転用直後に炭素量が減少するが、その後毎年一定の速度で炭素蓄積量が増加していくことになる。

パターン3は、経過年数20年を境にして土地利用変化係数の値を変える方法である。この場合、経過年数20年未満の期間には0.88を、20年以上の期間には1.14を適用する。このパターンでは、経過年数20年までは転用後の森林での土壌炭素量は減少し、その後増加に転じる計算になる（なお、経過年数40年を境界として区分した場合、20-40年では1.14、40年以上では1.15となりほとんど差がないため、20年以上は一括して計算した）。

すべてのパターンにおいて、最終的に何年経過すると土壌炭素量は一定になるかという数値を設定しないと、パターン2では永久に増加し、パターン1および3では1年あたりに増加する炭素量を計算できない。土壌炭素量が安定するまでの経過年数は本研究では明らかにできなかったが、今回の対象転用年数が60年以下となっていることから、一つの目安としては60年が挙げられる。しかし、この設定値については今後検討する余地がある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまで科学的根拠がなかった、農地から森林への土地利用変化時の土壌炭素蓄積量変化について、初めて全国的な調査による実態把握と根拠のある数値を提示することができた。これにより、国家インベントリー報告の透明性の向上に向けた方法論の改良が可能になる。また、ESM法を導入することにより適正な評価が得られる結果となり、今後Good Practice Guidance 2019 Refinementに沿った本方法を用いた係数の算出が主流となると考えられる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

NIRにおける、土地利用変化時の土壌炭素蓄積量変化について、IPCC Good Practice Guidance 2019 Refinementに沿った方法論への改訂が見込まれる。本研究によって方法論が提案されることについては、平成30年度環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会の優先検討事項として取り上げられている。

土地利用変化に対応したサンプリング方法を確立

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 鳥山淳平ら：九州森林研究，72，91-93，（2019）農耕地への植林に伴う土壌炭素蓄積量の変化

-八女，竹田，都城の事例-

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 森下智陽ら：日本土壌肥料学会東北支部大会（2017）「東北地方における土地利用変化による土壌炭素蓄積量の変化(速報)－秋田県における調査事例と今後の研究展開－」
- 2) 白戸康人ら：日本土壌肥料学会2017年仙台大会（2017）「林地から農地への土地利用変化が表層30cmの土壌炭素量に及ぼす影響～Equivalent Soil Mass法による評価～」
- 3) 片柳薫子ら：日本土壌肥料学会2017年仙台大会（2017）「森林－農地間の土地利用変化による土壌炭素蓄積量変化をプロセスモデルで予測する」
- 4) 酒井寿夫：応用森林学会大会（2017）「棚田跡地に植林されたヒノキ・スギ混交林における土壌炭素蓄積速度の推定について」
- 5) 鶴田健二(森林総研PD)ら：日本森林学会大会（2018）「森林と農地間の土地利用変化が土壌炭素量に及ぼす影響－モデル構築と検証－」
- 6) 石塚成宏、金子真司、鶴田健二(森林総研PD)、橋本昌司ら：（2018）「農地から森林への土地利用変化が土壌炭素量に与える影響－観測結果－」.
- 7) 石塚成宏ら：日本森林学会（2019）「農地から森林への土地利用変化が土壌炭素量に与える影響－続報－」
- 8) 鶴田健二(森林総研PD)ら：日本森林学会（2019）「森林と農地間の土地利用変化に伴う土壌炭素量の変化予測」

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 2018年7月28日（土）「森林総合研究所 夏の一般公開開催」において、来訪者に対して本プロジェクトに関する資料を配布（添付）し説明
- 2) 2018年11月6日（火）「JCOAL技術者セミナー・多様な炭素固定技術」において、「土壌における炭素隔離は制御可能か？」という演題で石炭エネルギー関係者に対して講演。
- 3) 2018年10月27日（土）「森林総合研究所四国支所一般公開」のミニ講演会において、「田んぼに木を植えたら土はどう変わる？」という演題で講演。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

IPCC Good Practice Guidance 2019 Refinementの土地利用変化係数の算出の項目に対し、ESM法導入に関するBOX記事を提供し、採用された。

8. 引用文献

- 1) 土壌環境分析法編集委員会編：土壌環境分析法、博友社、262-264、(1997)
リン酸吸収係数
- 2) Toriyama, J, Kato, T, Siregar, CA, Siringoringo, HH, Ohta, S & Kiyono, Y: For. Ecol.

Manage., 262(9), 1659-1667 (2011)

Comparison of depth- and mass-based approaches for estimating changes in forest soil carbon stocks: A case study in young plantations and secondary forests in West Java, Indonesia.

II-3 北日本における森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素量変化の解明

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター

大規模畑作研究領域 気象情報利用グループ	下田 星児
大規模畑作研究領域 ICT農業グループ	若林 勝史（平成28～29年度）
大規模畑作研究領域 ICT農業グループ	輿水 美奈

平成28～30年度累計予算額：18,438千円

（うち平成28年度：6,250千円、平成29年度：6,250千円、平成30年度：5,938千円）

累計予算額は、間接経費を含む。

【要旨】

北海道を中心とする北日本において、森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素量変化を明らかにするため、3年間で黒ボク土系と非黒ボク土系を合わせて10カ所の調査地点を対象に、森林から農地への土地利用変化が起こった農地およびそれに隣接する森林の土壌炭素量を現地調査し、両者を換算する係数を導いた。気候、土壌タイプに加えて、農地造成の方法などの情報も収集し、換算係数との関係を明らかにした。

土壌特性と機能は農地利用の変化によって劇的に変化する。しかし、特に寒く湿気の多い地域では、生態系の資源とその分配が農地利用のための森林伐採によってどのように変化するかについてはほとんどわかっていない。本研究では、ペアサンプリングを用いて、農業開発が畑作地の土壌炭素プールの経時変化にどのように影響するかを調べた。北日本の湿潤多湿気候下での同じ作物輪作を用いて、対照林と農業開発区の10対のプロット（農地転用後2年から80年以上）を選択した。我々は、平地条件下での農地開発の最初の2年間に土壌炭素量の純増加を検出した。この土壌炭素量の増加は、作物作付け時の植物残渣由来の炭素を表す、軽質画分の土壌炭素量の増加によって引き起こされた。農業開発後に堆肥を施用しない場合には、土壌炭素量は減少する傾向にあった。農地開発に伴う炭素量の変化に関しては、土壌の種類や堆肥施用量による違いはみられなかった。これらの結果から、農業開発は土壌炭素蓄積量の緩やかな減少をもたらすことが明らかになった。北海道のような冷涼地域では、炭素分解速度が遅いことも炭素量の減少が緩やかになる原因と考えられる。冷涼地帯における土地利用変化が土壌炭素量に与える影響を調べた事例はほとんどなく、世界的に貴重な結果である。

【キーワード】

北日本、土地利用変化、土壌炭素量、堆肥施用、排出強度

1. はじめに

土地利用の変化は、化石燃料に次いで人為的炭素排出量に影響を及ぼす大きな要因とされている。森林から農地への転用は、土壌プロセスと土壌特性の著しい変化、ひいては土壌炭素量の変化をもたらす。農耕地の使用は、慣行となる耕起作業が有機物の分解を促進することにより土壌の好気性プロセスを促進し、土壌炭素蓄積のメカニズムを破壊する可能性がある。さらに、農地では、作物収穫による炭素の損失があるため、森林などの他の土地利用と比較して、有機炭素含有量が減少すると考えられている。いくつかの研究は、森林から農地への転用は、土壌有機炭素蓄積を減少させることを示している。地球規模のメタ解析からは、原生林から農業開発への土地利用変化が土壌炭素量を42%減少させることが報告されている¹⁾。また、土壌炭素の含有量は25-50%減少するとの報告もある²⁾。しかし、ほとんどの前例研究は、広域のデータベースに記録されている土地利用変化とその地点の土壌炭素量を、土地利用ごとに合計した値で評価しているため、多くの総炭素排出量の推定値は不確実である。日本においても、現在の国家インベントリー報告では、森林から普通畑に変化した場合に土壌炭素量がわずかに増加する計算方法を採用しているため、森林から農地への変化が起きた場所を特定して、調査地点での計測を

行い、評価方法の修正を示す必要がある。土地利用の変化後の炭素蓄積量の空間分布に関する決定的な証拠となるデータは限られている。

以前の研究は、主に世界各地での水不足や土壌肥沃度の低さによる比較的生産性の低い地域における農業開発に焦点を当てており、北日本のような寒冷多湿気候下の生態系での炭素資源とその分配が農地利用に伴う森林減少によってどのように変化するかについてはほとんど知見がない。北海道東部に位置する十勝地方では、夏は比較的涼しい気候のため、小麦やじゃがいもなどの涼しい作物が栽培されている。十勝地方の小麦やジャガイモの生産量は、日本の年間生産量の4分の1以上を占めている。19世紀後半には、十勝地方のほとんどの地域が森林に覆われていたが、開拓により農業用に開発された。1960年代後半になって、防風林としての使用のために、原生林である広葉林のカシワ (*Quercus dentata*) 森林が針葉樹林のカラマツ (*Larix kaempferi*) に置き換えられた。これら農地管理の改善は、この地域の作物の生産性と農家の収入を向上させた。近年は、十勝地方は日本有数の大規模で高収益の農業地帯となっており、現在も、防風林の一部は農地に転用されている。世界の最近の研究の多くは、放棄地への土地利用の変化に伴う土壌炭素量の変化に焦点を当てている。十勝地方の耕地面積は、2007年から2017年にかけて253,710haから254,520haへと増加した(表(3)-1)。耕地面積が増加傾向にある地域は、世界でも珍しい。北海道東部における調査は、現在の気候条件下における農業開発に伴う土壌炭素量の変化を評価できる、貴重な研究対象地である。

表(3)-1 北海道十勝振興局管内の市町村の耕地面積の変化(農林水産省統計より)

市町村名	耕地面積 (ha)		
	2007年	2017年	増減
帯広市	22,900	23,000	△ 100
音更町	23,900	23,900	△ 0
士幌町	15,900	16,000	△ 100
上士幌町	11,200	11,200	△ 0
鹿追町	12,200	12,200	△ 0
新得町	6,530	6,470	▲ 60
清水町	14,800	15,000	△ 200
芽室町	21,300	21,400	△ 100
中札内村	7,140	7,180	△ 40
更別村	11,500	11,600	△ 100
大樹町	14,200	14,100	▲ 100
広尾町	6,210	6,190	▲ 20
幕別町	22,500	22,600	△ 100
池田町	9,170	9,230	△ 60
豊頃町	11,500	11,600	△ 100
本別町	12,000	12,100	△ 100
足寄町	13,400	13,400	△ 0
陸別町	6,060	5,970	▲ 90
浦幌町	11,300	11,400	△ 100
十勝管内合計	253,710	254,540	△ 830

2. 研究開発目的

本課題の目的は、寒冷多湿地域における耕作中の農地利用のための森林伐採による土壌炭素量の変化を決定することである。本課題では、農業開発が土壌炭素の急速な好氣的分解を促進し生態系炭素資源を絶えず減少させる一方、継続的な堆肥施用と作物残渣投入により土壌炭素蓄積を強化すると仮定した。この仮説を検証するために、ペアプロットの1つが初期条件を表すと仮定する、ペアサンプリングによる実験設計を使用した。この手法は農業開発に伴う時間変化を代表することが可能で、異なる土壌タイプ、期間での土壌炭素量の時間変化を迅速に評価することができる。寒冷多湿地域である北日本の中で、農地開発年数が短い地点を選択できる北海道東部において、土地利用変化に伴う土壌炭素量の変

化を評価した。

3. 研究開発方法

北海道を中心とする北日本を対象地域とし、グリッド調査データと航空写真による判別にもとづき、森林から農地への土地利用変化が起こった場所の把握と調査地の選定、調査許可の取得、サンプル採取と分析、の順で現地調査を行う。土地転用後の経過年数の時系列で解析ができるように調査地点を選定した。土壌タイプや土地利用変化を考慮し経過年数別に10点程度を特定した。そのうちの数カ所ですべて従来法およびEquivalent Soil Mass法（ESM法）で土壌を採取し分析を行った。調査地点数が揃った段階で、森林と農地の土地利用変化前後の土壌炭素量を比較し、両者を換算する係数を導いた。最終的に、北日本の森林から農地への土地利用変化が生じた際の土壌炭素量変化の係数を、土壌タイプなどでグループ分けし提示した。

3. 1 調査概要

この調査は、現在我が国の主要な大規模畑作農業地帯である十勝地方で行った。十勝地域の典型的な作付体系は、ジャガイモ (*Solanum tuberosum* L.)、秋まき小麦 (*Triticum aestivum* L.)、テンサイ (*Beta vulgaris* L.) および大豆 (*Glycine max* L.) などの輪作である。十勝地方の中央に位置する北海道農業研究センター芽室研究拠点実験ステーション (42° 530' N、143° 050' E) の年間平均気温と降雨量はそれぞれ6.1°Cと888 mmである。十勝地方の北部と南部において、歴史的な資料にもとづき、過去100年以内に農地が開発されたと考えられる地域を中心に調査を行った。北海道では、1970年から2002年にかけての土地改良事業により、土壌排水性の悪い地域には排水管が設置されている農地が多い。本調査では、地下水流が極端に変化した場所を除外し、排水管となる暗渠管が設置されていない農地を対象にした。

農業開発後の土壌炭素量の経時的な変化を評価するために、隣接した2地点を比較するpaired-plot approach（隣接ペア比較法）を使用した。既往研究で隣接ペア比較法を用いて土地の転用によって土壌炭素蓄積量が増加することが示されていることから、この手法を採用した。厳密には、多地点を同一の時間軸において経時変化を見ることは適当であるとはいえない。しかし、この比較的小さいプロットサイズにおける隣接ペア比較法は、高い地形学および土壌学的不均一性をもつプロットであっても、相対比較が可能なプロットが得られるとされ、土壌炭素量の変化を簡易的に評価するために用いられる手法である。本課題では、土地利用の比較による農地開発の影響を有効的に評価し、土壌侵食や土壌特性の不均一性の影響を回避するために、隣接する平坦な土地をもつプロットのペアを選択した。防風林 (F) と農地 (AD) の境界から約10 mの箇所を、それぞれ3反復でサンプリングした。国土交通省の地図空中写真閲覧サービス（現在のURL: <https://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do>）から、開発年代を特定した。また、20年以内に農地開発が行われたプロットでは、Google Earth 7.3.2 (Google Corporation 2013) による航空写真も、農地開発が行われた時期の検証に利用した。開発からの経過時間は、最初の農地開発が観察される写真の日付と防風林であった時点の写真の日付の中間点から年単位で推定し、推定農地開発後年とした。すなわち、農地開発後年数は、調査日から推定農地開発後年を引いたものとなる。

農地と防風林が隣接する7つの地点の10の対になった場所で詳細な調査を行った(図(3)-1)。農地開発後の年数は2-80年以上であり、土壌タイプは火山灰土壌が4地点、低地土が3地点であった(表(3)-2)。調査地域の大部分は火山性テフラの影響を受けており、土壌の母材は火山灰層であった。また、低地土に分類される場所は沖積層であり、河川や小川によって運ばれた土壌が堆積していると考えられる。開発前の初期の土壌の物理的および化学的性質は、森林 (F) と農地 (AD) で同じであると仮定した。また、湿潤で多くの土壌炭素を蓄積する畑における閉鎖灌漑は土壌中の有機炭素量を容易に減少させるため、灌漑設備がある圃場は選定しないこととした。聴き取り調査により、客土による外部からの土壌投入がないことについて確認したが、調査地点の土壌のリン酸吸収係数を比較することでも確認した(表(3)-3)。林地番号3の農地開発後30年の地点のリン酸吸収係数がやや低い傾向であったものの、

林地—農地の差は小さく、外部からの土壌投入の可能性は低いとして、以後の土壌分析・データ解析を行った。また、調査地点の土壌環境条件を計測するため、許可の得られた農地、または付近の農地において、作付が開始される5月までの期間で土壌水分センサー(METER社、5TE)を用いて地温・土壌水分を計測し、データロガー(METER社、Em50)で2時間ごとのデータを記録した。

表(3)-2. 調査地点の概要



図(3)-1. 調査地点位置と土壌タイプ

丸で囲まれた数字は表(3)-2で示された林地番号を示している。茶色が黒ボク土、水色が低地土を示している。

林地番号	緯度 N	経度 E	樹種	土壌タイプ	農地開発後年数
1	43.16	143.02	シラカバ	普通黒ボク土	>80
2	43.08	142.96	カラマツ	多湿黒ボク土	50
3	43.08	142.96	ヤチダモ	多湿黒ボク土	30, >80
4	43.16	143.04	カラマツ	淡色黒ボク土	10, 43
5	42.65	143.14	カラマツ	褐色低地土	2, >80
6	42.69	143.19	カラマツ	褐色低地土	42
7	42.70	143.22	カシワ・シラカバ混合	褐色低地土	37

表(3)-3. 調査地点のリン酸吸収係数

林地番号	リン酸吸収係数	
	森林	農地
1	1673	1735
2	1518	1660
3	1887	1328, 1778
4	1600	1870, 1594
5	1040	1070, 899
6	781	627

3. 2 土壌炭素評価手法

下層は砂利層である地点が多く、有効土壌層の厚さは一様ではなかった。一般に十勝地方の農地の有効耕作深度は約0.30 mと認識されているため、土壌炭素量を評価する農地土壌の厚さは0.30mを標準とした。2016年から2018年の各年で小麦の収穫直前（8月中旬から9月まで）に土壌プロファイルを調査し、各地点の各断面で礫層もしくは粘土層の上端から地上部までを記述した。シャベルで礫層・粘土層までピットを掘り、土壌のサンプルを採集した。土層ごとに土壌を採取し、一定重量になるまで風乾して、土壌炭素やその他の化学分析に用いた。土壌の体積密度を計量するために、コアサンプルを土壌分析用とは別に採取し、炉乾燥質量としてコアの体積（100 mL）から体積密度を計算した。

