

速報

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—^{*1}

鳥山淳平^{*2}・酒井佳美^{*2}・稲垣昌宏^{*2}・石塚成宏^{*3}・橋本昌司^{*3,4}・鶴田健二^{*3}・片柳薫子^{*5}・草場 敬^{*6}

鳥山淳平・酒井佳美・稲垣昌宏・石塚成宏・橋本昌司・鶴田健二・片柳薫子・草場 敬：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—九州森林研究 72: 91–93, 2019 国家レベルの炭素収支の精度向上のためには、土地利用毎の土壌炭素蓄積量のみならず、土地利用の変化に伴う土壌炭素蓄積量のトレンドを明らかにする必要があるが、我が国における報告例は乏しい。本研究は、九州内の3地域（八女, 竹田, 都城）を対象とし、農耕地への植林に伴う、土壌炭素蓄積量の変化を明らかにすることを目的とする。その際、ペアサンプリングと Equivalent soil mass 法（ESM 法）の適用を試みた。ペアサンプリングでは農耕地と、耕作終了後の植林地（以下、森林）を対にして、土壌試料の採取を行った。ESM 法の基準となる土壌質量の平均値は、3地域において、森林が農耕地より低かった。土壌炭素蓄積量は概ね、森林（ESM 法）>森林（深さ 0–30 cm）>農地（深さ 0–30 cm）の傾向を示し、都城では、農耕地と森林（ESM 法）との間に有意な差がみられた。このように本研究では、農耕地の植林に伴う土壌炭素蓄積量の増加について、土壌の膨張効果による過小推定量を、ペアサンプリングと ESM 法の利用により解消することができた。

キーワード：土壌炭素蓄積量, 植林, ペアサンプリング, Equivalent soil mass 法

I. はじめに

農耕地および森林において土壌は、大気中の二酸化炭素を地中に隔離し、地球温暖化を緩和する重要な機能を担っている。これらの土壌は、比較的分解しやすい落葉や枯死根等の植物遺体から、より難分解性の土壌有機物まで、幅広い炭素成分を地中に留めることで、極めて大きな炭素プールを形成する。このため、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、全球レベルの炭素収支の精度向上を目的として、世界各国に土地利用毎の土壌炭素の蓄積量の報告を求めている。

我が国においては、土地面積あたりの土壌炭素蓄積量が農耕地（8.70 kgC m⁻²、普通畑、深さ 0–30 cm）が森林（8.57 kgC m⁻²、同深度）より高い点に関して、合理的な説明が求められている（国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス, 2018）。一般に植物遺体の投入量の大きい森林で、土壌炭素蓄積量が農耕地より小さくなる理由としては、サンプリング地点における地質条件の偏りが関与している可能性がある。すなわち農耕地では、土壌炭素の蓄積能の高い火山灰性土壌である黒ボク土が多く採取され、森林では非火山灰性の褐色森林土が多い可能性である。この可能性については、既存のデータセットの再解析に加え、同一の地質条件をもつ、隣接する農耕地と森林で土壌試料の採取（ペアサンプリング）を行うことで、検証が可能であると考えられる。

さらに、国家レベルの炭素収支の精度向上のためには、土地利

用の変化に伴う土壌炭素蓄積量のトレンドに関する情報収集が不可欠であるが、我が国における報告例は乏しい。また、農耕地から森林への土地利用変化（いわゆる植林）を対象とする場合、土壌の膨張効果が土壌炭素蓄積量のトレンドの推定誤差となる。土壌の膨張効果とは、森林土壌中の粗大な孔隙（二次孔隙, Hayashi *et al.*, 2006）の発達に伴い、炭素蓄積の評価対象となる土壌の厚さが年々大きくなる効果である。これに対し、近年 Equivalent soil mass 法（以下、ESM 法）と呼ばれる計算手法により、上記の推定誤差を解消できることが指摘されている（Toriyama *et al.*, 2011）。

本研究は、九州内の3地域を対象に、農耕地から森林への土地利用変化に伴う、土壌炭素蓄積量の変化を明らかにすることを目的とする。その際、ペアサンプリングと ESM 法の適用を試みる。

II. 材料と方法

調査地は、八女, 竹田, 都城の3地域である。八女は福岡県八女市の民有地、竹田は大分県竹田市の大分県農林水産研究指導センター畜産研究部内の農耕地および植林地、都城は宮崎県都城市の民有地である。3地域の概要を表1にまとめた。

