

平成 21 年 5 月 22 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006-2008

課題番号：18310003

研究課題名（和文） 放射性炭素年代測定法を用いた土壌圏炭素シーケストレーションの定量  
 研究課題名（英文） Radiocarbon-based turnover time and sequestration of soil organic carbon in a cool-temperate deciduous forest.

研究代表者

大塚 俊之 (OHTSUKA TOSHIYUKI)

岐阜大学・流域圏科学研究センター・教授

研究者番号：90272351

研究成果の概要：

岐阜大学高山試験地の落葉広葉樹林において、放射性炭素( $^{14}\text{C}$ )を用いた土壌中有機物動態の推定を試みた。この森林では、土壌中の全炭素量は  $26.2 \text{ kgC m}^{-2}$  と非常に多かった。類似した生態系であるハーバード林では全炭素量は  $8.0 \text{ kgC m}^{-2}$  しかないが、 $^{14}\text{C} > 100\%$ である若い炭素の蓄積量は両方の森林であまり差異がなかった。モデルから土壌炭素の回転速度を計算したところ、高山サイトでは  $20 \text{ cm}$  深度以下で  $1,700\text{-}3,700$  年となり土壌の比較的浅いところに回転速度の遅い炭素が大量に含まれていることが明らかとなった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2007年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：生態学

科研費の分科・細目：環境動態解析

キーワード：放射性炭素、土壌圏炭素、陸上生態系、炭素シンク、炭素循環、高山サイト

## 1. 研究開始当初の背景

1990年代以降、陸上生態系における微気象学的な  $\text{CO}_2$  フラックス観測と、生態学的な炭素循環のプロセス調査が世界中の森林で

行われるようになった。IPCC 第三次報告書(2001)において、北半球の陸上生態系（特に温帯の落葉広葉樹林）が炭素のシンクとして重要な役割を持つことが明らかにされたが、森林生態系の炭素シーケストレーションの推定値には現段階では両者で大きな差があ

る (Curtis et al. 2002)。

この原因として、微気象学的研究にもいくつかの問題点はあるが、生態学的プロセス調査の最大の問題点は、土壌圏炭素プールの平衡 (短期的な蓄積速度が 0) を仮定して生態系全体の炭素シーケストレーションを推定している点にある。例えば、1992 年から微気象学的観測が行われているハーバード林では (Wofsy et al. 1993)、森林生態系の炭素シーケストレーションの 70-100 % が樹木バイオマスへの蓄積であり、短期的な時間スケールで見た場合、全炭素シーケストレーションに対する土壌圏炭素プールへの蓄積の寄与は小さいというのが現段階での見解である (Barford et al. 2001)。

一方で、日本の代表的なフラックス観測サイトである岐阜大学・高山試験地の冷温帯落葉広葉樹林では、炭素シーケストレーションは  $2.37 \pm 0.92 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  (1994 -2002) と見積もられ、ハーバード林と同程度である (Saigusa et al. 2005)。また、この森林では、樹木の成長量や土壌呼吸量、ササ林床植生の純一次生産量など各種生態学的なプロセス調査も広く行われている。しかし、Ohtsuka et al. (2005) によると、この落葉樹林での最近 5 年間の平均的な樹木バイオマスの増加は約  $0.5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  であり、微気象学的に推定された炭素シーケストレーションの値に比べて樹木バイオマスへの蓄積は少なく、生態系内の「どこ」に炭素が蓄積しているのか良く分かっていない。この結果は、高山試験地での土壌圏炭素プールへの蓄積が多いことを示唆しており、欧米の温帯林で得られている従来の結果と相反する傾向を示している。これは、ササ型林床を持つ湿潤な東アジア地域の温帯性落葉広葉樹林の特殊性を示唆する可能性もあるが、現段階では科学的な実証データはない。

## 2 . 研究の目的

本研究では、微気象学的な  $\text{CO}_2$  フラックスの観測により生態系の炭素収支が、すでに明らかになっている岐阜大学・高山試験地の森林生態系 (高山サイト) をフィールドとして、従来の生態学的なプロセス調査 (土壌圏炭素プールへの有機物の入力量と、プールからの有機物の分解量の測定) と、新たに地球科学