各土壌層に蓄積されている炭素量は、次に記載するように評価した。炭素含有率は、NC分析計（Sumigraph NC-22; 住化分析サービス社、東京、日本）を用いて乾式燃焼法により測定した。各土壌層の炭素プール（Mg /ha）は、単純な密度法の代わりに最小等価土壌質量（ESM）を用いた手法で計算した。農業機械の導入に伴う土壌の圧密や締固めによる変化を説明するために、炭素含有量は体積ベースで報告する。軽質画分（LF）の土壌炭素は、主に鉱物粒子とは関係のない植物残渣の部分的に分解された断片で構成されているため、土壌品質の指標として使用した。土壌の軽画分は、農業開発時の初期植物残渣関連する炭素含有量の変化を強調して示すことができる。ポリタングステンナトリウム重液と一緒に機械的に振とうして軽画分を分離し、腐敗している植物の落葉などを高密度の画分と区別した。土壌炭素濃度（gC kg⁻¹）に対応するESMを掛けて土壌炭素量（MgC/ha）として評価し、土壌プロファイル内の各サンプリング深度における土壌炭素量を合計することによって総炭素蓄積量を計算した。同じ手順にしたがって軽画分の土壌炭素蓄積量も計算した。最後に、森林から農地への転用に伴う土壌炭素量の変化（ΔC）を推定した。

3. 3 作物体・植物体由来の炭素評価手法

本課題では、3つのコドラート（0.3 m×0.3 m）で土壌表面からリター層を回収した。林床リターの物質量を求めるために、80° Cで少なくとも48時間オープン乾燥した後の乾燥重量を計量した。林床リターは茎と他の部分に手作業で分けた。林床リターの炭素蓄積量は、土壌サンプルに使用された手順にしたがって計算し、質量（MgC/ha）を乗じた。2017年と2018年の2-3月に生産者から過去10年間に採用した耕作管理方法に関する詳細について聴き取り調査を行った。輪作体系は、どの地点も十勝地方で一般的である、小麦—テンサイ—豆類—ばれいしょの4作であった。本課題では、堆肥と作物残渣の施用の量と時間、そして輪作のサイクルに関する情報から、年平均の堆肥投入量を評価することができた（表(3)-4）。農地への堆肥を炭素ベースで評価するため、十勝地方の堆肥施用に関する知見⁴⁾にもとづき、次式で炭素投入量C_m（MgC/ha /y）を計算した。

$$C_m = MA \times 0.23 \times 0.365$$

ここで、MAは生重量ベースの地域肥料散布率（Mg /ha /y）であり、0.23と0.365はそれぞれ北海道の非乾燥状態の堆肥の乾物含量と乾燥した堆肥の炭素量を表す。

表(3)-4. 各調査地点の年平均の堆肥投入量

圃場 番号	堆肥施用量 (MgC/ha /y)
1	0.4
2	0.3
3	0.3
4	0.0
5	0, 0.1
6	0.1
7	0.1

4. 結果及び考察

4. 1. 森林と農地利用ペア間の土壌特性の比較

土壌の深さと土壌の体積密度は、農業機械の管理方法によって変化すると考えられる。土層の深さは、森林 (F) では0.30-0.75 m、農地 (AD) では0.24-0.57 mであり、土層の深さは、すべてのサイトで農地圃場よりも対照となる防風林の方が深かった (図(3)-2)。林地と農地開発後の短期および長期の圃場を比較するため、対照農地が複数となるサイト3-5では、開発後年数が短い農地と長い農地をそれぞれAD1およびAD2として表した。

Fサイトの土壌体積密度は0.52-0.78 Mg /m³であるのに対し、ADサイトでは0.62-1.07 Mg /m³であった (表(3)-5)。FよりADにおいて明らかに土壌密度が高かったのは、農業機械の導入に伴う土壌の圧密や締固めの影響である。同一の深さで評価する場合はFに比べADの方が土量が多くなる。ここでは、同一の土量で土壌炭素量を評価することとしているため、Fの方が深い土層までの炭素量計算していることになる。土壌の炭素蓄積量は、土壌の体積密度と締固めの変化を説明するために体積ベースで推定した。土壌炭素量はFサイトで101-353 MgC/ha、ADサイトで86-341 Mg C/haであった (表(3)-5)。土壌炭素量と土地利用変化後のその増減には、関連が見られなかった (図(3)-5)。その結果、各サイトにおいて、農地開発後年数が短期の圃場よりも長期の圃場において土壌炭素量が少ないことが示された。当初の想定とは異なり、土壌炭素量は農地開発とともに必ずしも減少しなかった。防風林サイトの林床リターの炭素蓄積量は3-15 MgC/haであり (表(3)-6)、樹種ではカラマツが優占する林地でリター量が多い傾向にあった。サイト4と5では土壌炭素量が少なく、林床リターが炭素蓄積量の10%以上を占めた。軽画分土壌は、鉱物粒子と関連していない植物残渣が部分的に分解された断片で主に構成されているため、土壌品質の指標として使用される。農地と林地の軽画分土壌炭素には関連がなかった (図(3)-4)。

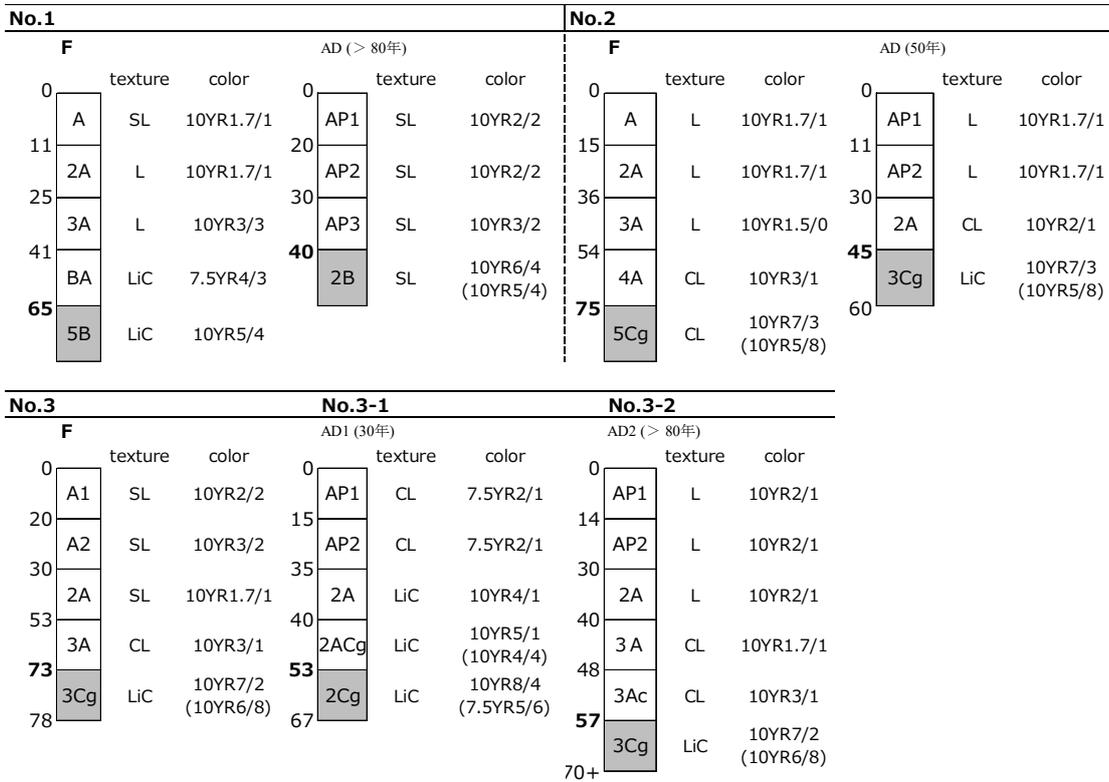
表(3)-5. 各調査地点の林地(F)に対する農地(AD)の土壌体積密度と炭素量

	F	AD1	AD2	F	AD1	AD2	AD1	AD2
圃場 番号	体積 密度 (Mg /m ³)	体積 密度 (Mg /m ³)	体積 密度 (Mg m ⁻³)	土壌 炭素 (MgC /ha)	土壌 炭素 (MgC /ha)	土壌 炭素 (MgC /ha)	農地開発 後年数 (yrs)	農地開発 後年数 (yrs)
No.1	0.38	0.88		169	176		> 80	
No.2	0.31	0.97		353	341		50	
No.3	0.21	0.62	0.62	306	292	281	30	>80
No.4	0.23	0.70	0.84	159	120	110	10	43
No.5	0.78	0.89	0.98	101	116	86	2	>80
No.6	0.70	1.07		139	142		42	
No.7	0.53	0.88		189	212		37	

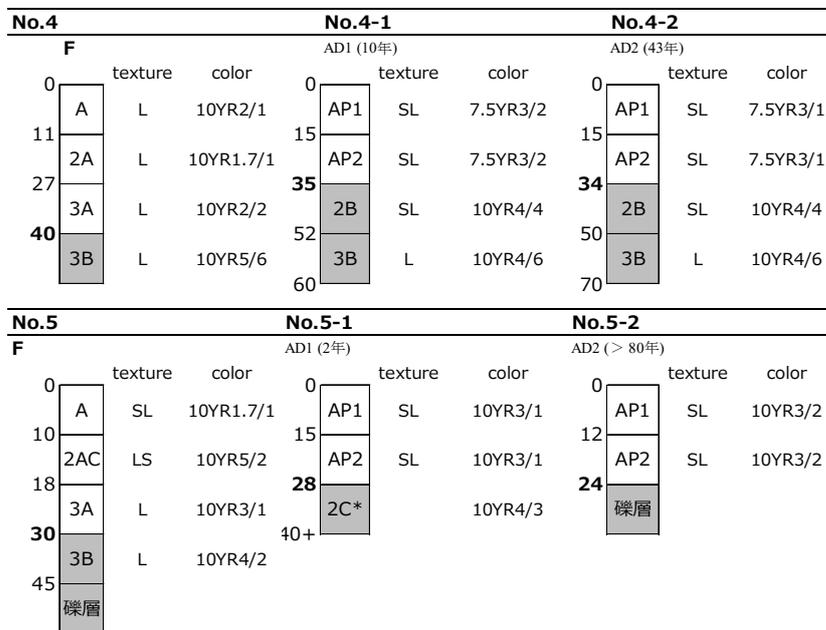
表(3)-6. 各調査地点の林床リターの炭素蓄積量

圃場 番号	樹種	林床リター (MgC/ha)
1	シラカバ	8.8
2	カラマツ	9.9
3	ヤチダモ	3.0
4	カラマツ	15.5
5	カラマツ	10.5

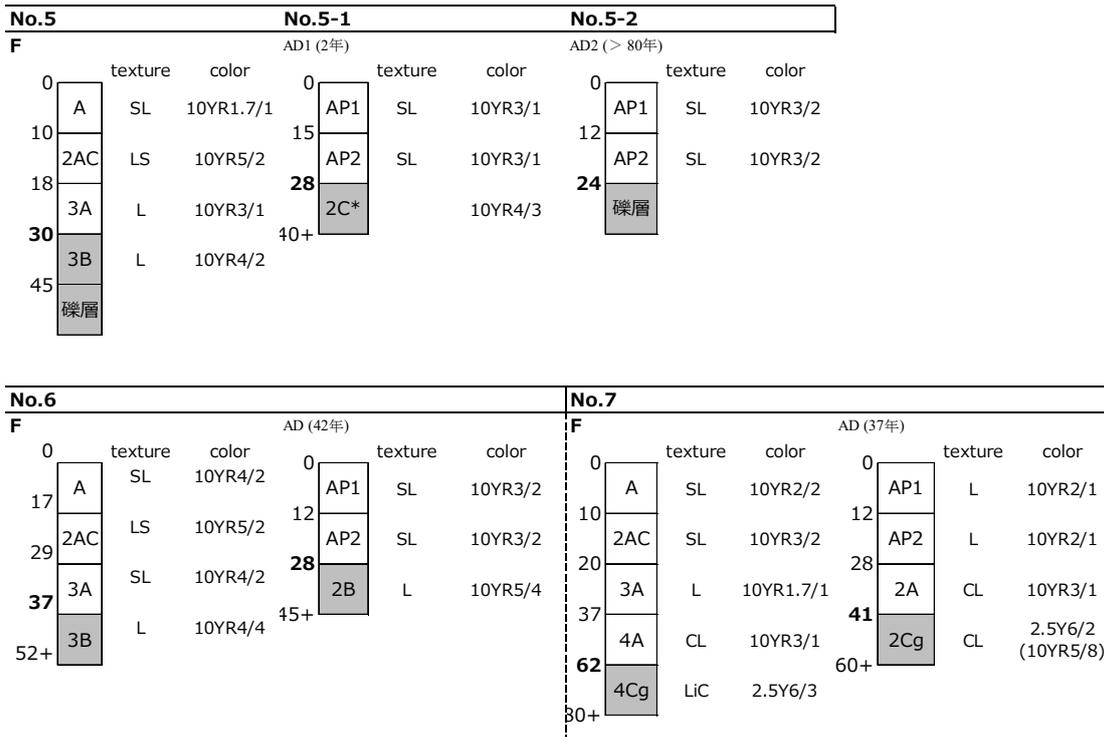
6 カラマツ 11.5
 7 カシワ・シラカバ混合 9.8



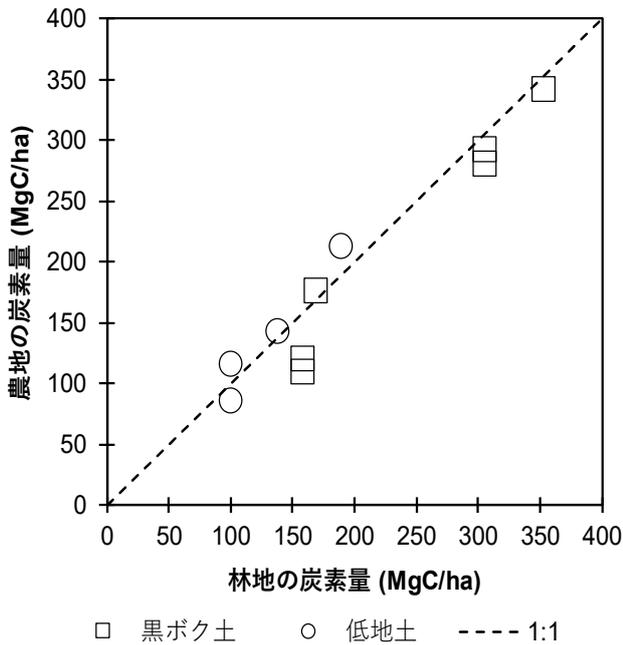
図(3)-2-1. 調査地点の土壌断面 (1)



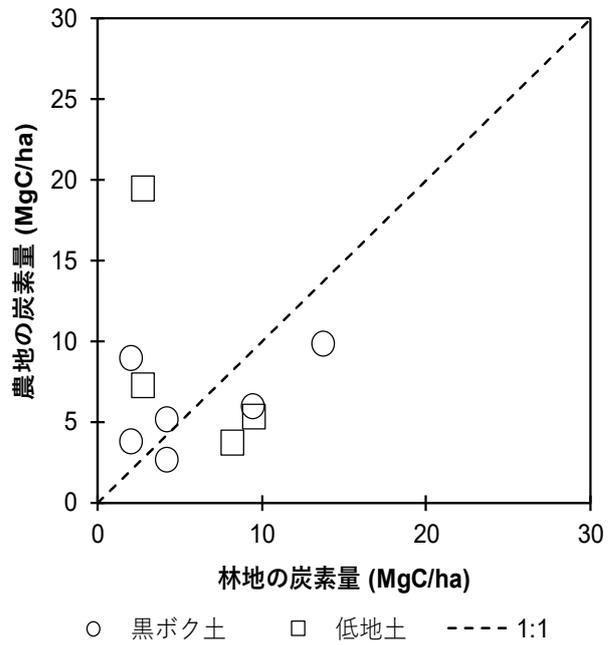
図(3)-2-2. 調査地点の土壌断面 (2)



図(3)-2-3. 調査地点の土壌断面 (3)



図(3)-3. 林地土壌に対する農地土壌の炭素量



図(3)-4. 林地土壌に対する農地土壌の軽面分(LF)炭素量

4.2. 農地土壌の環境

農地土壌の環境は、地点により異なる可能性がある。2015年冬から2016年春に圃場番号4周辺の土壌環境を調査したところ、土壌凍結の影響により地点番号4では5に比べ低温となっている(表(3)-7)。冬季では土壌凍結により地温が年ごとに大きく変化する可能性がある。土壌凍結がない

場合は、土壤中に水分があり、地温もプラスとなることから、有機物分解が起きうる環境である。逆に土壤凍結により地温がマイナスであれば、分解が抑制される可能性がある。土壤凍結は積雪が約20cmに達するまで進行するため、土壤凍結深は12月の積雪初めの雪量により変動する。十勝地方北部に位置し、積雪量が比較的少ない地点番号4では、年次変動はあるが、地温が低い状態が冬季から春季にかけて続いていた。一方、十勝地方南部に位置し、南岸低気圧由来の積雪が比較的多い地点番号5では、地温がプラス状態になる年が多かった。地点番号5では平均地温が高い可能性がある。調査地点数が少ないため、冬季の土壤環境が有機物分解に与える影響について十分な議論をするには至らないが、土壤環境が炭素蓄積量の変動に及ぼす影響に関するデータを得ることができれば、モデルを使ったシミュレーションの予測精度向上に資すると考えられる。営農管理に配慮したこともあり、環境調査期間は作付けのない冬季から春季のみとなった。このように、土壤環境を多地点で調査することは難しいが、土壤環境に関するデータはある程度モデルやインベントリー調査をもとに推定することが可能であると考えられる。土壤の環境要因をシミュレーションするモデルの開発や精度向上も、土壤炭素量の広域的な変動予測に寄与する要素であり、同時に検討すべきであると考えられる。

表(3)-7. 地点番号4周辺、5の土壤採取前の土壤環境条件

2015/16年

地点番号4周辺

月	気温 (°C)	地温 (°C)				土壤水分 (%)	
		1cm	5cm	15cm	30cm	5cm	15cm
12月	-7.1	-0.5	-0.2	0.5	1.8	5.8	-
1月	-8.5	-0.4	-0.1	0.4	1.5	4.8	-
2月	-8.6	-0.4	-0.2	0.2	1.2	5.2	-
3月	-0.7	1.0	0.9	0.8	1.4	9.4	-
4月	4.5	7.7	6.9	6.5	6.0	23.5	-
5月	12.6	13.1	12.6	11.7	10.6	22.5	-

