

ヒノキ-カラマツ林におけるリター層-土壌層間炭素供給機構の解明  
The elucidation of carbon supply mechanism between litter and soil in a Cypress-Larix forest

伊藤健二・森泉 純\*・山澤弘実  
Kenji ITO, Jun MORIIZUMI, Hiromi YAMAZAWA

名古屋大学・院・工 (Graduate School of Engineering, Nagoya University)

\*Correspondence to: Jun MORIIZUMI; E-mail: j-morizumi@nucl.nagoya-u.ac.jp

**Abstract**

To elucidate carbon supply mechanism in forest soil, the spatial and depth variations in organic carbon content and carbon isotope ratio ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\Delta^{14}\text{C}$ ) in litter and soil were measured by the field observation, and the temporal variations in evolution rate and  $\delta^{13}\text{C}$  value of  $\text{CO}_2$  derived from organic matter decomposition were measured by the incubation experiment. We selected a mixed forest of cypress and pine trees as a research site (Inabu, Toyota City, Aichi Pref., 35°198' N, 137°574' E) with an altitude of 1200 m above sea level. In the field observation, while the litter falls were supplied evenly to forest floor, the inhomogeneous distribution of organic carbon was formed at L layer and the distribution of surface soil was not influenced by the inhomogeneous distribution of L layer above it. The  $\delta^{13}\text{C}$  value of L layer was 2.5‰ less than that in surface soil. The  $\Delta^{14}\text{C}$  value of surface soil was negative. It suggested that the accumulation rate of organic carbon into surface soil was slow. In the incubation experiment, the evolution rates of  $\text{CO}_2$  from L layer decreased moderately after 20 d incubation, on the other hand that of surface soil showed rapid decrease for 10 d after just starting the incubations, and then they decreased moderately. During incubations, the  $\delta^{13}\text{C}$  values of  $\text{CO}_2$  from L layer were always higher than  $\delta^{13}\text{C}$  value of total organic carbon in L layer. The mismatch of  $\delta^{13}\text{C}$  values between L layer and surface soil organic carbon could not be explained by the  $\delta^{13}\text{C}$  value of L layer decomposition residues estimated from the incubation experimental results. It suggested the carbon balance in surface soil at this forest could not be explained by the carbon supply process that surface organic carbon in soil was formed by L layer residues.

*Keywords: litter decomposition; soil organic matter decomposition; carbon cycle*

キーワード：リター分解；土壌有機物分解；炭素循環

1. はじめに

森林は陸域生態系最大の  $\text{CO}_2$  吸収源かつ放出源である。IPCC 報告書<sup>[1]</sup>によると、大気-陸域生態系間の  $\text{CO}_2$  交換量は化石燃料起源  $\text{CO}_2$  放出量の約 20 倍であり、現状は吸収量が放出量を上回り、森林は正味の炭素吸収源として働くと考えられている。森林土壌は森林生態系内に存在する有機炭素量の約 3/4 を保持し、炭素貯蔵源として機能している。したがって、気候変動の将来予測を目的とした全球炭素循環の推定には森林土壌への炭素供給機構の理解が重要である。森林土壌への主要な炭素供給経路は落葉落枝によって地表に堆積した植物遺体(リター)と生根からの分泌物、枯死根である。特に陸上植生が十分に生長した壮年の落葉性樹林では、光合成により植物体中に固定され

た有機炭素のほとんどがリターとして地表に供給されるため、土壌の炭素収支を見積もる上でリターの炭素動態が重要な役割を果たしている。

光合成による有機物の合成、微生物による有機物分解過程での同位体分別効果により、落葉落枝が降り注いだ直後のリターフォール、地表に堆積し有機物分解を経験したリター層(L層)、L層直下の表層土壌はそれぞれ異なる炭素同位体比を示す。したがって、微生物分解に伴う炭素同位体比の変化を把握することで、マスバランスを用いたL層と表層土壌における炭素動態の評価が期待される。