現地調査は、農耕地と、耕作終了後の植林地（以下、森林）において行われた。各調査地域において、互いに 50 m 以内に位置する農耕地と森林から、それぞれ3地点を選定した。各地点で深

*1 Toriyama, J., Sakai, Y., Inagaki, M., Ishizuka, S., Hashimoto, S., Tsuruta, K., Katayanagi, N. and Kusaba, T.: Change in soil carbon stock by afforestation of agricultural land. - Case studies in Yame, Takeda and Miyakonojo -

*2 森林総合研究所九州支所 Kyushu Res. Center, For. & Forest Prod. Res. Inst. (FFPRI), Kumamoto 860-0862, Japan

*3 森林総合研究所立地環境研究領域 Dep. of Forest Soils, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan

*4 東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

*5 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 Institute for Agro-Environmental Sciences, NARO, 3-1-3 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8604, Japan

*6 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 Kyushu Okinawa Agricultural Research Center, NARO, 2421 Suya, Koshi, Kumamoto 861-1192, Japan

表1. 調査地の概要

Table1. General description of Study sites

	Yame	Takeda	Miyakonojo
Tree species	Japanese cedar	Jp. cypress	Jp. cedar
Tree age (years)	20	44	50-60
Tree height (m)	13.1-20.4	17.6-21.3	14.0-15.5
Type of agricultural land	Terraced paddy field	Corn	Fallow field ^{*3}
Elevation (m) ^{*1}	540-570	680-690	190-210
Air temperature (°C) ^{*2}	15.2	14.5	16.5
Precipitation (mm) ^{*2}	2019	1826	2482
Sampling period	2016.12	2017.12	2018.4

^{*1} GPS 計測による (Garmin 60CSx), ^{*2} アメダス観測点 (黒木, 竹田, 都城) の1981-2010年平均値 ^{*3} 5年間の休耕地

^{*1} Measured by GPS device, Garmin 60CSx, ^{*2} Mean annual data of AMeDAS points, Kuroki, Takeda and Miyakonojo, from 1981 to 2010. ^{*3} Fallow of five years

さ 40 cm, 幅 50 cm 程度の土壌を掘削し, 土壌観察断面を作成した。その後, 層位区分を行い, 石礫率を記載した。

土壌試料は, 各土壌掘削地点の 2 カ所から採取した。この結果, 農耕地と森林でそれぞれ 6 カ所の土壌試料を得た。農耕地では, 深さ 30 cm までの 3 層位から試料を得た。一方, 森林では深さ約 40 cm までの 3-4 層位から試料を得た。両者の違いは, 後述する ESM 法の利用に基づくものである。各層位で全炭素分析用の土壌試料をプラスチックバック, 細土容積重分析用の土壌試料を 3 連の金属円筒 (100 cm³) に採取した。

全炭素分析用試料は風乾処理の後, 2 mm の円孔篩を通過させ, 粗大な有機物と石礫を除いた。2 mm 以下の細土の一部について微粉碎処理を行った。微粉碎試料は 105 °C, 24 時間の乾燥条件で含水率を計測するとともに, 乾式燃焼法による全炭素分析を行った (スミグラフ NC-22 F, 住化分析センター)。細土容積重試料について, 金属円筒の内容物を 105 °C, 24 時間で絶乾し, 秤量した。その後, 水洗で 2 mm の円孔篩を通過させ, 粗大な有機物と石礫を再び絶乾し, 秤量することで細土容積重を得た。

本研究では, AG₃₀, FR₃₀, FR_{mass} の 3 つの土壌炭素蓄積量を算出する。AG₃₀, FR₃₀ はそれぞれ, 農耕地と森林の深さ 0-30 cm の土壌を意味する。一方, ESM 法にもとづく FR_{mass} は, 農耕地の深さ 0-30 cm と等しい土壌質量をもつ森林土壌である。本研究では, FR₃₀ と FR_{mass} の土壌質量の差分を, 土壌の膨張効果によるものと仮定する。