2016/17年

地点番号5

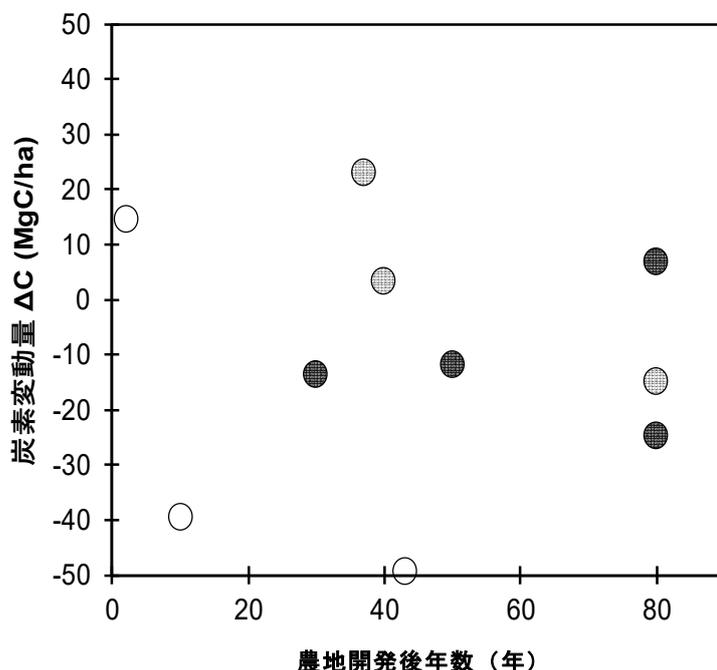
月	気温 (°C)	地温 (°C)				土壤水分 (%)	
		1cm	5cm	15cm	30cm	5cm	15cm
12月	-4.4	-0.2	0.0	0.6	1.5	25.8	25.1
1月	-6.4	0.1	0.2	0.8	1.4	30.9	26.0
2月	-6.2	0.2	0.4	1.0	1.3	29.1	27.1
3月	-1.7	1.3	1.2	1.5	1.1	28.7	32.2
4月	5.0	9.2	7.9	7.3	6.1	20.0	29.6
5月	13.3	17.5	15.9	15.4	14.0	17.2	27.3

4.3. 農業開発以来の土壤炭素プールの経時変化

農業開発中の森林と農地の土地利用ペア（初期条件と開発された農地）の間の土壤炭素蓄積量を比較したところ、FとADの間の土壤炭素量の差（ ΔC ）は、堆肥を施用した圃場は比較的小さい傾向にあった。堆肥無施用圃場における ΔC は、10年および43年のAD圃場において-39.4および-49.3 MgC/haであった。農地開発後年数が2年のAD地点の土壤炭素増加量は14.7 MgC/haであった（図(3)-

5)。全土壌に対する軽画分土壌炭素量の比率は、農業開発からの年数に依存しなかったが、農業開発から10年以内の軽画分土壌炭素含有量は、より少ない連続年数のものとは明らかに異なっていた(図(3)-6)。軽画分土壌炭素含有量は、農地開発後2年のAD圃場で最大値となる16.8%を計測した。このサイトの土壌は、写真からも土壌の黒色程度が増しているのが分かるほど有機物を多く蓄積していた(図(3)-7)。土壌の種類や施肥量は土壌炭素量の変化と明瞭な関係はなかった。

本研究では、肥料散布なしの森林と比較するために、農業開発とともに土壌炭素蓄積量が経時的に減少すると仮定して土壌炭素量を推定した。土壌炭素蓄積量の変化は農業開発後の経過年数と必ずしも一致しない。例えば、地球規模のメタ解析の結果は、土地利用が原生林が農地に開発されることで、土壌炭素蓄積量の42%が減少したことを示した。既往研究の結果は、農業開発直後に土壌炭素量が減少することで共通している。この結果は、主に温暖、乾燥地域を対象としたものであり、必ずしも寒冷地の土壌炭素量の変化を表したものではない。本研究の炭素変化量は、上述の結果とは異なる傾向であった。本研究の結果は、堆肥施用なしの土壌炭素量割合の減少は10年間で25% (159.0から119.6 MgC/ha) と31% (159.0から119.6 MgC/ha) であった。農地開発後年数が43年の圃場であるサイト4(表(3)-5)では、他の研究よりも土壌炭素の増加量が小さかった。既往研究は表層土壌(10cm程度)に限定して土壌を調査したものが多いため、農業開発に伴う土壌炭素蓄積量の変化が過小評価され、土地利用変化が土壌の炭素蓄積量に及ぼす影響も偏って評価されてきた可能性がある。年間平均気温8-9°C、年間降水量700-900 mmであるドイツのバイエルン州で調査した研究は、土地利用が森林から農地へと変化することで土壌炭素量が20%近く減少することを示唆している⁵⁾。この結果は、本研究が示した土壌炭素量の経時変化と類似している。湿気のある涼しい環境では、栽培中の有機物分解速度が遅くなる傾向があるため、土壌炭素蓄積量の減少程度が小さかった可能性がある。



図(3)-5. 農地開発に伴う土壌炭素量の変化

白色は堆肥投入なし、灰色は堆肥投入量が0.1-0.3tC /ha、黒色は堆肥投入量が0.3tC /ha以上の地点を示す。

農業開発後に土壌炭素量を減少させる要因の一つである侵食の影響を避けるために、本研究では試験区は平地であることを条件にした。寒冷な気候下では土壌炭素量の変化が遅くなることが報告されているが、アラスカの寒帯地域での以前の研究では、農業開発後の土壌炭素量の減少が7割近

くにも及ぶ場合があるとしている⁶⁾。高地斜面は融解により侵食されることが多いが、北海道においても斜面を流下する融雪水に炭素が含まれることで、土壤炭素量の急速な減少を促進する可能性が高い。

北海道東部地域においては、冬季の気温が低いために、冬季の土壤凍結とその後の土壤侵食により、表面土壤は斜面で流出する可能性がある。この地域の圃場は平坦でない地域にも分布しているため、現実的かつ広域的な土壤炭素量の評価を行うためには、急勾配の斜面に位置するサイトも分析するべきである。傾斜地に位置する農地と平地に位置する農地で土壤の凝集プロセスと管理方法がどのように異なるかについて集中的に研究された例は少ないため、今後議論が必要である。

4.4. 植物由来の炭素プールが農地開発に伴う土壤炭素量の変化に及ぼす影響

本課題では、土壤炭素蓄積量は農業開発後最初に減少すると仮定した。しかしながら、初期の軽画分の土壤炭素量は急激に増加していることから、植物由来の炭素が農地開発時の炭素蓄積量の増加に大きく寄与することが示唆された。これはまた、農地開発後数年間続く可能性がある土壤炭素量の純増を示唆している。軽画分の土壤炭素量が増加したことで、農地開発後初期にこの地域の生態系に含まれる炭素量が増加した。農地開発が進行する間に、林床リター由来の炭素といくつかの地上および地下のバイオマス由来の炭素は、この地域の土壤に取り込まれると考えられる。

農地開発後初期に土壤炭素量が増加した後、すべての地点で軽画分の土壤炭素量が一時的に減少した。これは、土壤炭素の一時的な損失量は、10年間農地として利用される間に初期の炭素の投入量を超えたと言い換えられる。農地利用により、最初は好氣的条件下で周期的に蓄積されていた土壤炭素が急速に分解されたためである。本研究で観察された土壤炭素の減少量は、初期の軽画分土壤炭素の増加とさらに分解された軽画分土壤炭素が農業開発の後期段階で均衡したため、約20 MgC/haであった。栽培期間に周期的な好氣的環境条件におかれたことで有機物の分解が促進され、農地利用時に土壤に蓄積されていた炭素が継続的に喪失したと考えられる。サイト4と5において、Fの林床リターには全土壤に蓄積されている量の10%を超える炭素が蓄積されていた。植物由来の炭素は、土壤炭素蓄積量の少ないサイトにおいて炭素蓄積量の増加に強く寄与していると考えられる。軽画分土壤のこれらの結果は、農地開発後初期の植物残渣関連の炭素蓄積量の増加を際立たせています。したがって、寒冷な気候で侵食を受けない環境では、前歴の土地利用条件下で地表面に残った炭素が土壤に蓄積することで土壤炭素量が正味で増加すると考えられる。林床のリター層や一部の地上および地下のバイオマスは農地開発に伴い土壤に取り込まれるため、森林のリターを適切に管理することで、農地開発後も土壤炭素量を維持できる可能性もある。森林から農地への転用時に土壤炭素量増加に導くためには、人為的炭素増加策として森林残渣を土壤に取り込むことを人為的炭素増加策として考慮するのが有効である。

表(3)-8. 農地開発後年数が10年以内の圃場を含む2地点の林床・全土壤・軽分画土壤の炭素構成 (MgC/ha)

地点 番号		F	AD(農地開発後 10 年)	AD(農地開発後 43 年)
4	林床リター	15.5 (0.6)	-	-
	全土壤炭素	159.0 (10.2)	119.6 (3.9)	109.7 (4.2)
	軽画分土壤炭素	2.1 (1.2)	8.9 (1.3)	3.7 (0.7)
		F	AD(農地開発後 2 年)	AD(農地開発後 80 年以上)
5	林床リター	10.5 (1.1)	-	-
	全土壤炭素	100.9 (2.5)	115.6 (5.0)	85.9 (5.5)
	軽画分土壤炭素	2.8 (0.4)	19.4 (5.7)	7.2 (0.8)

4.5. 地域的な土地利用管理が土壤炭素量に及ぼす影響

堆肥施用は、北日本の農地開発後の土壤炭素量の維持に寄与するが、施用量が多いほど土壤炭素量が増加するとは言いえない。多くの研究は、耕作地への堆肥施用が日本の土壤炭素量を増加させる有効な管理方法であることを示している。土壤中の鉱物とAl/Fe腐植複合体の形成は、黒ボク土壌における炭素の蓄積を促進し、堆肥を施用している農地は日本の全畑地の50%以上をカバーしている。しかし、有機物が蓄積されやすいと考えられる黒ボク土壌であっても、堆肥施用量の増加率と土壤炭素量の増加率は一致しない。このため、土壤炭素量に堆肥施用が及ぼす効果は、有機物の長期的な分解速度を含めて議論の余地がある。先行研究では、30年間かけて北海道で行われた連続肥料散布実験では、堆肥投入量が2.5 Mg /ha (0.21 MgC/ha) であれば、地域の土壤炭素量の平衡が保たれることが示されている⁷⁾。本課題の調査地では0.10-0.42 MgC/haの範囲で堆肥が施用されており、上述の土壤炭素量を一定に保つために必要な堆肥施用量より少ない量の圃場と多い量の圃場のいずれも含んでいた。本課題では、堆肥施用に伴い土壤炭素量がどのように変化したかに関して明瞭な結果は得られなかった。この地域では土壤炭素量の増加に堆肥施用が与えた効果は限定的であり、土地利用変化に伴う土壤炭素量変化の評価には、あまり重要ではない可能性が示唆された。一方で、堆肥施用がない圃場では、土壤炭素量の減少程度が大きいことから、一定程度までの堆肥の施用は農地への転用後の土壤炭素量の増加に貢献するが、一定以上に達すると効果が減少するものと考えられる。したがって、長期的には土壤炭素量は、農地開発を伴う特定の土壤タイプと気候条件の下で、平衡または潜在的に安定するであろうレベルに達すると想定される。土壤管理を含む土壌への有機物投入に関する詳細な研究は、炭素の変化過程を理解するのに有用であると期待される。本課題では農家が所有する圃場を対象とした事例研究であるが、農地開発に伴う土壤炭素成分の変化に関する結果は、適切かつ持続可能な炭素収支を予測するための炭素収支モデルの改善に役立つと考えられる。

近年、北海道十勝地方では、小麦やジャガイモなどの冷涼な気候に適した作物の生産量は、気温の季節的上昇に応じて大きく変化している⁸⁾⁹⁾。農家は、経済的損害を補うために、ナガイモ (*Dioscorea polystachya*)、大豆 (*Glycine max*) などの比較的高温に強い作物の栽培面積を増やし、新規作物として、サツマイモ (*Ipomoea batatas*) など暑さに強い作物を導入するようになってきている。また、我が国のワインの生産地は寒冷な地域にシフトしてきている。北海道の気温は本格的なヨーロッパのワイン用ブドウの栽培に適しており、北海道全域でブドウ畑の面積が拡大している。このように農業経営の変化に伴い、既存の農地と異なる特性を持つ農地が必要になる場面も考えられる。急斜面の丘陵地の一部は、森林から農地への転用により、新規に農地開発が行われて畑として使用される面積が広がる可能性もある。地球温暖化を背景とした新しい作物の導入は、それに適した農作により土壌条件の変化を伴う。気候温暖化条件下における新たな農業適地の増加と農業生産量が改善される可能性がある一方、それに合わせ土地利用の地域的変化が増大するならば、土壤炭素量の消失を増大させる可能性がある。地球温暖化への適応と緩和策のバランスがとれた包括的な政策が必要であると考えられる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまでに研究事例がほとんどない、寒冷地における森林と農地の土地利用変化に伴う土壤炭素量の増減を明らかにした。農地開発後2年の地点において土壤炭素量が大幅に増加したが、10年を超える地点では土壤炭素量の増加は見られず、農地開発は寒冷地においても土壤炭素量を減少させることが明確になった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

北日本における森林から農地への転用に伴い、土壌炭素量が一時的には増加するものの10年以上経過すると減少することを明らかにした。インベントリー報告において、当研究成果は短期の土地利用変化に伴う土壌炭素変化量の算定方法を変更する基礎データを提供でき、気候条件の異なる全国の調査結果と合わせ国レベルでの土地利用変化に伴うインベントリー報告の改訂に活用できる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) S. Shimoda and F. T. Koyanagi: Sustainability, 9(11), 1973 (2017), Land use alters the plant-derived carbon and nitrogen pools in terraced rice paddies in a mountain village
- 2) S. Shimoda, K. Wakabayashi, M. Koshimizu and K. Niwa: Sustainability, 10(12), 4587 (2018) Rapid increase and long-term slow decrease in soil C stock due to agricultural development in Hokkaido Tokachi District

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 下田星児・若林勝史・興水美奈・丹羽勝久：日本土壌肥料学会2018年全国大会（2018）北海道十勝地方の農地化年代の異なる圃場における森林との有機物層の違い

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) L. B. Guo and R.M. Gifford: Soil carbon stocks and land use change: Glob. Chang Biol., 8, 345-360 (2002), A meta analysis
- 2) A. Don, J. Schumacher and A. Freibauer: Glob. Chang Biol., 17, 1658-1670 (2011), Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks-A meta-analysis

- 3) C. Poeplau, A. Don, L. Vesterdal, J. Leifeld, B. A. S. Van Wesemael, J. Schumacher and A. Gensior: *Glob. Change Biol.*, 17, 2415-2427 (2011), Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone-carbon response functions as a model approach
- 4) N. Koga, P. Smith, J. B. Yeluripati, Y. Shirato S. D. Kimura, S.D. and M. Nemoto: *Agric. Ecol. Environ.*, 144, 51-60 (2011), Estimating net primary production and annual plant carbon inputs, and modelling future changes in soil carbon stocks in arable farmlands of northern Japan
- 5) M. Wiesmeier, M. von Lützw, P. Sporlein, U. Geuß, E. Hangen, A. Reischl, B. Schilling, and I. Kogel-Knabner: *Soil Tillage Res.*, 146, 296-302 (2015), Land use effects on organic carbon storage in soils of Bavaria: The importance of soil types
- 6) J. M. Grünzweig, D. W. Valentine and F. S. Chapin: *Ecosystems*, 18, 132-145 (2015), Successional changes in carbon stocks after logging and deforestation for agriculture in interior Alaska: Implications for boreal climate feedbacks
- 7) 中津智史、田村元: *日本土壤肥料学雑誌*, 79(2), 139-145 (2008), 30年間の有機物(牛ふんバーク堆肥および収穫残さ)連用が北海道の淡色黒ボク土の全炭素, 全窒素および物理性に及ぼす影響
- 8) S. Shimoda, T. Hamasaki, T. Hirota, H. Kanno, Z. Nishio: *Int. J. Climatol.*, 35, 4176-4185 (2015), Sensitivity of wheat yield to temperature changes with regional sunlight characteristics in eastern Hokkaido
- 9) S. Shimoda, H. Kanno and T. Hirota, T.: *Agric. For. Meteorol.*, 263, 147-155 (2018), Time series analysis of temperature and rainfall-based weather aggregation reveals significant correlations between climate turning points and potato (*Solanum tuberosum* L.) yield trend in Japan

II-4 西日本における森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素量変化の解明

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター

生産環境研究領域 土壌肥料グループ

古賀 伸久

草場 敬、新美 洋、山根 剛

畑作研究領域 畑土壌管理グループ

島 武男

平成28(開始年度)～30年度累計予算額：19,497千円

(うち平成28年度：6,609千円、平成29年度：6,609千円、平成30年度：6,279千円)

累計予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

西日本を対象に、森林から農地への土地利用変化が起きた農地およびそれに隣接する森林をペアとして、合計12地点(畑5地点、放牧地7地点、樹園地1地点)で土壌の調査およびサンプリングを実施し、地点ごとに土地利用変化による土壌炭素量の変化係数(調査時点の農地の積算土壌炭素量/森林の積算土壌炭素量)を算出した。また、農地転用後の経過年数や農地の利用形態、調査地の土壌タイプなど、土地利用による土壌炭素変化係数(土地利用変化係数)に影響すると考えられる各種要因との関係を調査した。森林から農地への土地利用変化に伴う土地利用変化係数は 0.73 ± 0.23 であり($n=12$)、農地転用から調査までの経過年数が長くなるほどこの値は小さくなった。その傾向は、黒ボク土よりも非黒ボク土(本研究では、赤黄色土と褐色森林土)で顕著であった。また、農地転用後の農地利用形態(毎年耕起が行われる「畑」と長期にわたって耕起がほとんど行われぬ「放牧地・樹園地」で評価)が土地利用変化係数に及ぼす影響は小さかった。本課題では12地点しか調査していないことから、土地利用変化係数に及ぼす各種要因の影響は、サブテーマ2、3で得られるデータとともに今後評価される必要がある。

森林を農地に転用すると、農作業機による踏圧などにより農地では一般に土壌の圧縮が起こる。このため、土地利用変化係数を算定するためには、深さを一定にして土壌炭素量を評価する従来の手法ではなく、より合理的な評価手法であるEquivalent Soil Mass (ESM)法(土壌質量を一定にして土壌炭素量を評価する手法)を適用することが重要となる。従来法によって求められた12地点の土地利用変化係数の平均値は0.83であり、ESM法で求められた0.73よりも13%大きかった。従来法による土地利用変化係数の過大評価は、農地と森林で土壌の容積重の差が生じやすい黒ボク土で顕著であった。