的な堆積物中の  $^{14}\text{C}$  年代測定法を応用した土壌中炭素のターンオーバー調査を併用して、地球上の炭素シンクとして重要な役割を持つ冷温帯落葉広葉樹林において、土壌圏の炭素シーケストレーションの役割を定量的に評価することを目的とする。

## 3 . 研究の方法

高山サイトにおいて、深さ 80 cm までの土壌断面を作成して、深さ別に土壌をサンプリングした。土壌の仮比重は深度別に採土管で土壌をサンプリングして測定した。さらに土壌分析用にサンプリングした土壌は実験室において比重選別 ( $2 \text{ g/cc}$ ) を行い、低比重画分と高比重画分の土壌有機物に分けた。各サンプルは加速器付質量分析計 (AMS) により  $^{14}\text{C}$  を測定した。また CN アナライザーによって炭素含有量を測定した。

土壌中有機物 (腐植) のほとんどは植物リターに由来するものである。光合成生産で  $\text{CO}_2$  を固定して出来た植物由来の有機物は、固定したときの大気中  $\text{CO}_2$  の  $^{14}\text{C}$  と等しいと仮定できる。従って、土壌有機物中の  $^{14}\text{C}$  を利用することによって、二つの異なるタイムスケールでの有機物動態の研究を可能にする。

1950 年以前に作られた有機物については宇宙線起源  $^{14}\text{C}$  を使う。大気中  $\text{CO}_2$  の  $^{14}\text{C}$  = 0 ‰ で一定 (厳密には一定ではない) なので  $^{14}\text{C}$  の半減期を利用すると有機物の年代測定を行なうことが可能となる。例えば、pMC = 50 % であれば 5730 年前に生産された有機物である。これは Libby age (yrsBP) と呼ばれ、精度は ± 数十年。

一方で 1950 年以降に作られた新しい有機物には、核実験起源  $^{14}\text{C}$  を使う。大気核実験により、大気中  $\text{CO}_2$  の  $^{14}\text{C}$  は劇的に上昇し (bomb peak, 1964)、その後は減少している。これを利用すると生態系内の炭素プール (有機物) やフラックス ( $\text{CO}_2$ ) の  $^{14}\text{C}$  測定により、その物質の年齢を推定できる。年間の減少速度 (約 8 ‰) よりも、測定精度が高ければ (± 4-8 ‰)、その炭素が固定された年代を 1-2 年の精度で決定できる。また平衡状態にある SOM プールの  $^{14}\text{C}$  は回転速度 (TT) が早ければ、大気変化に近くなるが、TT が遅ければ、 $^{14}\text{C}$  変化も遅い。このモデルを使う

と、現在の SOM の  $^{14}\text{C}$  の値から SOM プールの TT を計算することが出来る。

#### 4. 研究成果

表 1 に高山サイトでの、B 層（深度 80cm）までの有機炭素量と、 $^{14}\text{C}$  の測定結果を示す。

表1. 高山試験地・冷温帯落葉広葉樹林の深度別土壌サンプル中の  $^{14}\text{C}$ 。Lは低密度のHは高密度の土壌有機物を示す。pMCは1950年の植物サンプル中の  $^{14}\text{C}$ を100としたときの割合。

層位	土壌深度 (cm)	炭素量 (gC m <sup>-2</sup> )	pMC (%)	$^{14}\text{C}$ (‰)
Oe+A	0-5 (L)	2353	112.2	122.7
	0-5 (H)			
A	5-10 (L)	2167	110.1	101.7
	5-10 (H)			
A	10-15 (L)	2482	101.0	10.7
	10-15 (H)			
A+AB	15-20 (L)	2010	96.0	-39.4
	15-20 (H)	242	92.7	-72.4
AB	25-30 (L)	2301	80.4	-195.5
	25-30 (H)	176	73.0	-269.5
AB	40-45 (L)	1131	73.3	-266.5
	40-45 (H)	975	69.5	-304.5
B	70-75 (L)	46	70.7	-292.5
	70-75 (H)	599	62.8	-371.6