AG₃₀ の土壌炭素蓄積量 (SCS, kgC m⁻²) は,

$$SCS (AG_{30}) = \Sigma (SC_{conc} \times BD_{fine} \times TH) \quad (1),$$

により求める。SC_{conc} は層位内の細土の全炭素濃度 (gC kg⁻¹), BD_{fine} は円筒試料から得た細土容積重 (Mg m⁻³), TH は層位内の厚さ (m), Σ は深さ 0-30 cm までの全層位の総和を意味する。本研究では現場記載の石礫率が, 巨礫も含め 10% 以上となった場合, 石礫率に応じた BD_{fine} の補正を行った。一方, 現場記載の石礫率が 10% 未満の場合は, 円筒試料による石礫量の評価と重複し, 土壌炭素蓄積量を過小推定する可能性があるため, BD_{fine} の補正は行わなかった。FR₃₀ についても, AG₃₀ と同様に計算する。

FR_{mass} の土壌炭素蓄積量の計算が必要となる, 農耕地 0-30 cm の土壌質量 (SM, Mg m⁻²) は, 以下の通り求められる。

$$SM (AG_{30}) = \Sigma (SM_{horizon} \times BD_{fine} \times TH) \quad (2)$$

$$SM_{horizon} = 1 - 1.724 \times SC_{conc} \times 0.001 \quad (3)$$

SM_{horizon} は層位内の細土の全質量から, 土壌有機物の質量を差し引いた割合である。1.724 は土壌の炭素・有機物変換係数である。このとき, FR_{mass} の土壌炭素蓄積量とは, FR₃₀ の土壌炭素蓄積量に, AG₃₀ と土壌質量が等しくなるまで, 深さ 30 cm より下層の土壌炭素を足し上げたものである。より詳細な ESM 法の手順については Toriyama et al. (2011) を参照されたい。

各地点の土壌の全炭素濃度と細土容積重は, 線形モデルで土地利用変化 (LUC) と深さ (DEP) の主効果, およびそれらの交互作用 (LUC×DEP) を検定した。土壌炭素蓄積量は AG₃₀, FR₃₀, FR_{mass} の平均値について, 一元配置分散分析 (one-way ANOVA) で検定を行った。以上の統計処理は R (Version. 3.4.3, R Core Team, 2017) で行った。

Ⅲ. 結果と考察

調査地の土壌の形態的特徴として, 八女の土壌はやや礫質で, 現場記載の石礫率が 10% を超える層位が観察された。一方, 竹田と都城では石礫はほぼ観察されなかった。このため (1), (2) 式の BD_{fine} は, 八女においてのみ補正された。農耕地の耕起層 (Ap 層) の最大深度は, 八女で 20 cm, 竹田と都城で 30 cm であった。

土壌の全炭素濃度と細土容積重に関して, いずれの地域においても土地利用変化 (植林) の主効果もしくは深さとの交互作用が有意であった (表 2)。特に全炭素濃度に対する土地利用変化の主効果は, 竹田と都城で顕著であった (表 2, 図 1)。

ESM 法の基準となる土壌質量の平均値は, 3 地域において, 森林が農耕地より低かった (表 3)。農耕地に対する森林の土壌の質量比 (FR₃₀/AG₃₀) は八女, 竹田, 都城でそれぞれ 0.98, 0.70, 0.64 であった。以上の結果は, 本研究において,

表2. 土壌の全炭素濃度と細土容積重に対する土地利用変化と深さの効果

Table2. Effects of Land use change and soil depth on total soil carbon concentration and soil bulk density

Variables	Effect	Yame	Takeda	Miyakonojo
SC _{conc}	LUC		**	***
	DEP	***		
	LUC × DEP	*		**
BD _{fine}	LUC	*	***	***
	DEP	**		***
	LUC × DEP	*	***	***

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

SC_{conc} = 土壌の全炭素濃度, BD_{fine} = 細土容積重, LUC = 土地利用変化, DEP = 土壌深度

SC_{conc} = total soil carbon concentration, BD_{fine} = bulk density of fine soil, LUC = Land use change, DEP = soil depth.

表3. 土壌質量の平均値の土地利用間比較

Table3. Comparison of mean soil masses between land use types

Land use	Yame	Takeda	Miyakonojo
Agriculture	155.9	133.3	225.8
Forest	152.5	93.2	144.8

単位は kg m^{-2} 。深さは0-30cm。

The unit is kg m^{-2} . The soil depth is 0-30 cm

森林で農耕地より深い土層からサンプリングした調査手順の妥当性を示している。

土壌炭素蓄積量の平均値は、竹田が他の地域より高いレベルであった(図2)。土地利用の比較では、都城において、農耕地と森林(ESM法)との間に有意な差がみられた(図2)。一方、八女および竹田において土地利用間の有意差はなかったが、3地域において、概ね $\text{FR}_{\text{mass}} > \text{FR}_{30} > \text{AG}_{30}$ の傾向が見られた。