[キーワード]

土壌炭素量、土地利用変化、森林伐採、農地、Equivalent Soil Mass法

1. はじめに

IPCC2006ガイドラインでは、各国に土壌炭素量計測値データベースの拡充、算定モデルの開発を求めているにもかかわらず、我が国では、森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素の変動量について、科学的知見が全くといって良いほど蓄積されていない。そこで本研究では、西日本を対象に、森林から農地への土地利用変化が起きた農地およびそれに隣接する森林をペアとして土壌データを収集し、森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素変動量の実態およびその変動要因を明らかにする。

2. 研究開発目的

西日本を対象に、森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素量変化を明らかにし、これを換算する係数(土地利用変化係数)を導く。また、農地転用後の経過年数や農地の利用形態、調査地の土壌タイプが土地利用変化係数に及ぼす影響を評価する。

3. 研究開発方法

森林から農地への土地利用変化が起こった農地およびそれに隣接し地形的に連続する森林において、土壌試料の採取（ペアサンプリング）を行った。それぞれの土地利用で選定した3地点において、農地では約40cm、森林では約50cmまでの深さで土壌断面を作成した。色や硬さを基準に層位区分を行い、容積重測定のための採土管試料および全炭素濃度測定のための攪乱土壌試料を層位ごとに採取した（各地点において2反復で土壌採取を実施したため、農地および森林での土壌採取はそれぞれで6反復となった）。森林では土壌を採取した3地点すべての近傍において、50cm×50cmの区画を設定しリターも採取した。農地では、農地への転用時期、農地転用後の利用形態（畑、永年草地、放牧地、樹園地など）や有機物管理（堆肥施用の量や頻度、作物残さの処理方法等）について土地所有者から聞き取り調査を実施した。土地所有者に対する聞き取りや立地状況から、切り土・盛り土や客土などの造成が行われていないと判断できる農地を調査地として選定した。最終的に研究期間全体（平成28-30年度）における調査地点数は12となった。各調査地点の所在する市町村名のほか、調査地の土壌タイプ（一部は確認中）、森林から農地への転用時期、農地転用から調査までの経過年数、転用後の農地の利用形態（主な栽培品目）を表(4)-1に示した。

表(4)-1 調査地点の概要 (n=12)

調査実施年度	調査地点名称	市町村名	土壌タイプ	森林から農地への転用時期	農地転用から調査までの経過年数	転用後の農地の利用形態 (主な栽培品目)	参考
28	合志	熊本県合志市	黒ボク土	1970年頃	約46年	畑(牧草)※採種後、毎年耕起するため、「畑」として位置づけ	九州沖縄農業研究センター 隔離ほ場
	都城	宮崎県都城市	黒ボク土	1989年	27年	畑(飼料用トウモロコシ)	九州沖縄農業研究センター 隔離ほ場
	大田	鳥根県大田市	赤黄色土	1972年	45年	草地→放牧地(1997年頃～)	
	大宜味	沖縄県大宜味村	赤黄色土	1967年頃	約50年	畑(パイナップル)→耕作放棄(1987年頃～)→畑(ソバ、2009年頃～)	調査時雑草多し、数年に1回家畜ふん堆肥を施用
29	志布志	鹿児島県志布志市	黒ボク土	1994年頃	約23年	畑(サツマイモ)	数年に一回牛ふん堆肥を施用
	隠岐1	島根県隠岐郡隠岐の島町	黒ボク土(確認中)	1978年	39年	放牧地	
	隠岐2	島根県隠岐郡隠岐の島町	赤黄色土、褐色森林土	1991年	26年	放牧地	
	豊後高田	大分県豊後高田市	褐色森林土	1941年	76年	樹園地(カンキツ)	
	長島	鹿児島県出水郡長島町	赤黄色土	1946年頃	約72年	桑畑→畑(サツマイモ・パレイシヨニ毛作、1970～72年頃～)	牛ふん豚ふん混合堆肥を年2回作付け前に施用
30	入来	鹿児島県薩摩川内市入来町	黒ボク土	1968年	50年	放牧地	鹿児島大学農学部付属牧場、調査時トウモロコシを放牧
	坂井	福井県坂井市	赤黄色土	1976年	42年	放牧地	福井県畜産試験場
	岡山	岡山県岡山市北区	褐色森林土	1978年	40年	放牧地	岡山大学付属牧場

表(4)-2 転用後の農地の利用形態および土壌タイプによる調査地点の分類

		転用後の農地の利用形態	
		畑	永年草地、放牧地、樹園地
土壌タイプ	黒ボク土	合志、都城、志布志(3)	隠岐1、入来(2)
	非黒ボク土(赤黄色土、褐色森林土)	大宜味、長島(2)	大田、隠岐2、豊後高田、坂井、岡山(5)

カッコ内の数値はそれぞれの区分に分類された調査地点数。転用後の農地の利用形態については、毎年耕起が行われる「畑」と長期にわたり耕起がほとんど行われない「永年草地、放牧地、樹園地」に分類。今回の研究では、永年草地に区分される調査地点はなし。

まず、採土管試料はを105℃で乾燥した後、土壌の乾燥重量を測定した。次に、水浸漬により乾燥さ

せた土壌から植物遺体などの粗大有機物を分離し、土壌の乾燥重量から粗大有機物の乾燥重量を差し引いて土壌の容積重を算出した。攪乱土壌試料は、3週間程度風乾した後、2mmふるいに通過させ、粗大有機物を分離した後、さらに微粉碎した。乾式燃焼法（Elementar社、vario EL cube）により全炭素濃度を測定し、微粉碎土壌試料の含水率から乾燥重量あたりの全炭素濃度を算出した。森林から採取したリターを70°Cで3日間通風乾燥した後、森林リターの乾燥バイオマス量を算出した。乾燥試料をさらに微粉碎した後、乾式燃焼法により乾燥重量あたりの全炭素濃度を算出した。これらの結果から、森林リターに含まれる炭素量を算出した。

ペアサンプリングにおける土壌炭素量は、Equivalent Soil Mass (ESM) 法により評価した。はじめに、農地6反復について、表層から層位ごとに、層位の厚さと容積重（各層位の土壌の全炭素濃度に1.724を乗じて土壌有機物濃度を算出し、これを差し引いた容積重）を用いてmineral soil massを算出し、深さ30cmまでの「農地のmineral soil mass」の平均値を算出した。続いて、農地6反復および森林6反復それぞれのmineral soil massが「農地のmineral soil massの平均値」と同値となるよう、それぞれの深さを調整した。この深さまでの各層位の厚さ、容積重（土壌有機物濃度を差し引かない容積重）および乾物あたりの全炭素濃度にもとづき、農地6反復、森林6反復すべてにおいて、土壌炭素量を算出した。最後に、土地利用変化係数（調査時点の農地の土壌炭素量の平均値/森林の土壌炭素量の平均値）を算出した。従来法とESM法による土地利用変化係数の差を定量的に評価するため、全12調査地点について従来法にもとづく土地利用変化係数も算出した。

4. 結果及び考察

調査地点ごとにESM法により算出した農地および森林の土壌炭素量、土地利用変化係数、土壌炭素量算出時のmineral soil mass量、森林リターの炭素量を表(4)-3に示した。農地転用後の農地利用形態は、畑5地点、放牧地6地点、樹園地1地点であった。土地利用変化係数の平均値±標準偏差は、0.73±0.23となった。土壌炭素量算出時のmineral soil mass量（農地、森林で同じmineral soil mass量を使用）は、黒ボク土で小さく（1175-2367 Mg/ha）、非黒ボク土で大きかった（2927-4050 Mg/ha）。森林リター炭素量は、2.57-8.55 MgC/haの範囲にあった。

表(4)-3 各調査地点におけるESM法により算出した
森林から農地への土地利用変化に伴う土地利用変化係数

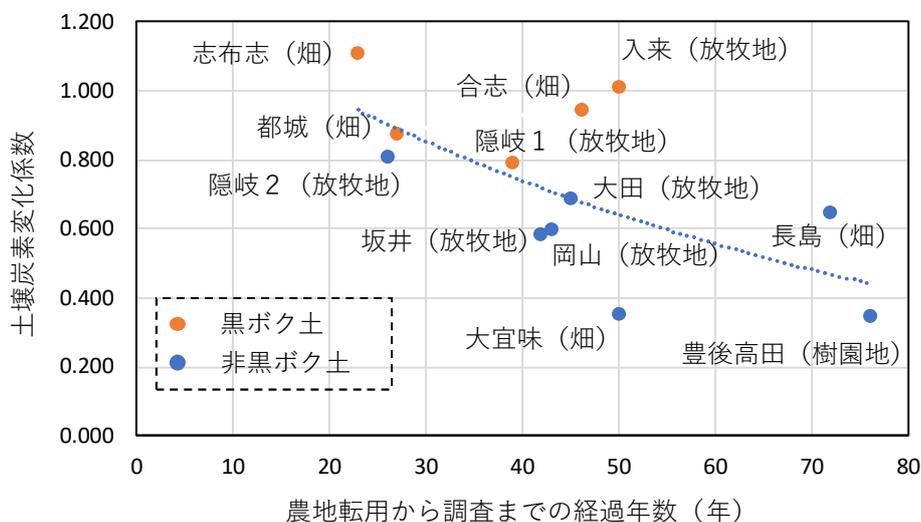
調査地点 名称	転用後の 農地の 利用形態	農地の 土壌炭素量 (平均値)	森林の 土壌炭素量 (平均値)	土壌炭素 変化係数	土壌炭素量算 出時のmineral soil mass量	森林リター 炭素量
		(Mg C/ha)	(Mg C/ha)		(Mg /ha)	(Mg C/ha)
合志	畑	195.1	205.3	0.95	1175	4.79
都城	畑	114.0	129.4	0.88	1494	8.55
大田	放牧地	55.9	81.0	0.69	2927	3.49
大宜味	畑	21.9	61.5	0.36	3607	2.57
志布志	畑	86.0	77.5	1.11	1999	6.71
隠岐1	放牧地	110.7	139.7	0.79	2367	3.11
隠岐2	放牧地	72.2	89.1	0.81	3772	6.32
豊後高田	樹園地	20.6	59.8	0.34	3816	2.99
長島	畑	37.9	58.8	0.65	3013	4.57
入来	放牧地	121.7	120.3	1.01	2336	3.34
坂井	放牧地	69.0	117.6	0.59	3857	6.86
岡山	放牧地	39.7	66.2	0.60	4050	6.39
平均値±標準偏差(n=12)				0.73±0.23		

転用後の農地の利用形態と調査地の土壌タイプにしたがってすべての調査地点を分類し（表(4)-

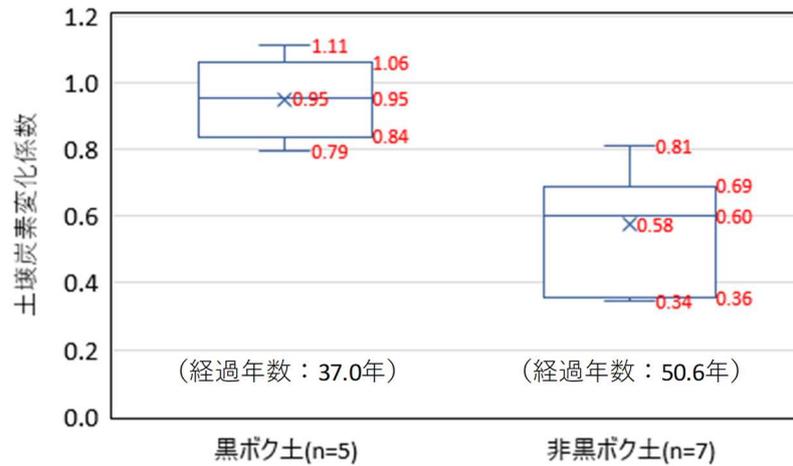
2)、農地転用から調査までの経過年数と土地利用変化係数との関係を図(4)-1に示した。非黒ボク土(n=7)では、農地転用から調査までの経過年数が長くなるほど土地利用変化係数は小さかった。その一方で、黒ボク土(n=5)では、土地利用変化係数の値は1付近でありサイト間の変動も小さかった。土地利用変化係数の平均値は、非黒ボク土で0.58であったのに対し黒ボク土では0.95であった(図(4)-2)。ただし、農地転用から調査までの経過年数が非黒ボク土(平均50.6年)よりも黒ボク土(平均37.0年)で短かったことから、黒ボク土の土地利用変化係数の値が1に近かったのは経過年数の短さが影響している可能性がある。

耕起が毎年行われる「畑」と長期にわたって耕起がほとんど行われない「放牧地・樹園地」に分類した上で、転用後の農地の利用形態が土地利用変化係数に及ぼす影響を評価した。両者の土地利用変化係数の差は小さく(畑、放牧地・樹園地でそれぞれ0.79、0.69)、農地の利用形態が土地利用変化係数に及ぼす影響は小さかった(図(4)-3)。この比較において、「畑」および「放牧地・樹園地」における農地転用から調査までの経過年数(平均値)はそれぞれ43.6年と45.9年であり、両者の差はほとんどなかった。

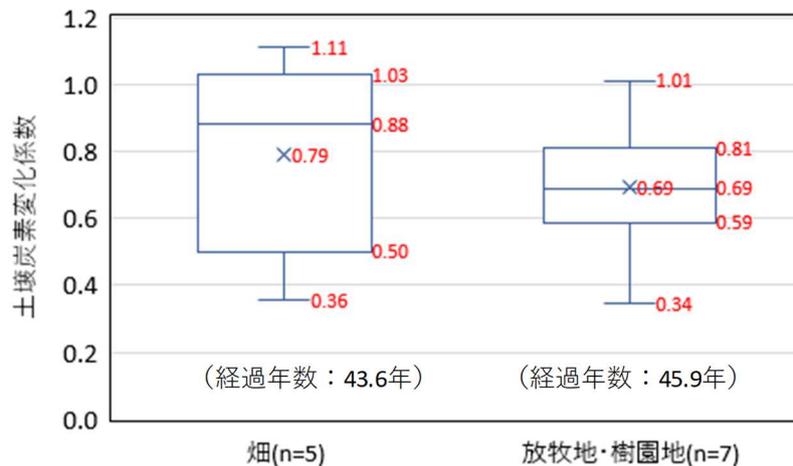
ESM法による土地利用変化係数の平均値は0.73であったのに対し、従来法による土地利用変化係数の平均値は0.83であった(図(4)-4)。森林を農地へ転用すると、一般に農地では農作業機による踏圧などにより土壌が圧縮される。そのため、森林と比べて、農地では土壌の容積重が大きくなる。農地の0-30cmを基準として、従来法のように土壌炭素量を評価する際に森林の対象深度を0-30cmにしてしまうと、森林土壌は膨軟なために森林のmineral soil mass量や土壌炭素量を過小評価し、その結果土地利用変化係数を過大評価してしまう可能性がある。農地における土壌圧縮の問題を考えると、従来法には大きな問題があり、ESM法はより合理的である。12地点の調査結果によると、ESM法よりも従来法では土地利用変化係数を13%過大評価していた(図(4)-4)。この従来法における過大評価は、農地と森林で土壌の容積重の差が大きい黒ボク土で、より顕著であった(図(4)-5)。



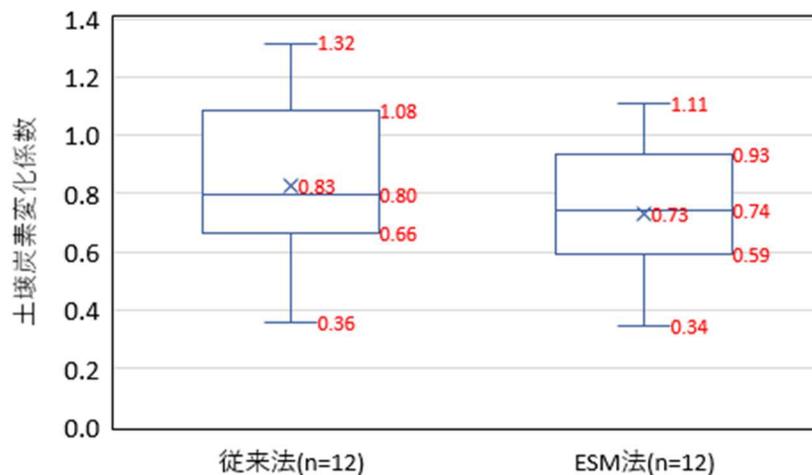
図(4)-1 農地転用から調査までの経過年数と土地利用変化による土壌炭素変化係数(土地利用変化係数)との関係
(破線は全12地点の回帰曲線を示す。)



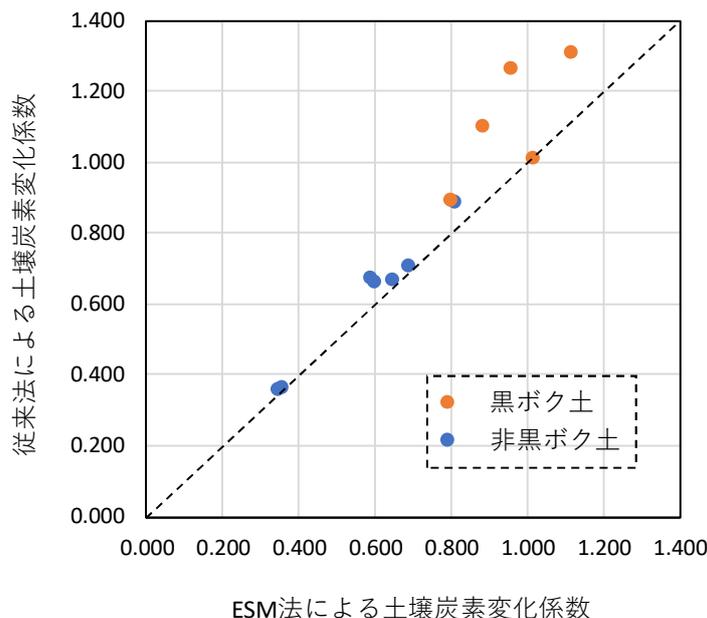
図(4)-2 土壌タイプ別の土地利用変化による土壌炭素変化係数（土地利用変化係数）
（農地転用から調査までの経過年数（平均値）を図中に示す。箱ひげ図では、
×が平均値、箱中の横線が中央値、箱の下端が第一四分位、箱の上端が第三四分位、ひげの両端は箱の長さの1.5倍以内にある最大値と最小値を示す。）