B層までの総炭素量は、26.2 kg C m<sup>-2</sup>に達し、森林土壌としてはかなり多くの炭素を蓄えていることが明らかとなった。表層 10 cm までのすべての有機物は  $^{14}\text{C} > 100\text{‰}$ であった。これは最近 50 年程度に蓄積した若い有機物 (bomb C)であり、全炭素量の 17% を占めていた。一方で 15 cm 以上の深度では高密度のものも低密度のものも、すべての有機物が  $^{14}\text{C} < 0\text{‰}$ であり、 $^{14}\text{C}$  崩壊が起こるのに十分なくらい (2500-3000 年以上) 有機物が土壌中に滞留していたことを示した。その中間の有機物は  $0 < ^{14}\text{C} < 100\text{‰}$ であり、数十～100 年程度の滞留時間であるか、滞留時間の遅い有機物と早い有機物の混合である可能性もある。

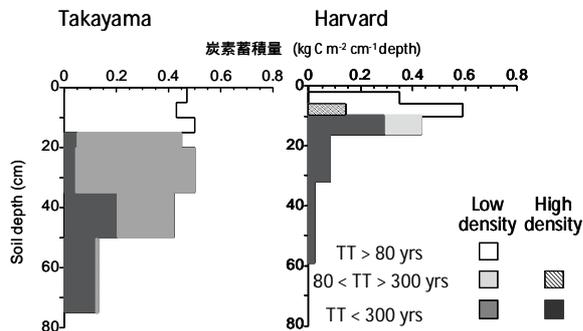


図 1. 高山サイトとハーバード林の温帯性落葉広葉樹林における、深度別の炭素蓄積量と、低密度画分と高密度画分の土壌有機物の  $^{14}\text{C}$  の比較。

同様の調査が行われている、ハーバード林 (Gaudinski et al. 2000) と、高山サイトの落葉広葉樹林において、土壌有機炭素含量と、土壌有機物の深度別の回転速度 (ターンオーバータイム: TT) を比較した (図 1)。

高山サイトの土壌中の総炭素量は 26.2 kg C m<sup>-2</sup>であり、ハーバード林の 8.0 kg C m<sup>-2</sup>に比べて 3 倍以上の有機炭素量を持っていた。一方で、若い有機物 (bomb C)は高山サイトが 4.5 kg C m<sup>-2</sup>に対して、ハーバード林は 3.8 kg C m<sup>-2</sup>であり、両者の蓄積量の違いは小さかった。また高山サイトでは、15 cm 深度以下の有機物では、低密度画分であるにもかかわらず、滞留時間の長い古い炭素が非常に多く蓄積しており、このことが総炭素量の多さの一つの原因となっていた。一方でハーバード林では 10 cm 以下の有機物のほとんどは高密度画分であり、古い炭素が見られたが、その量は相対的に小さかった。

表2. 高山試験地・冷温帯落葉広葉樹林での土壌有機物の回転速度の推定。

土壌深度 (cm)	回転速度 (TT: 年)	
	低密度	高密度
0-5	55	
5-10	74	
10-15	253	
15-20	330	610
25-30	1760	2530
40-45	2490	2930
70-75	2780	3740

表 2 には高山サイトにおいて、 $^{14}\text{C}$  を用いて、土壌有機物の回転速度 (年) を推定した結果を示した。高山サイトでは比較的浅い深度でも、かなり TT の長い炭素が出現することが特徴であり (例えば 25 - 30cm 深度で 2,530 年) また低密度画分であるにもかかわらず、かなり TT の長い炭素が多く含まれていた。

プロセス調査による各炭素プールへの定量的評価を同時に行った結果、樹木の葉の生産量と分解者呼吸量は年々変動が少なく、樹木の木質部 NPP には大きな年々変動が見られた (Ohtsuka et al. 2009)。またフラクスタワーによる森林全体での炭素吸収量 (NEP) の年々変動と樹木の木質部 NPP の年々変動には有意な正の相関が認められた。このことは、この森林では樹木生産量が森林全体の炭素吸収量の変動を制御していると考えられる。