以上のように本研究では、農耕地の植林に伴う土壌炭素蓄積量の増加について、土壌の膨張効果による過小推定量を、ペアサンプリングとESM法の利用により解消することができた。今後の課題は、九州以外の地域で行われている調査結果と統合し、農耕地から森林への土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積の平衡到達年数を、定量的に評価することである。

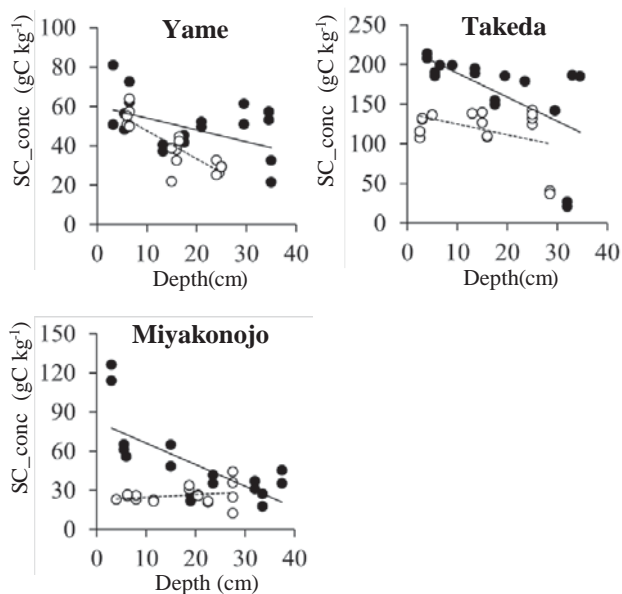


図1. 土壌の全炭素濃度の土地利用間比較

白丸と点線は農耕地, 黒丸と実線は森林。

Fig.1 Comparison of total soil carbon concentration between agricultural and forested land.

The open circle with dotted line shows agricultural land, and the closed circle with solid line shows forested land.

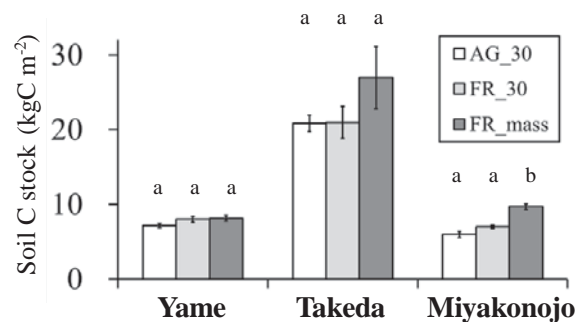


図2. 土壌炭素蓄積量の土地利用間比較

$N = 6$ 。エラーバーは標準誤差。グラフ上の小文字は平均値に関する検定結果を示す。AG_30, FR_30 はそれぞれ深さ0-30 cmの農耕地と森林の土壌, FR_mass はESM法による森林土壌を示す。

Fig.2 Comparison of soil carbon stock between land use types.

$N = 6$. Error bar is S.E. The lower case on the figure shows the result of statistical test for mean values. AG_30 and FR_30 are soils at 0-30 cm depth in agricultural and forested land, respectively. FR_mass is the forest soil defined in equivalent soil mass approach.

IV. 謝辞

本研究は、環境省環境研究総合推進費「[2-1601] 森林と農地間の土地利用変化に伴う土壌炭素変動量評価とGHGインベントリへの適用研究(代表、天野正博)」の一環として行われた。現地調査を行うにあたり、多くの方から情報提供を受けた。八女では鶴崎幸氏、檜崎康二氏(福岡県農林総合試験場)、栗原直宏氏(八女森林組合)、竹田では松本純氏、木村誠司氏(大分県農林水産研究指導センター)、古賀伸久氏(農研機構、九州沖縄農業研究センター)、都城では小田三保氏(宮崎県林業技術センター)、都城森林組合の関係者の協力を得た(所属は調査時点)。ここに深謝する。

引用文献

- Hayashi Y *et al.* (2006) J Hydro 331 : 85-102
 R Core Team (2017) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
 Toriyama J *et al.* (2011) For Ecol Manag 262 : 1659-1667
 国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス (2018) 日本温室効果ガスインベントリ報告書, 699 p, 国立環境研究所, つくば. URL : <http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html> (2018年11月7日利用)
 (2018年11月9日受付; 2018年12月11日受理)