図(4)-3 農地の利用形態別の土壌炭素変化係数（土地利用変化係数）
（箱ひげ図の見方は、図(4)-2の脚注を参照）



図(4)-4 従来法およびESM法により算出された土壌炭素変化係数（土地利用変化係数）
（箱ひげ図の見方は、図(4)-2の脚注を参照）



図(4)-5 従来法およびESM法により算出された土壌炭素変化係数(土地利用変化係数)の関係

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

我が国では農地から森林への土地利用変化に伴う土壌炭素の変動量に関する科学的な知見がほとんど蓄積されていない状況にあったが、西日本での12地点の調査からその実測値を得た。課題で取得した実測値とサブテーマ2と3で取得された他地域の実測値と合わせたデータセットを活用することで、森林から農地への土地利用変化に伴う土地利用変化係数について我が国の代表値を導出できるであろう。また、気候、土壌タイプに加えて、農地転用後の経過年数や農地利用形態が土地利用変化係数に及ぼす影響を評価することができる。森林の農地転用に伴い農地では一般に土壌の圧縮が起こることから、土壌炭素量を評価するには、従来のように深さを一定にして計算するのではなく、ESM法(土壌質量を一定にして評価する手法)がより合理的であることを示した。ESM法の適用は、黒ボク土のように、農地と森林の土壌容積重の差が生じやすい土壌で特に有効であることを示した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

より高度な手法(Tier)により、IPCC2006ガイドラインに則した形で、我が国の土地利用変化に伴う土壌炭素量の変化を評価することができるようになる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

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>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 古賀伸久、新美洋、山根剛、草場敬、島武男：2017年度日本土壌肥料学会九州支部例会（2017）
「森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素量の変化 —九州沖縄農業研究センター隔離ほ場での測定事例—」
- 2) N. Koga, T. Kusaba, H. Niimi, T. Shima, T. Yamane: The 21st World Congress of Soil Science, Rio de Janeiro, Brazil, 2018
“Measuring changes in soil carbon stocks in western Japan as influenced by land conversions from forest land to cropland”

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

II-5 森林から農地への土地利用変化に伴う土壤炭素量変化のモデル化

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変動研究センター
 温暖化研究統括監 白戸 康人
 環境情報基盤研究領域 領域長 神山 和則
 環境情報基盤研究領域 土壤資源評価ユニット 小原 洋・高田 裕介
 生物多様性研究領域 生物多様性変動ユニット 池田 浩明

平成28～30年度累計予算額：19,564千円

(うち平成28年度：6,632千円、平成29年度：6,632千円、平成30年度：6,300千円)

累計予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

新規植林、再植林、森林伐採が起きた地点の位置情報を示すポイントデータと過去から現在までの空中写真などから、森林から農地に変化した場所と、変化せずに森林が残っている場所の2つが近接している調査候補地を選定し、森林と農地をペアとして土壤調査とサンプリングを行った。この際、農地と林地を、同じ深さ(表層30cmまで)の土壤炭素量で比較するやり方(従来法)と、土壤の質をそろえて比較する方法(Equivalent Soil Mass法:ESM法)の2通りで評価を行い、結果を比較した。林地から農地に変化するときの土壤炭素量の変化係数(土地利用変化係数)は、全国の現地調査38地点の平均で、従来法では0.95、ESM法では0.75であった。一方、この係数と土地利用変化が起きてからの年数との間には明瞭な関係がみられなかった。気象、土壤タイプ、地目(畑、樹園地、草地)、有機物投入量などの重要な要因でグループ分けして解析すると年数との間に関係がみられることも考えられるが、その解析を行うには標本数が少ないため、今後のさらなるデータの蓄積が望まれる。現在のインベントリー報告において森林で使われているCENTURYモデルと農地で使われているRothCを統合し、森林と農地の両方に適用可能な統合モデルを開発した。そのモデルを本プロジェクトの調査地に適用し、実測値との比較を行った。さらに、広域評価につなげるため、面的にモデルを適用する計算の試行を行った。CENTURYとRothCの統合モデルは、多くの調査地で実測値を概ね再現でき、メカニズムを考慮したモデルの、単純な係数を用いた原単位法に対する有用性が示された。さらに、広域評価のための面的な計算も試行し、将来の全国計算へのモデル活用の可能性を示したが、そのためには面的情報の整備など解決すべき問題点が多いことも指摘した。

[キーワード]

土壤炭素、土地利用変化、モデル、森林伐採、農地

1. はじめに

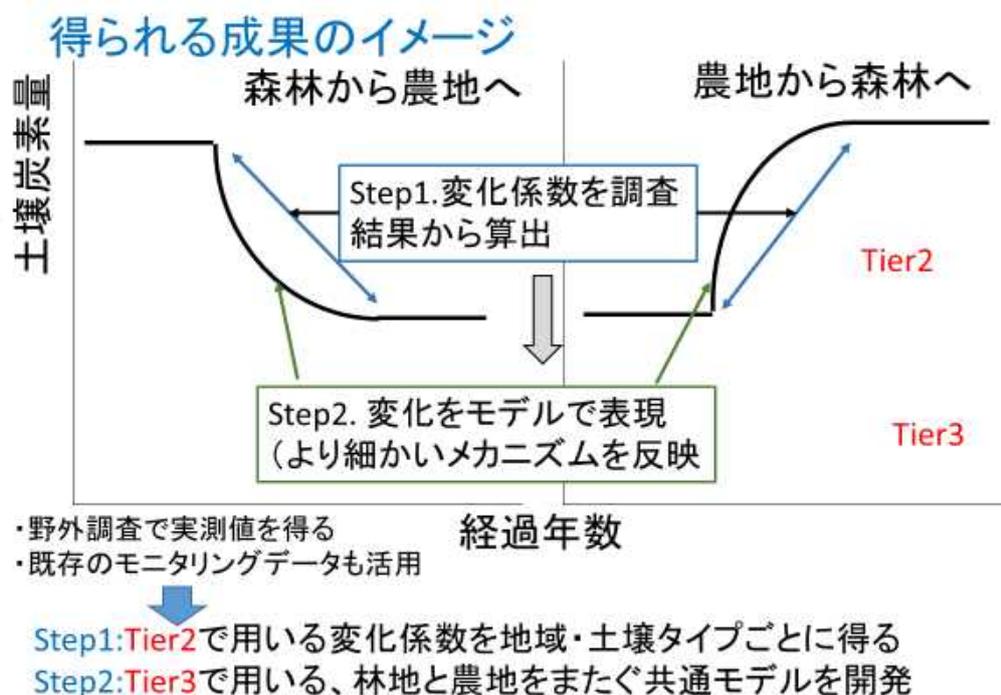
森林から農地へ土地利用が変化すると、一般的には、土壤炭素量は減少すると考えられる。ただし、農地の土壤炭素量は管理次第で大きく変わるので、有機物を多投入している農地であれば森林よりも土壤炭素量が多くなることもありえる。これまで、わが国では、土地利用が変化した場所の土壤を調べた例、特に、異なる土地利用をまたいで比較したデータがほとんどない。そのため、日本国温室効果ガスインベントリー報告書では、実際に土地利用が変化した場合のデータではなく、森林及び農地の土壤炭素量の全国平均値を用いて、森林の平均値から農地の平均値へと変化するという仮定で計算しているが、これは実態と乖離している可能性がある。そこで、本研究では、農地と森林の間の土地利用変化が実際に起きた場所の土壤のデータを集め、土壤炭素量の変化の実態を明らかにすることを目的とした調査を開始した。

2. 研究開発目的

森林から農地へと土地利用が変化したときの土壤炭素量の変化を推定するための土地利用変化係数を、実際に土地利用変化が起きた場所の現地調査にもとづいて設定することと、森林と農地の異なる土地利用をまたいで使用可能な土壤炭素動態モデルを開発することを目的とする。

3. 研究開発方法

上述したように、大きく分けて目的が2つあり、1つめは現地調査（モニタリング）によるもの、2つめはモデリングに関するものである。これらモニタリングとモデリングの2つの手法を併用することで、図(5)-1に示すように、森林から農地への土地利用が起きたときの土壤炭素量の変化を、1)モニタリング調査から導き出される土地利用変化係数、2)モデルによる計算、の2つの方法で計算できるようにすることができる。そのための手法を、以下、はじめにモニタリング、次にモデリングの順番で記載する。



図(5)-1 モニタリングとモデリングからなる本研究の手法および得られる成果のイメージ図

3-1. モニタリング

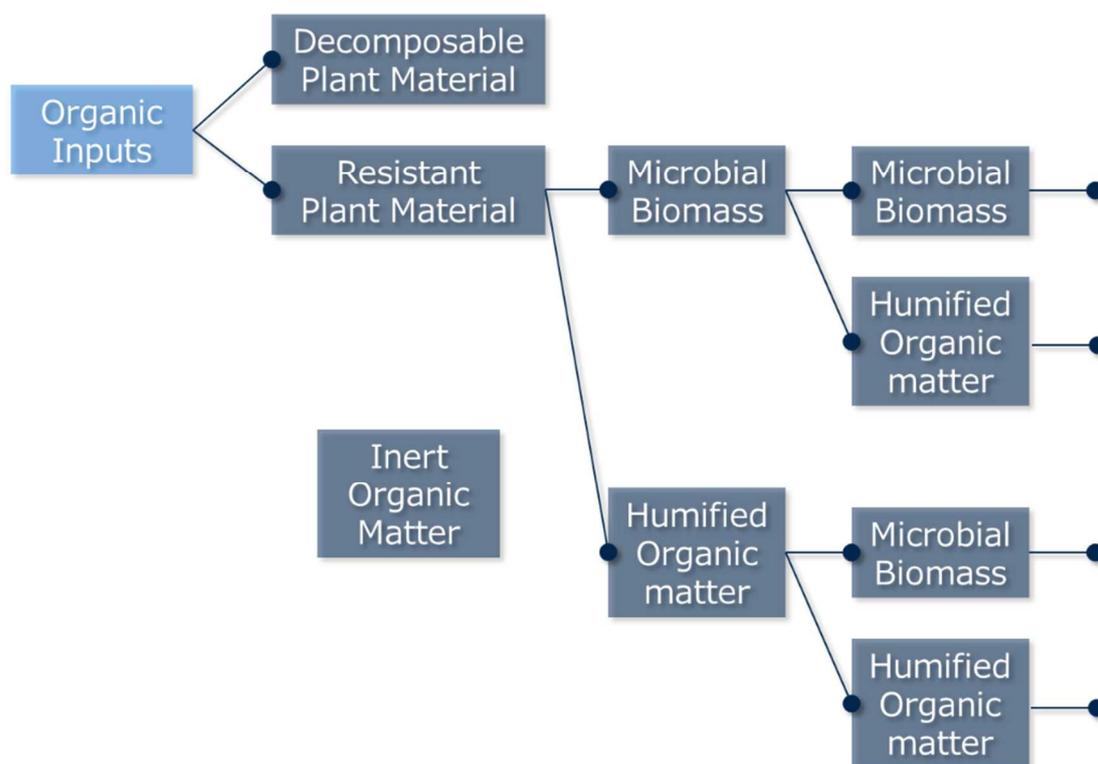
モニタリングについては、まず、新規植林、再植林、森林伐採が起きた地点の位置情報を示すポイントデータ（森林吸収源インベントリー整備事業）、過去から現在までの空中写真（地理院地図、Google Earth）および聞き取り情報から、森林から農地に变化した場所、変化せずに森林が残っている場所の2つが近接している調査対象候補地を選定した。次にこれらの候補地を現地調査し、地形や母材からみて2つが元は同じ土壌であったとみなすことができれば調査地とした。その後、土地所有者を探して調査の許可を得るなどの手続きを経て、土壤サンプリングを行った。サンプリングでは、ペアとなる林地と農地からそれぞれ6反復で各層位の土壌を採取した。サンプリングした土壌の仮比重と炭素濃度を分析し、土壤炭素量を算出した。ここで、農地と林地の土壤炭素量を比較する際に、同じ0-30cm深さまでの土壤炭素量で比較するやり方（従来法）と、土壌の質量をそろえて比較するEquivalent Soil Mass法（ESM法）で計算するやり方で結果がどう異なるかも検討した。

3-2. モデリング

モデル開発の展開までの検討

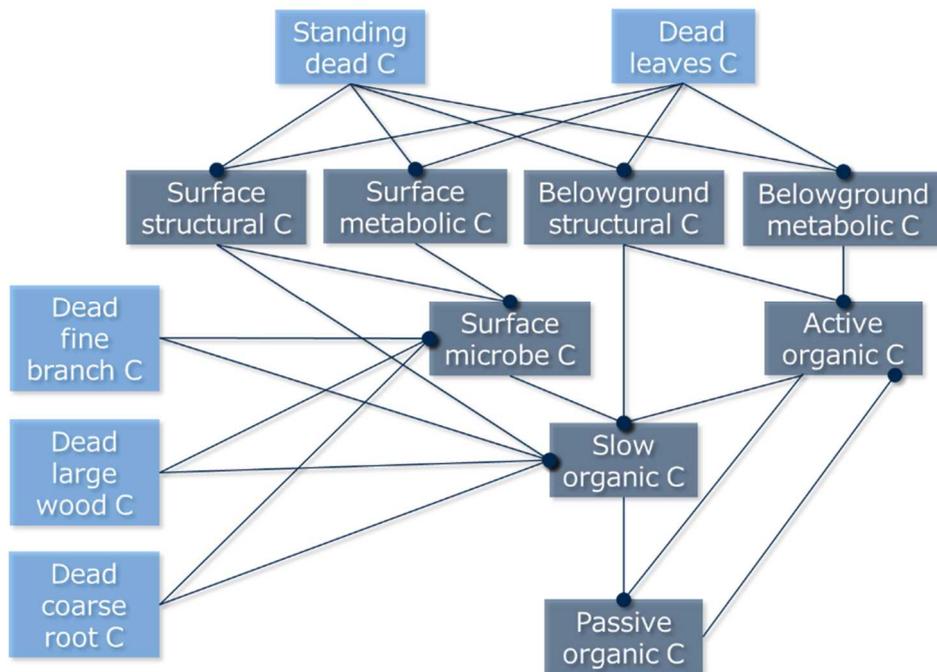
現在の国家温室効果ガスインベントリ報告書における土壌炭素量の変化に伴うCO₂の吸排出量の算定では、農地においてはRothCモデル（図(5)-2）が用いられており、森林ではCENTURYモデル（図(5)-3）が用いられている。森林の吸排出量の算定に使われているCENTURYは、土壌のみならずリター、枯死木や生体バイオマスなどの炭素プールの計算も必要な森林に適している。一方、農地の算定に使われているRothCは、炭素プールは土壌のみであるが、その土壌部分が日本の水田土壌¹⁾や黒ボク土用²⁾に改良されている点の特徴である。はじめに、土地利用変化があった際に、それぞれのモデルの土壌炭素プールを土地利用変化後のモデルに受け渡し、2つのモデルをシームレスに運用して土地利用変化がシミュレーションできるか検討した。それぞれのモデルのプールの分解されやすさ、プールサイズを比較したところ、定量的・定性的に対応するプールもあったが、プールの数やプールの分解特性が異なるため、両者のモデルの異なるプールを結合することは困難であると考えられた。そのため、モデルを切り替えるのではなく、土地利用変化にも対応できる共通の土壌炭素モデルを開発し、それを利用する必要があると結論づけた。

RothC model



図(5)-2 RothCモデルの土壌プール

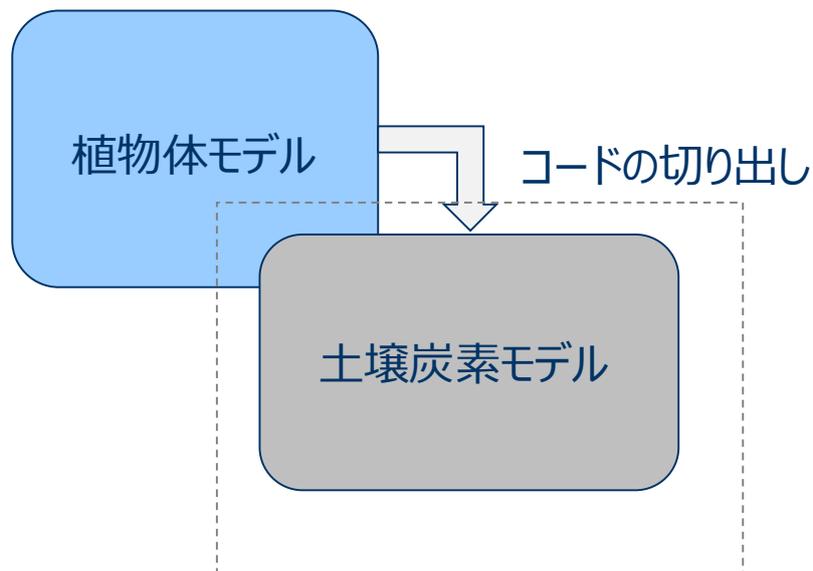
CENTURY model



図(5)-3 CENTURYモデルの土壌部分のプール

これまで運用実績のあるRothCとCENTURYモデルを検討したところ、RothCモデルには森林生態系に存在するリター層、枯死木のプールがないため、土地利用変化に対応するモデルとしてRothCを採用した場合、新たにリター層、枯死木のプールを追加し、そのパラメータを決定する必要がある。一方でCENTURYモデルは当該プールがデフォルトで入っており、すでに農地にも森林にも適用された実績があるため、本研究ではCENTURYモデルを採用することが妥当であると判断した。