一方で、この森林は落葉樹林であるために、木質部 NPP は実質的に樹木バイオマスに蓄積されていく炭素量を意味する。木質部 NPP と NEP はパラレルな変動を示したものの、両者には依然として  $1 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  程度の差異が見られた。このことは、森林全体で吸収された  $\text{CO}_2$  のうち  $1 \text{ tC}$  程度が生物バイオマスではなく、非生物的プールに継続的に蓄積していることを示唆するものである。このように日本の冷温帯の土壤には、欧米の同様の気候帯の地域と比較して有機物を多く貯めるような性質があると考えられた。

この研究の重要な課題である、炭素のシークエストレーションの定量については、現在考えられているモデルが土壤炭素の平衡状態を仮定したモデルであること、また比較的浅い深度にも関わらず、TT の長い有機炭素が大量に含まれていることなどから、土壤炭素の化学的な性質を調べると共に、日本の森林土壤に合わせた土壤炭素動態モデルの構築が今後は必要である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

1. Ohtsuka, T., Saigusa, N. and Koizumi, H. (2009) On linking multiyear biometric measurements of tree growth with eddy covariance-based net ecosystem production. *Global Change Biology* 15, 1015-1024. (査読有)
2. Ohtsuka, T., Hirota, M., Zhang, X., Shimono, A., Senga, Y., Du, M., Yonemura, S., Kawashima, S. and Tang, Y. (2008) Soil organic carbon pools in alpine to nival zones along an altitudinal gradient (4400-5300 m) on the Tibetan Plateau. *Polar Science* 2, 277-285. (査読有)
3. 大塚俊之・横澤隆夫・大竹 勝 (2008) 富士北麓青木ヶ原溶岩流上における針葉樹林の構造と動態. *植生学会誌* 25, 95-107. (査読有)
4. Muraoka, H., Noda, H., Uchida, M., Ohtsuka, T., Koizumi, H. and Nakatsubo, T. (2008) Photosynthetic characteristics and biomass distribution of the dominant vascular plant species in a high Arctic tundra ecosystem, Ny-Alesund, Svalbard: implications to their role in ecosystem carbon gain. *Journal of Plant Research* 121, 137-145. (査読有)
5. Ohtsuka, T., Mo, W., Satomura, T., Inatomi, M. and Koizumi, H. (2007) Biometric based carbon flux measurements and net ecosystem production (NEP) in a temperate deciduous broad-leaved forest beneath a flux tower. *Ecosystems* 10, 324-334. (査読有)
6. Ito A., Inatomi M., Mo W., Lee M.-S., Koizumi H., Saigusa N., Murayama S. and Yamamoto S. (2007) Examination of model-estimated ecosystem respiration by use of flux measurement data from a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in central Japan. *Tellus*, 59B: 616-624. (査読有)
7. Satomura T., Fukuzawa K. and Horikoshi T. (2007) Considerations in the study of tree fine-root turnover with minirhizotrons. *Plant Root* 1: 34-45. (査読有)
8. Noguchi K., Konôpka B., Satomura T., Kaneko S., Takahashi M. (2007) Biomass and production of fine roots in Japanese forests. *Journal of Forest Research* 12: 83-95. (査読有)

[学会発表](計 15 件)

1. 大塚俊之 (2009.3) アカマツ林の炭素循環 富士北麓剣丸尾アカマツ林 . 日本生態学会第 56 回大会 (岩手)
2. 志津庸子・大塚俊之 (2009.3) 落葉樹皆伐跡地における 5 年間の群落構造変化と種特性 . 日本生態学会第 56 回大会 (岩手)
3. 根岸正弥・廣田充・中野隆志・大塚俊之・山村靖夫 (2009.3) 富士北麓冷温帯アカマツ林における土壤呼吸に占める根呼吸の推定 . 日本生態学会第 56 回大会 (岩手)
4. T. Ohtsuka, M-S. Lee, Y. Yashiro, M. Negishi, H. Koizumi (2008.7) Net primary production and carbon allocation patterns in red pine, Japanese cedar, and broadleaved forests beneath flux towers. "Integrating and scaling processes for plot to landscape ecosystem study" - toward the interdisciplinary understanding and networking - (Gifu, Japan).
5. 内田昌男・近藤美由紀・大塚俊之・村山昌平 (2008.3) 核実験由来大気  $^{14}\text{CO}_2$  を用いた森林土壤有機炭素のレジデンスタイムの推定と土壤呼吸 (微生物・根) の分離: 温暖化影響土壤圏炭素の脆弱性評価のための手法開発 . 第 10 回 AMS シンポジウム (東京大学)
6. 高橋健太・廣田充・根岸正弥・大塚俊之 (2008.3) 遷移段階の異なる森林における土壤呼吸の違いとその要因の解明 . 日本生態学会第 55 回大会 (福岡).