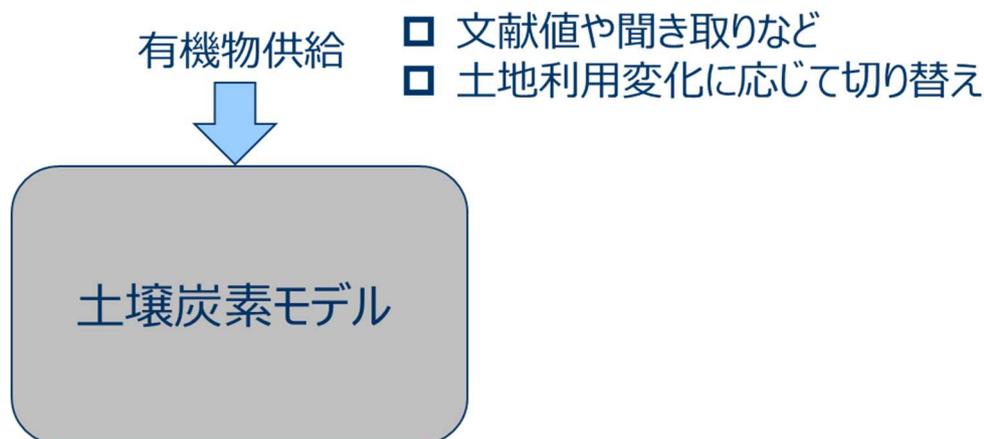
ただし、CENTURYモデルは植物の成長も含む比較的複雑なモデルであり、算定などの応用的かつ広域への適用に際しては、扱いが難しい側面があった。そこで、本研究ではCENTURYモデルの土壌炭素動態を記述した部分だけを抜き出したプログラムを利用し、文献値などから有機物の土壌への供給をモデルへの入力値として外部から与える構造を採用した（図(5)-4）。



図(5)-4 生体バイオマスも含まれるCENTURYモデルから土壌炭素モデル部分のコードを切り出す概念図

評価システムの開発

今回開発した土地利用変化に対応した土壤炭素動態の評価システムの概略を示す。本システムでは、土地利用変化の後の土地利用状況に応じて、土壤への有機物投入量を外部から与え、CENTURYモデルに投入し、土地利用変化による土壤炭素量の変化を評価した（図(5)-5）。なお、土地利用変化前の土壤炭素量が定常状態に達していたと仮定し、モデルを初期化した。

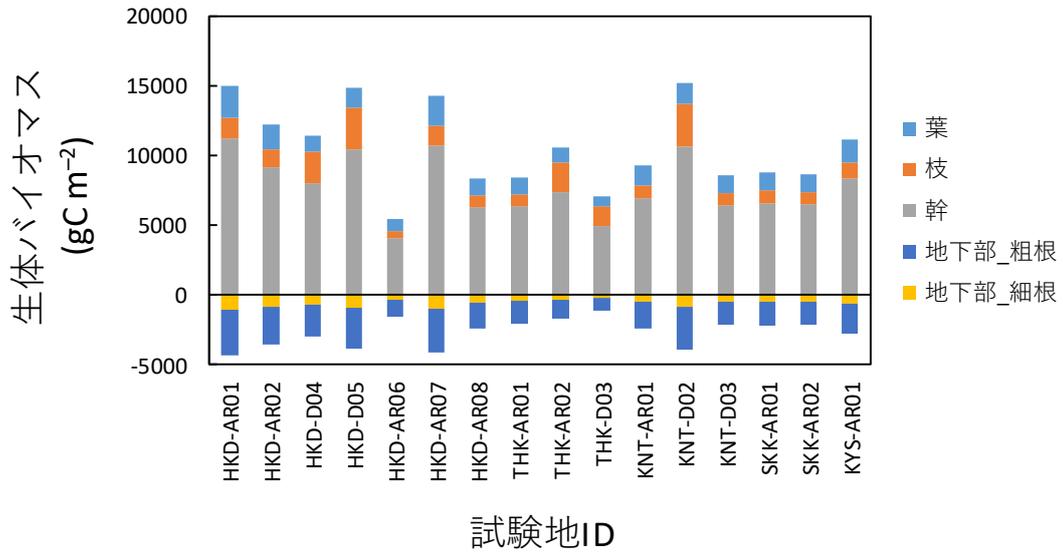


図(5)-5 算定用にCENTURYモデルから切り出した土壤炭素モデルに、文献値などから有機物供給を与える評価システムの概念図

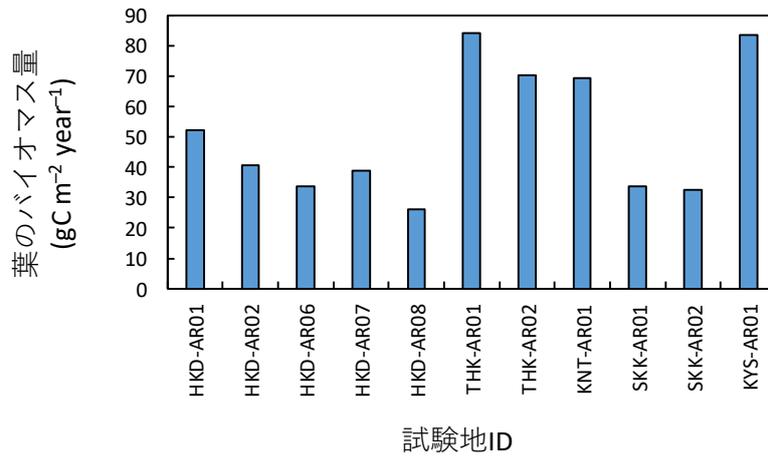
【森林におけるリター供給量の与え方】

森林におけるリター供給量は、文献値をもとにリターの各要素別（葉、枝、幹、細根、粗根）で与えた。枝と葉のデータは文献³⁾をもとにした。幹のデータは、林野庁森林吸収源インベントリー情報整備事業（2006-2010年）として実施され、都道府県別にまとめられた枯死木量データ⁴⁾をもとにして与えた。細根のデータは、ヒノキ林における細根の枯死量観測値⁵⁾を与えた。粗根については観測例が非常に乏しいため、本研究では同じ文献⁵⁾の細根枯死量と同量を与えた。

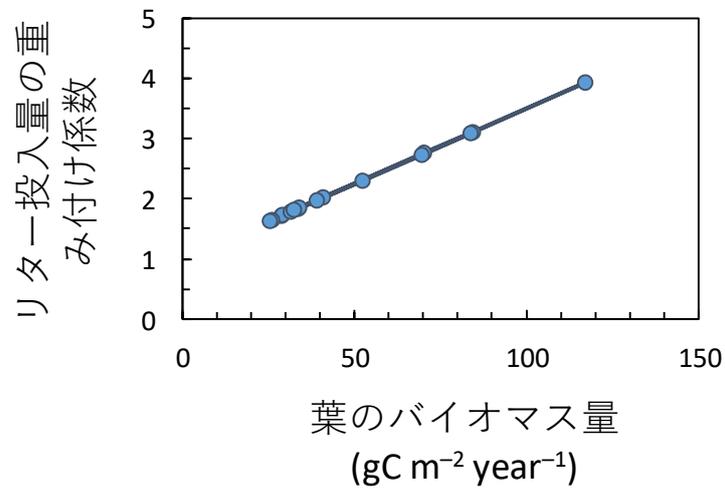
森林は農作物と異なり、数十年にわたり炭素を蓄積し続けるため、森林管理や成長速度の違いにより試験地間で生体バイオマスの違いがみられた（図(5)-6）。この違いは、土壤へのリター供給量にも影響を及ぼすものと考えられるため、生体バイオマス量に応じてリター供給量の重み付けを行った。本研究では、成長速度の違いがリター供給量に及ぼす影響を表現するために、同化器官である葉のバイオマス量を林齢で割った値（ $\text{gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ ）を用いて、文献値にもとづいたリター供給量の重み付けを行った（図(5)-7、(5)-8）。



図(5)-6 調査地の生体バイオマス量



図(5)-7 ARの調査地における葉のバイオマス量。



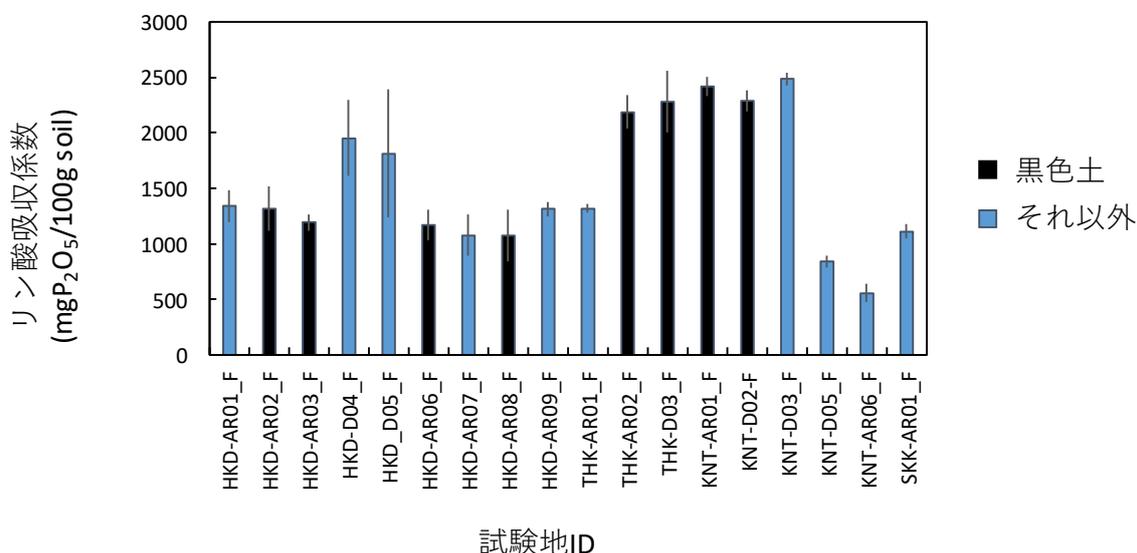
図(5)-8 葉のバイオマス量に応じたリター投入量の重み付け係数

【農地におけるリター供給量の与え方】

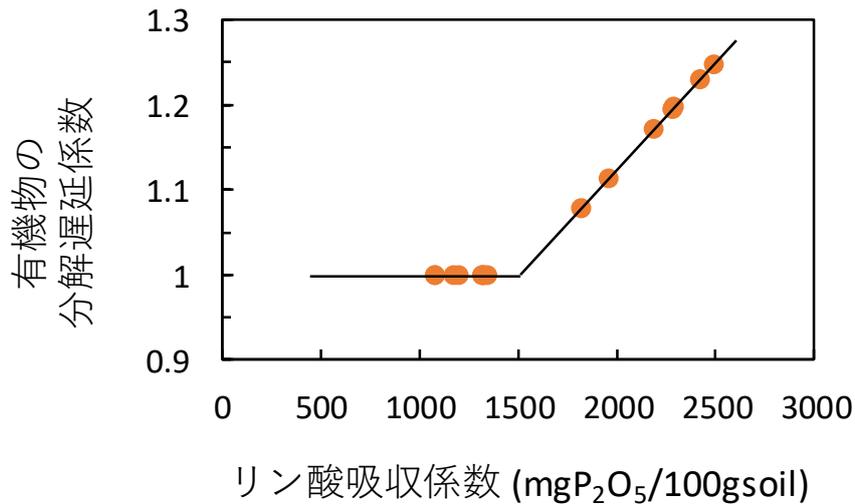
農地におけるリター供給量は、農地所有者からの聞き取り調査および文献値をもとに決めた。農地所有者からの聞き取り調査では、植物残渣のすき込みの有無と堆肥の施用量の情報を得た。この調査で不十分な情報については、農業環境変動研究センターにより整備された土壌のCO₂吸収量「見える化」サイトにおける「標準的な管理における作物の作付と残渣の量」および「標準的な管理における化学肥料と有機質肥料・堆肥の施用量」 (<http://soilco2.dc.affrc.go.jp/Q8.html>) をもとにして、リター供給量と堆肥データを与えた。なお、これらのデータは文献値⁶⁾⁷⁾が取りまとめられたものとなっている。森林から農地への転用時には、山成畑工の標準工程⁸⁾をもとに、森林の生体バイオマスおよびリターを系外にすべて持ち出すと仮定した。

【黒ボク土における有機物の分解遅延】

黒ボク土では、母材である火山灰の風化過程で生成される活性アルミニウム・鉄が腐植と結合して安定な複合体を形成し⁹⁾、他の土壌型に比べ土壌炭素の集積・分解が特異的である。これまでの研究²⁾¹⁰⁾で、土壌がリン酸を固定する程度の指標であるリン酸吸収係数と、RothCモデルの腐植画分の分解遅延係数との間に強い正の相関があり、リン酸吸収係数を用いて分解遅延係数を調整することで黒ボク土（農地土壌）における土壌炭素量を良好に再現できることが報告されている。本研究でもその分解遅延係数の調整方法¹⁰⁾を参考にし、CENTURYモデルの分解遅延係数を調整した。各調査地土壌のリン酸吸収係数を分析したところ、火山灰土壌の目安とされている1500 (mgP₂O₅ 100g soil⁻¹)を大きく超える土壌、また下回る土壌が確認された（図(5)-9）。本研究では、CENTURYモデルのpassiveプールとslowプールの分解係数を、ともに1500 (mgP₂O₅ 100g soil⁻¹)から線形で分解遅延係数が大きくなるように設定した（図(5)-10）。



図(5)-9 各試験地におけるリン酸吸収係数の分析値



図(5)-10 リン酸吸収係数と有機物分解遅延係数の関係

【気象データ】

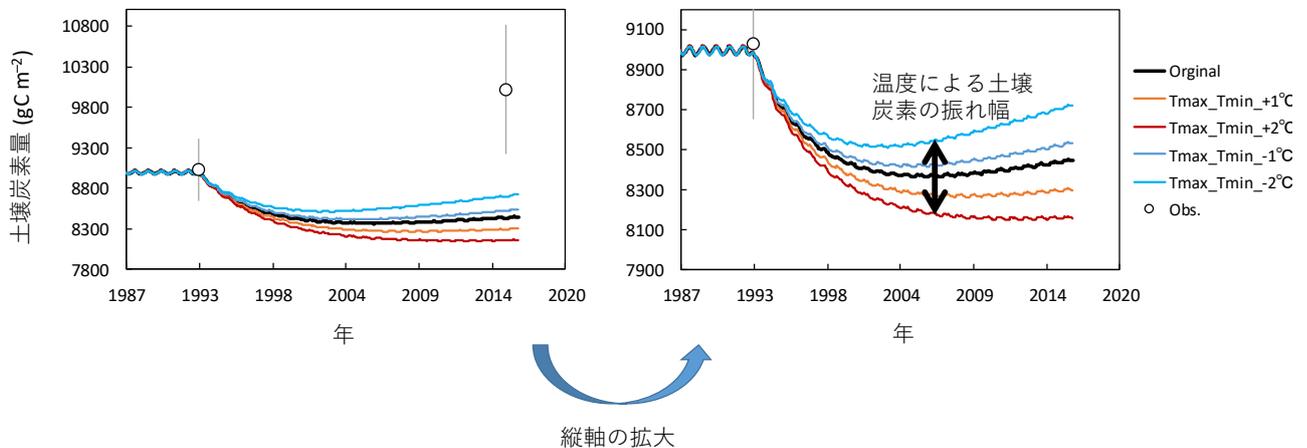
モデルに入力した気象データは、月最高・最低気温、月降水量である。これらの気象データは、各調査地の緯度・経度に応じて、気象庁が作成しているメッシュ平年値2010（1981-2010年の30年間の観測値について平均した平年値を1 kmメッシュで推定したもの）のデータを用いた。

【感度分析】

モデルの温度変化に対する応答を評価するため、感度分析を行った。日本もしくは本調査対象地域で平均的な環境条件と考えられる関東の調査地（AR: 植林地およびD: 森林伐採地）において温度に対する感度分析を行った。入力データの月最高・最低気温をそれぞれ+2度から-2度の範囲で変えて計算した。温度が高くなるほど、土地利用変化後の土壤炭素蓄積量が小さくなった（図(5)-11、(5)-12）。これは温度上昇により、土壤に蓄積された炭素の分解が促進されたためである。逆に温度低下の場合は分解が抑制されたためである。このように、同じ土地利用変化（有機物供給量）の場合でも、異なる温度環境下では土壤有機物の応答が異なることがわかる。

KNT-AR01

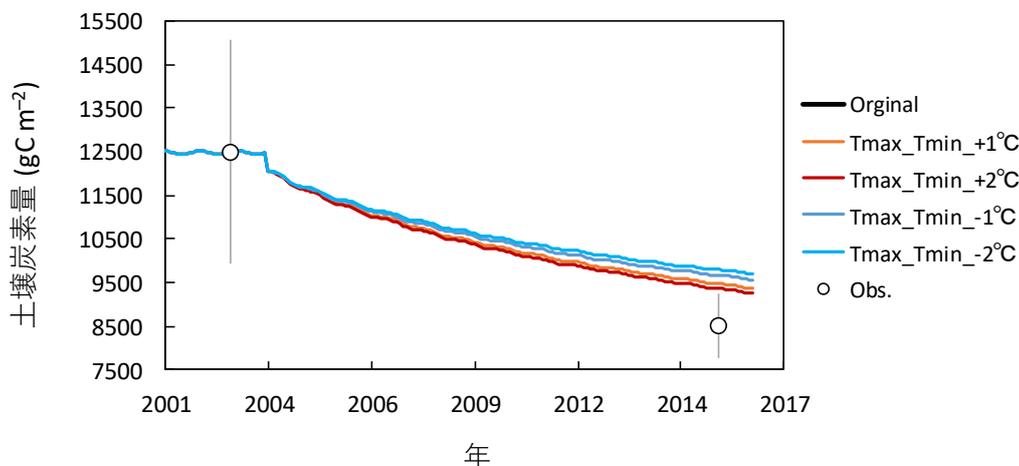
そば畑 → ヒノキ林



図(5)-11 モデルの温度に対する感度分析の結果（ARの調査地）

KNT-D02

落葉広葉樹林 → 茶畑



図(5)-12 モデルの温度に対する感度分析の結果 (Dの調査地)

モデルの広域への適用

点から面へと将来的に広げることを念頭において、このモデルを用いて面的な計算を行うことを試行した。本研究で開発した評価システムを広域で適用した。調査した地点を含む全国3地域において、既往の研究¹¹⁾が開発した土地利用変化図をもとに、100m解像度で取り扱い、土地利用変化があったところにモデルを適用した。

他の算定手法との比較

調査で得られた実測値に対して、a)モデルで推定された土壤炭素変化量、b)本研究における現地調査で得られた変化係数から計算した値、c)現行のインベントリーで用いられているTier2手法による値を比較し、それぞれの算定手法の違いを評価した。b)本研究における現地調査で得られた変化係数は、変化前の土壤炭素蓄積量に変化比率を乗じて変化を計算した。なお、c)現行のインベントリーで用いられているTier2手法は、森林、農地それぞれの土壤炭素蓄積量の間を20年間の移行期間を経て変化させるというものである。

4. 結果及び考察

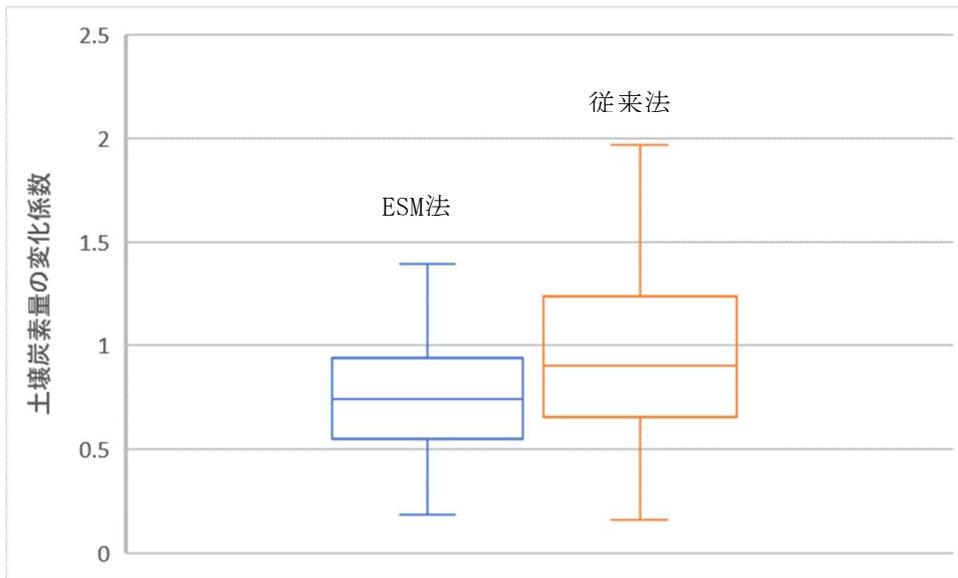
4-1. モニタリング

森林から農地へと土地利用変化が起きたことによる土壤炭素量の変化の傾向（増減）は場所ごとに異なった。変化の傾向は、その場所の気候や土壤タイプなどの環境条件や、農地になった後の営農管理、特に有機物管理の状況に大きく影響を受けるため、場所ごとに異なるのは当然のことである。それらをあえてすべて合わせて平均的な値を求めると、林地から農地に変化する際の土壤炭素量の土地利用変化係数は、全国からの38地点の平均で、深さを30cmにそろえて計算した場合は0.95となり、森林から農地への変化で土壤炭素量が約5%減少するという結果となった。一方、土壤の質量をそろえるEquivalent Soil Mass (ESM)法で計算した場合は、この値は0.75となり、森林の農地化により土壤炭素量が25%減少するという結果となった（図(5)-13）。

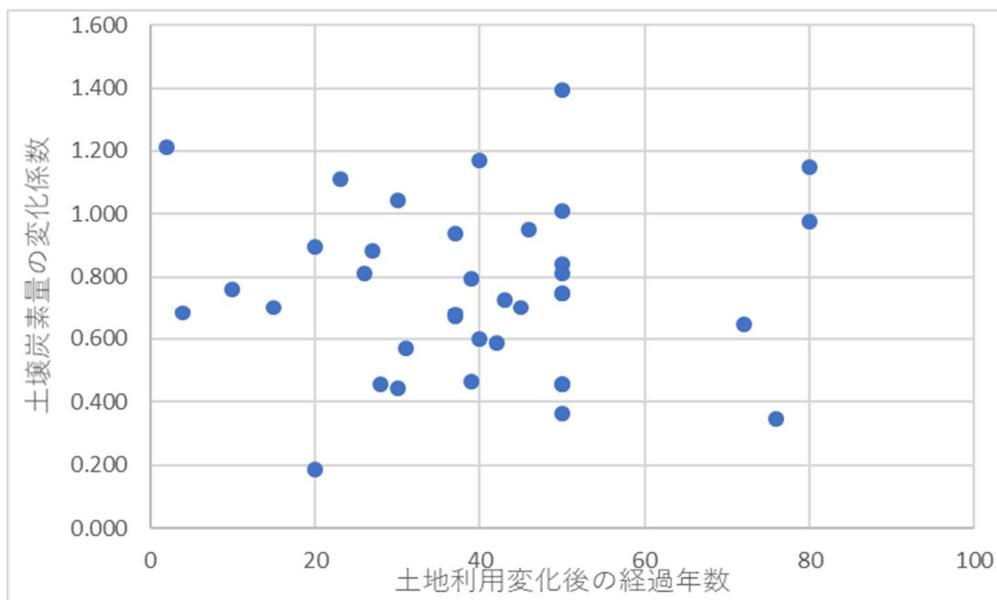
これらの係数と土地利用変化が起きてからの年数との間には明瞭な関係が得られなかった（図(5)-14）。これは、土壤炭素動態には気象、土壤タイプ、地目（畑、樹園地、草地）、有機物投入量など

様々な要因が関係しているためであると考えられる。これらの土壌炭素動態に大きく影響を及ぼすと考えられる要因を考慮してグループ分けしてデータを解析することができれば、年数との間にも傾向が見えてくることが予想される。しかし、一方で、限られたデータ数のなかでグループを細分していくと同一グループの標本数が少なすぎて十分な解析ができないという問題が生じる。今回は、農地と草地の全てを合わせても全国で38地点のデータにとどまっていることから、これ以上細分化して解析することは断念した。今後は、そのような解析を行うためにもデータを増やしていくことが重要である。

また、後述する炭素動態モデルでは、上述したような気象、土壌タイプ、地目（畑、樹園地、草地）、有機物投入量などの重要な要因はモデルの中で既に考慮されていることから、要因ごとの解析のために細分化していくと標本数が減ってしまうという問題は避けられる。このため、データを増やすことも大事であるが、合わせて今後はモデルの活用がより重視されるべきであろう。



図(5)-13 Equivalent Soil Mass (ESM) 法および従来法による森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素量の変化係数(土地利用変化係数)



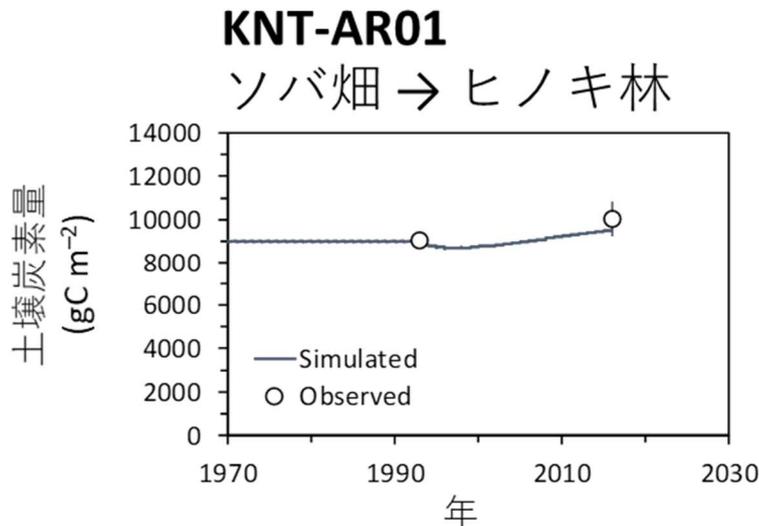
図(5)-14 土地利用変化後の経過年数と土壌炭素量の変化係数(土地利用変化係数)の関係

4-2. モデリング

調査地点への適用事例

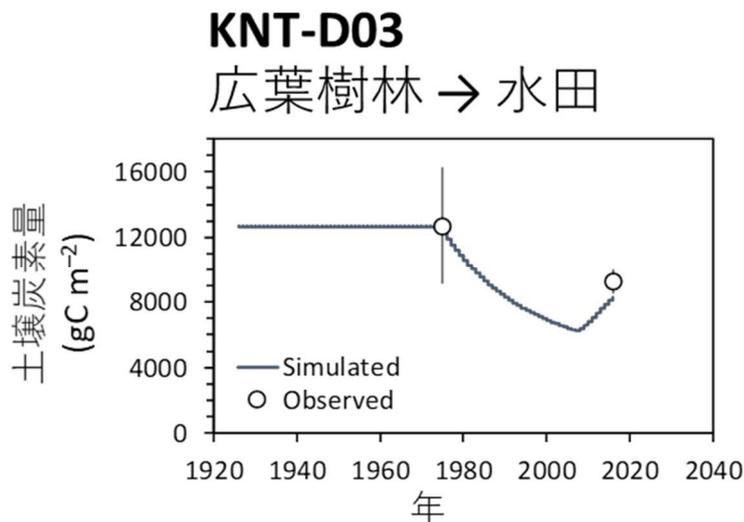
本研究の中で現地土壌調査（モニタリング）を行った地点において、モデルを適用した事例を示す。

KNT-AR01は関東の地点で、ソバ畑からヒノキ林に土地利用変化が起きた調査地である。モデルでは転用後、土壌炭素蓄積量がわずかに減少した後に増大しており、実測の変化を精度よく再現できていた（図(5)-15）。



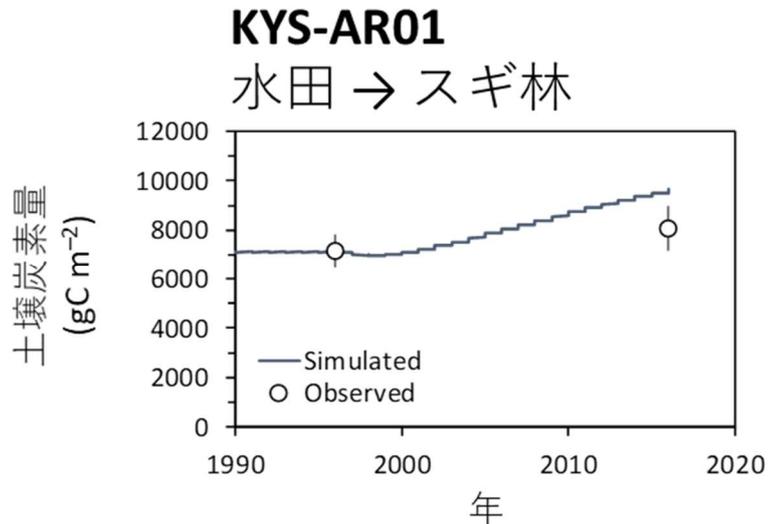
図(5)-15 KNT-AR01サイトの事例（バーはn = 6の実測値（ESM法による補正後）の標準偏差）

同じく関東地域のKNT-D03のサイトは、広葉樹林から水田に土地利用が変化した事例である。森林が伐採後に放置され大きく土壌炭素蓄積量が減少した後、水田に転用され、堆肥の投入に応じて土壌炭素蓄積量が減少から増加に転じている様子がモデルにより再現されており、実測値ともよく適合していた（図(5)-16）。



図(5)-16 KNT-D03サイトの事例（バーはn = 6の実測値（ESM法による補正後）の標準偏差）

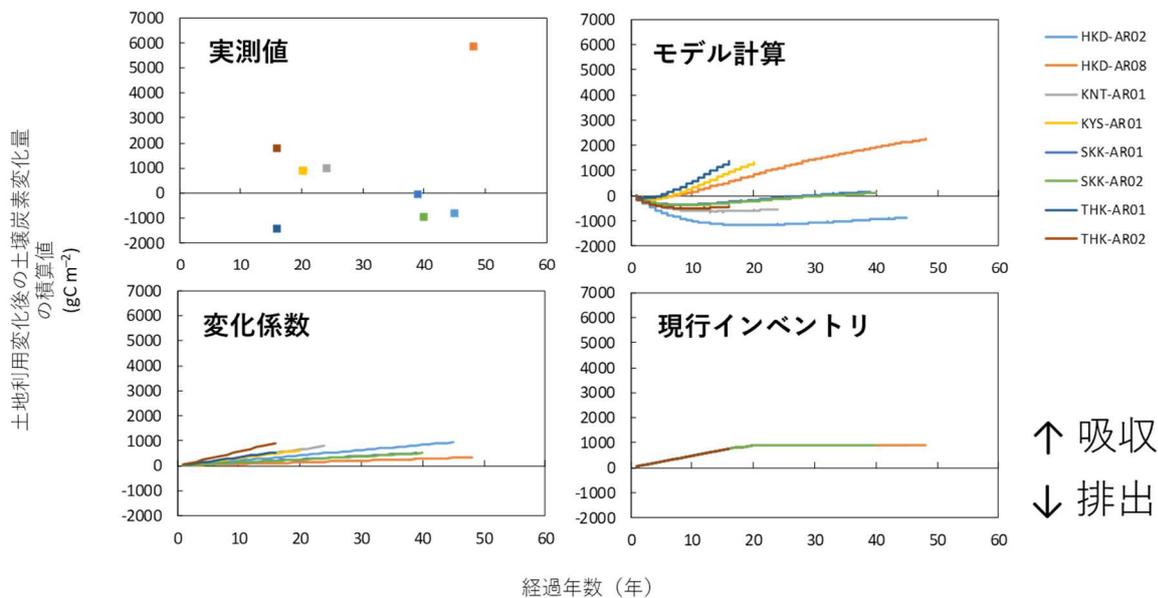
KYS-AR01は九州地域のサイトで、水田からスギ林に転用された事例である。水田からスギ林に転用された後、5年程度は土壌炭素蓄積量が定常であったがその後は増加する傾向がみられた（図(5)-17）。モデルは実測をやや過大評価しているが、増加の傾向は再現できている。



図(5)-17 KYS-AR01サイトの事例（バーはn = 6の実測値（ESM法による補正後）の標準偏差）

土地利用変化後の土壌炭素量変化を、実測値、本研究におけるモデル計算（Tier3）、本研究で新たに開発した係数（新Tier2）、現行インベントリーの方法で比較した結果を示す。図(5)-18はAR（植林地）のサイト8地点分を示している。様々な値をとる実測値に対して、サイトごとに異なる環境条件や土地管理条件を要因として含むモデルはそれらに対応した応答を示していた。一方、現行インベントリーの、国全体の平均値を用いる方法では、全ての地点で一律の値になった。本研究で開発した係数を用いた新Tier2は、現行インベントリーと比較して多様な値を示すものの、モデルほどの多様な結果を再現できない。

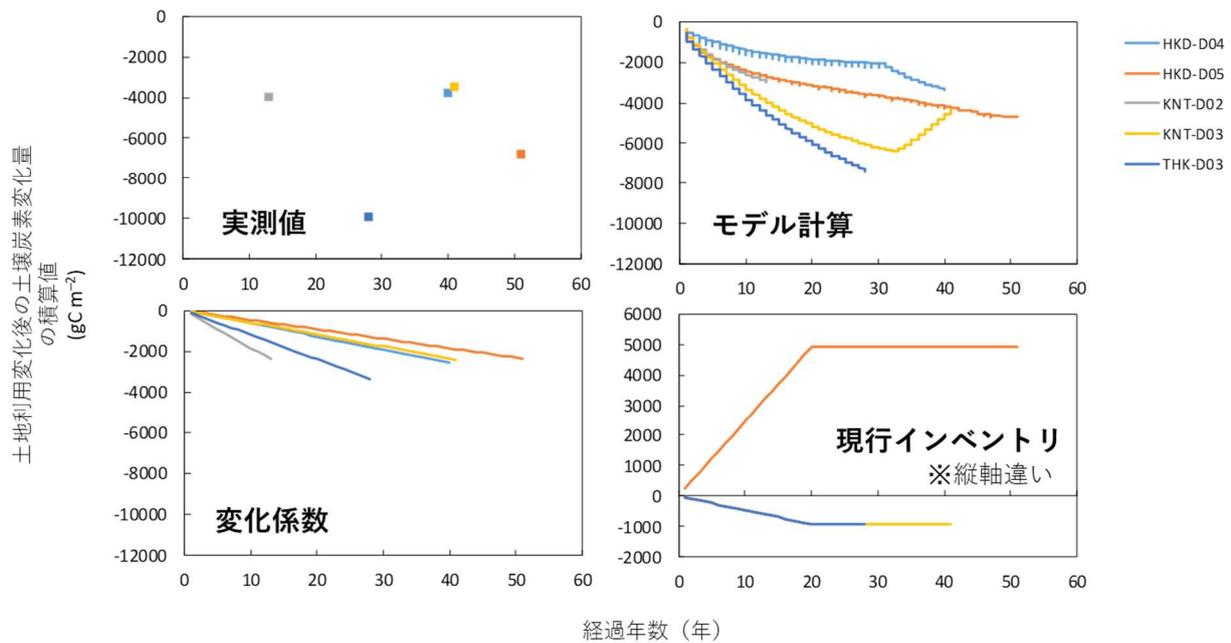
農地 → 森林



図(5)-18 ARのサイトにおける、実測値（左上）、モデル計算（右上）、新Tier2（左下）、旧Tier2（現行インベントリー法）（右下）の結果の比較

図(5)-19はD（森林伐採）のサイト5地点分の結果を示している。実測値ではすべての地点において排出となっていた。モデルや変化係数法ではこれを捉えることができているが、現行インベントリーでは変化の傾向が実測値と大きく異なっている。

森林 → 農地



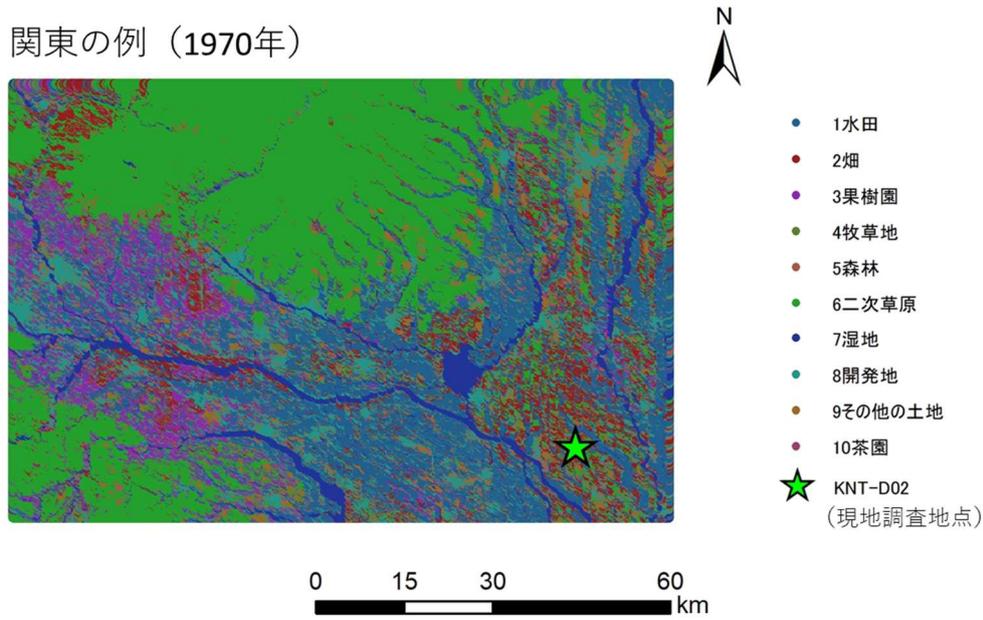
図(5)-19 Dのサイトにおける、実測値（左上）、モデル計算（右上）、新Tier2（左下）、旧Tier2（現行インベントリー法）（右下）の結果の比較