7. 根岸正弥・高橋健太・大塚俊之(2008.3) 富士北麓アカマツ林における根呼吸の評価. 日本生態学会第55回大会(福岡).
8. 岸本(莫)文紅・米村正一郎・李美善・横沢正幸・内田雅己・近藤美由紀・小泉博(2008.3) 冷温帯落葉広葉樹林の土壤呼吸の季節変化における土壤水分の寄与. 日本生態学会第55回大会(福岡).
9. M. Kondo, M. Uchida, T. Ohtsuka, S. Murayama, Y. Shirato (2007.12) Radiocarbon-based turnover time estimates of soil organic carbon in a cool-temperate deciduous forest in Asian monsoon region. AGF Fall meeting (San Francisco, USA).
10. Kishimoto (W. Mo) A., Yonemura S., Lee M.-S., Yokozawa M., Uchida M., Kondo M. and Koizumi H. (2007.10) Contribution of soil water content to seasonal variation in soil CO<sub>2</sub> efflux in a Japanese cool-temperate oak-birch forest. International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation. AsiaFlux Workshop 2007, (Taoyuan, Taiwan).
11. 大塚俊之・内田昌男・近藤美由紀・村山昌平・松田あゆり・安立美奈子・白戸康人・米田穰・柴田康行(2007.3) 放射性炭素同位体 (<sup>14</sup>C)を用いた、土壤圏炭素の平均滞留時間の推定. 日本生態学会第54回大会(愛媛大学).
12. 根岸正弥・安立美奈子・山口貴広・高橋健太・大塚俊之(2007.3) 富士北麓冷温帯アカマツ林における土壤圏炭素動態. 日本生態学会第54回大会(愛媛大学).
13. 高橋健太・廣田充・早瀬進・根岸正弥・大塚俊之(2007.3) 根呼吸の貢献度に注目した遷移段階の異なる森林における土壤呼吸速度の空間的不均一性の解明. 日本生態学会第54回大会(愛媛大学).
14. 里村多香美(2007.3) 植物体地下部の動態はどの程度土壤炭素フラックスに寄与しているのか? 日本生態学会第54回大会(愛媛大学).
15. 岸本(莫)文紅・内田雅己・大塚俊之・小泉博(2007.2) 土壤圏を中心とした森林生態系の炭素収支および土壤呼吸の長期モニタリング. 第24回土・水研究会「物質循環の基盤としての土壤 - 炭素循環における役割 - 」(つくば).

〔図書〕(計 1 件)

1. 大塚俊之(2008)「光合成研究法」低温科学 67巻, 北海道大学低温科学研究所・日本光合成研究会共編, 森林生態系の純一次生産量の測定手法. pp. 119 - 127.

〔その他〕

2008年12月20日岐阜新聞朝刊記事  
「樹木の幹成長量多い年CO<sub>2</sub>吸収量増加」

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

大塚俊之(OHTSUKA TOSHIYUKI)  
(岐阜大学流域圏科学研究センター教授)  
研究者番号: 90272351

### (2)研究分担者

内田昌男(UCHIDA MASAO)  
(独立行政法人国立環境研究所・  
科学研究領域・研究員)  
研究者番号: 50344289

### (3)連携研究者

里村多香美(SATOMURA TAKAMI)  
(香川大学農学部・協力研究員)  
研究者番号: 00557019

近藤美由紀(KONDOH MIYUKI)  
(独立行政法人国立環境研究所・研究員)  
研究者番号: 30467211

岸本(莫)文紅(KISHIMOTO(MO) AYAKA)  
(独立行政法人農業環境技術研究所・物質  
循環研究領域・主任研究員)  
研究者番号: 60334033