以上のように、現行インベントリーのように国全体の農地や森林の平均値を用いて計算する方法ではどの場所でも一律の値しか算出されないが、本研究で求めたESM法による土壌炭素の変化係数では場所ごとの違いが多少は表現されている。モデルを用いることにより、場所ごとの気候、土壌、有機物管理など、土壌の炭素動態に影響を及ぼす重要な要因が考慮され、より実際に近い精度の高い計算ができることが示された。

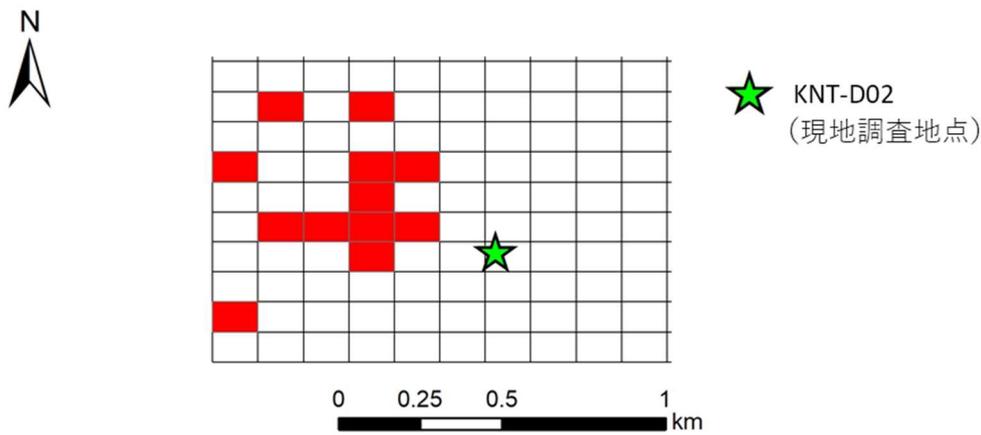
広域への適用テスト事例

図(5)-20から図(5)-23は、関東地域で広域評価を試行した事例を示している。まず図(5)-20は1970年頃の対象地域の土地利用を示している。図(5)-21の赤色で塗られた箇所は、現地調査地点を含む1km四方程度の中で土地利用変化があった地域を示している。現地調査地点が土地利用変化の対象地に含まれないのは土地利用図の精度や解像度の問題であると考えられる。

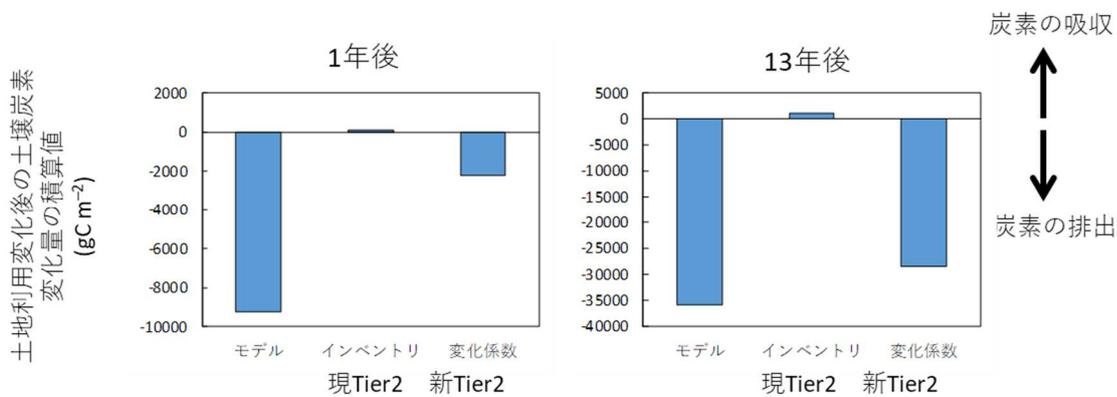
関東の例（1970年）



図(5)-20 関東の計算対象地域の土地利用図（1970年頃）



図(5)-21 調査地点(KNT-D02)を含む計算対象地

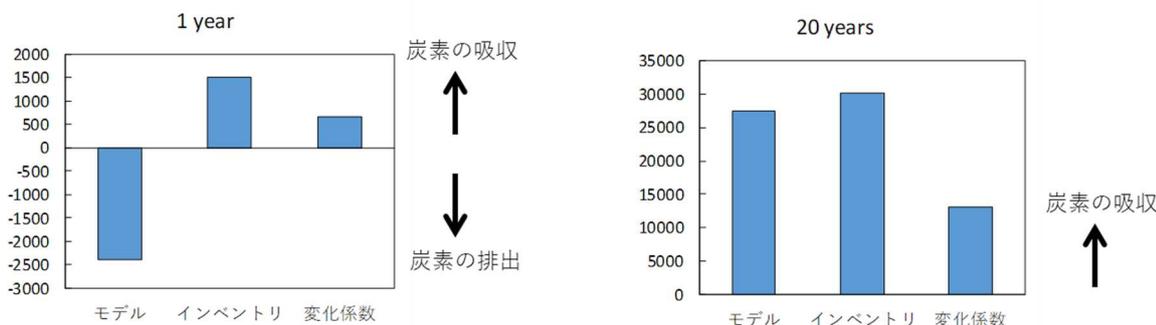


図(5)-22 KNT-D02を含む関東地域における適用事例の結果。土壤炭素変化量の手法間による違い。左は土地利用変化後1年目、右は13年目を示す。

この地域において土地利用変化が起こったメッシュに対して、モデル、現Tier2（現行インベントリ

一)、新Tier2法で変化量の積算値を比較した。1年目はモデルを用いて得られた値とTier2法で求めた値が大きく異なるが、13年目には両者は同程度になった(図(5)-22)。

次に、同様に九州地域で適用テストを行った結果を示す(図(5)-23)。この地域においては、モデルでの推定は、1年目では排出であったものが、20年目には吸収となっている。モデルでの推定では場所に応じて吸収・排出の違いを表現できているのに対し、他のTier2法では直線的に表現されている。



図(5)-23 KSY-AR01を含む九州地域における適用事例の結果。土壌炭素変化量の手法間による違い。左は土地利用変化後1年目、右は20年目を示す。

手法間のメリットデメリット

観測値とモデル、新Tier2、現行Tier2による土壌炭素蓄積量の変化を比較することにより、各算定手法のメリットとデメリットが明らかとなった。現行Tier2は、実際に土地利用変化が起きた場合のデータではなく全国平均値を用いているため、どのような場合でも同じ値を算定することになり最も硬直的で、観測値と比べ大きく値が異なった。それと比較して、新Tier2は平均としては観測値の再現性が高かった。この結果は観測結果から算出されているので、当然の結果ともいえるものの、実際の土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積量の変化を実測値として捉えていき、変化係数に利用していくことで、より実態に合った土壌炭素変化量が表現できると考えられる。しかしながら、新Tier2においては、簡便性のデメリットとして、実際には多様な森林管理・農地管理を表現することはできず、場所によっては土壌炭素量変化が大きく実測と異なる場合がある。また、実際には20年で次の土地利用の土壌炭素量に到達するとは考えにくいことに加え、その移行期間の中で土地利用が変化する可能性があるがそれには対応することができないという課題がある。

モデルによる評価は、適切にパラメータを調整することにより、より実態に合った土壌炭素動態を表現できていた。モデルの出力から、土地利用変化後の土壌炭素量の変化はTier2にあるような直線的な変化ではなく曲線的な挙動を示す。また、森林管理・農地管理のバリエーションに加え、森林の生長状況や土壌の状態は場所によって異なるため、Tier2では表現できない場所による違いをモデルで表現できる。しかしながら、モデルのパラメータを実態に合うように適切に調整することは容易ではない。多くの場合、細やかな森林管理・農地管理の情報は不足している。また、今回の調査のように、有機物の分解抑制に大きな影響を与えるリン酸吸収係数などの土壌特性は、森林では一般的には得られない。すなわち、モデルは十分な情報がある状態では他の手法よりも高いパフォーマンスを発揮するポテンシャルを有する一方で、インベントリーに必要な全国スケールでの算定への適用を考えた場合、情報の不足が原因で必ずしも最高のパフォーマンスを発揮できない可能性がある。その点、実測値に基づいた新Tier2法は、上述のようにモデルほどの細やかな違いは表現できないものの、丹念にデータを収集しデータを積み重ねていくことで、情報が乏しい状況でもおよその平均的な土地利用変化による土壌炭素の変化を表現できる。データが蓄積されれば、ある程度の場合分けができる可能性もある。

今回の課題を通じて、モデルを用いて広域評価を行うために不足している情報が洗い出された。1つ目は、土地利用変化の広域・時系列データである。今回は、既往の研究¹¹⁾で開発した土地利用変化データを用いたが、モデルを全国スケールで広域に実装するためには、より精度の高い土地利用およ

び土地利用変化の時系列データが必要になる。2つ目は、それぞれの土地利用に対応した、土壌への有機物供給量のデータも必要になる。同じ森林（または農地）でも、状態や管理は多様であり、それに応じた土壌への有機物供給量も大きく異なってくる。この土地管理の情報は土壌炭素量の変化に最も大きく影響を及ぼすものの、現在その面的な情報の整備が遅れている。加えて、森林が農地に転用される場合、例えばどの程度の根が除去されるか、どの程度客土されるかといった土地利用変化の際の施工に関する情報も不足している。3つ目は、土壌の有機物分解を制御するリン酸吸収係数に代表されるようなモデル計算に必要な土壌パラメータの広域での整備も必要である。以上のように、モデルは非常に有用なツールであるが、同時に、モデルを広域に適用するためには、面的なデータの整備が必須であることを強調したい。さらに、インベントリー報告に適用する場合には、森林と農地だけでなく、他の土地利用にも適用できるかどうかを検証する必要がある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素量の変化係数が、全国数十地点の平均値として求められた。これまで、このような異なる土地利用をまたいで土壌炭素量を比較した調査研究やデータがほとんど存在しなかったため、このデータは貴重であり、次項に述べるようなインベントリー報告に活用できるほか、科学的な意義も大きいといえる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

この課題で求めた土壌炭素量の変化係数は、現在使われている「全森林の平均土壌炭素量と全水田、畑、樹園地、草地の平均値から求めた変化係数」を置き換える係数として、今後、日本国温室効果ガスインベントリー報告書に使用されることが見込まれる。また、この係数を用いる際に導入したESM法の意義に関する記述がIPCCガイドラインの2019年一部改定作業においてBox記事として採用されることに、本プロジェクトは貢献することができた。

また、本プロジェクトでは森林と農地の両者をまたいで使用可能なCENTURYとRothCの統合土壌炭素モデルを開発した。モデルへの入力データの面的な整備や、農地と森林以外の土地利用への適用などいくつかのハードルを越えることができれば、このモデルは、IPCCガイドラインにおける高次の手法（モデルを用いたTier3）によるインベントリー報告に活用できるという将来性が見込まれる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

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>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 白戸康人、小原洋、神山和則、神田隆志、井上美那、下田星児、若林勝史、輿水美奈、丹羽勝久、古賀伸久、山根剛、草場敬、新美洋、島武男、石塚成宏、金子真司、橋本昌司、篠宮佳樹、片柳薫子、渥美和幸：日本土壌肥料学会2017年仙台大会（2017）「林地から農地への土地利用変化が表層30cmの土壌炭素量に及ぼす影響～Equivalent Soil Mass法による評価～」
- 2) Yasuhito Shirato, Hiroshi Obara, Kazunori Kohyama, Takashi Kanda, Haruna Inoue, Seiji Shimoda, Katsufumi Wakabayashi, Mina Koshimizu, Katsuhisa Niwa, Nobuhisa Koga, Tsuyoshi Yamane, Takashi Kusaba, Hiroshi Niimi, Takeo Shima, Shigehiro Ishizuka, Shinji Kaneko, Shoji Hashimoto, Yoshiki Shinomiya, Shuhei Aizawa, Eriko Itoh, Toru Hashimoto, Tomoaki Morishita, Kyotaro Noguchi, Kenji Ono, Nobuko Katayanagi and Kazuyuki Atsumi: The 21st World Congress of Soil Science (2018) “Soil carbon stock change after land use change from forest to cropland in Japan”

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「土壌が地球を救う！！～地球温暖化対策に向けて土壌の炭素貯蔵と吸収の役割を科学的に明らかにする～」（平成28年11月30日、早稲田大学日本橋キャンパス、観客70名）にて講演
- 2) 環境研究総合推進費〔2-1601〕国民対話シンポジウム「地球温暖化対策の手段としての森林・農業—土壌の役割を中心として—」（平成29年11月21日、早稲田大学WASEDA NEO ホール、観客60名）にて講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Y. Shirato and M. Yokozawa: Soil Sci. Plant Nutr., 51, 281-290 (2005), Applying the Rothamsted Carbon Model for long-term experiments on Japanese paddy soils and modifying it by simple tuning of the decomposition rate
- 2) Y. Shirato, T. Hakamata and I. Taniyama: Soil Sci. Plant Nutr., 50, 149-158 (2004), Modified Rothamsted carbon model for Andosols and its validation: Changing humus decomposition rate constant with pyrophosphate-extractable Al
- 3) 齋藤秀樹：京都府立大学農学部演習林報告、25、78-89（1981）、森林におけるリターフォール研究資料
- 4) S. Ugawa, M. Takanashi, K. Morisada, M. Takuchi, Y. Mitsuura, S. Yoshinaga, M. Araki,

- N. Tanaka, S. Ikeda, S. Miura, S. Ishizuka, M. Kobayashi, M. Inagaki, A. Imai, K. Nanko, S. Hashimoto, S. Aizawa, K. Hirai, T. Okamoto, T. Mizoguchi, A. Torii, H. Sakai, Y. Ohnuki and S. Kaneko: Bulletin of Forestry and Forest Products Research Institute, 11, 207-221 (2012), Carbon stocks of dead wood, litter, and soil in the forest sector of Japan: general description of the National Forest Soil Carbon Inventory
- 5) K. Noguchi, Q. Han, M. G. Araki, T. Kawasaki, S. Kaneko, M. Takahashi and Y. Chiba: J. Forest Res., 16, 284-291 (2011), Fine-root dynamics in a young hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) stand for 3 years following thinning
 - 6) 小川和夫、竹内豊、片山雅弘：北海道農試研報、149、57-91 (1988)、北海道の耕草地におけるバイオマス生産量及び作物による無機成分吸収量
 - 7) 尾和尚人：環境保全型農業研究連絡会ニュース、33 (1996)、わが国の農作物の養分収支
 - 8) 農林省構造改善局 (1977) 土地改良事業計画設計基準
 - 9) Shoji S, Nanzyo M and Dahlgren RA: Elsevier, Amsterdam (1993), Volcanic ash soil
 - 10) Takata Y, Ito T, Ohkura T, Obara H, Kohyama K and Shirato Y. Soil Sci. Plant Nutr., 57, 421-428 (2011), Phosphate adsorption coefficient can improve the validity of RothC model for Andosols
 - 11) Y. Yagasaki and Y. Shirato: Biogeosciences, 11, 4429-4442 (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 land-use change inventories - Part 1: Historical trend and validation based on nation-wide soil monitoring

III. Abstract

Evaluation Study on the Soil Carbon Changes through the Land Use Changes between Forest Land and Cropland and its Application to GHG Inventory

Principal Investigator: Masahiro AMANO

Institution: Waseda University

1-104 Totsukamachi, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8050, JAPAN

Tel: +81-3-850-2XXX / Fax: +81-3-5286-8219

E-mail: masahiro_amano@waseda.jp

Cooperated by: Forestry and Forest Products Research Institute, Hokkaido Agricultural Research Center, Kyushu Okinawa Agricultural Research Center, Institute for Agro-Environmental Sciences

[Abstract]

Key Words: United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), land-use change, soil carbon, National Inventory Report (NIR)

1. Background

The Japanese Greenhouse Gas (GHG) inventory of the land use sector has been separately developed by each land use sector. Because of this we have two soil inventory schemes and models of soil carbon. One model was developed by the forest sector and the other model was developed by the agriculture sector.

2. Aims

2-1. To collect soil organic carbon data and monitor its behavior when land use changes between forestry and agricultural land.

2-2. To develop a scientific model to evaluate soil carbon transitions when land use changes between the forestry and agricultural sectors. This new model is expected to be applied to an evaluation of soil organic carbon dynamics in the transition period when land is converted among different land use sectors.

3. Results

The current method of calculating the change in soil carbon through land use change, which is required in the NIR of the UNFCCC, lacks scientific data to support it. We identified changes in soil carbon stock arising from land use change by comparing paired soil samples from adjacent cropland and forest. The amount of carbon accumulated in the top 30 cm of soil measured at 31 locations across Japan in cropland was larger than that in the forest. However, if we utilized the Equivalent Soil Mass (ESM) method to compare the amount of carbon accumulated per mass of soil, forests have larger carbon stocks than cropland. The ESM method is more consistent with the conventional concept. The land use change coefficient was calculated to be 1.09 (the average ratio of soil carbon stock of the forest to that of the cropland).

In addition, 38 pairs of sites were surveyed to estimate average value of changes in soil carbon content after land use changed from forest to agricultural land across Japan. The

average land use change coefficient was 0.75 with the ESM.

We developed a soil carbon model based on (a) the CENTURY model, which is currently used for evaluating soil carbon contents of the Japanese forest sector; and (b) the RothC model, which is used for agricultural soil carbon. The new model had generally good fits with measured soil carbon data. We demonstrate a spatial evaluation of soil carbon with this new model and highlight future challenges to the application of this modeling system in Japanese NIR.