本研究ではL層と表層土壌間の炭素供給機構を解明することを目的とし、現地での観測と室内培養実験を行った。現地観測ではリターフォール、L層、表層土壌における有機炭素量水平分布及び炭素同位体比( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\Delta^{14}\text{C}$ )土壌深さ分布の測定を、室内培養実験ではL層、表層土壌の $\text{CO}_2$ 放出率及び $\delta^{13}\text{C}$ 値の経時変化の測定を行った。

## 2. 現地観測

実環境下での表層土壌への炭素蓄積過程における有機炭素蓄積速度、 $\delta^{13}\text{C}$ 値の変動を把握するために、リターフォール、L層、表層土壌の有機炭素量水平分布と炭素同位体比の土壌深さ分布の測定を2012年9月から2013年12月にかけて愛知県豊田市稲武町(35°198' N, 137°574' E, 標高 1200m)の名古屋大学大学院生命農学研究科附属フィールド科学教育研究センター内のヒノキ(*Japonica Cypress*)-カラマツ(*Larix Leptolepis*)混合林で行った。林内4m×4mの範囲を16等分した16メッシュ毎にリターを採取した。各メッシュから初回に採取したリターを地表に堆積し数年間の有機物分解を経験したL層とし、リターを取り去った地表面に新たに降り積もった採取2回目以降に採取したリターをリターフォールとした。表層土壌はリターを取り除いた地表面を土壌深さ0cmとし、直径5cm、土壌深さ5cmの円筒コアサンプラーを用いて1メッシュにつき4カ所採取した。土壌深さ方向の有機炭素、炭素同位体比分布を測定するため、直径5cm、土壌深さ25cmまで土壌コアを別途採取し、5cm区間ごとに分割した。採取した試料は乾燥させ、有機炭素量、炭素同位体比の測定を行った。有機炭素量の測定には名大年代測定総合センターのCNコーダー(MT-700, Yanaco)を、炭素同位体比の測定には安定同位体質量分析計(Finnigan MAT 252, Thermo Fisher Scientific)とタンデトロン加速器質量分析計2号機(Tandetron-2, HVEE)を用いた。

各メッシュのリターフォール-L層、L層-表層土壌の有機炭素量に有意な相関は見られなかった。ばらつきの指標として、16メッシュ平均値に対する相対標準偏差を計算すると、リターフォールが12.9%、L層が42.6%、表層土壌が20.9%であった(図1)。

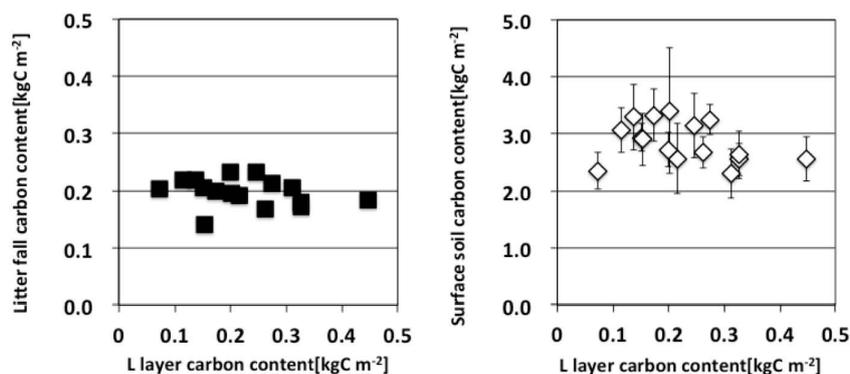


図1 各メッシュにおける有機炭素量比較(左:リターフォール-L層、右:L層-表層土壌)

観測結果から実環境下での炭素供給過程について、次のことを明らかにした。(1)リターフォールは地表面に対して水平方向ほぼ均一に供給された、(2)地表面に堆積しているL層の段階で有機炭素量の不均一な空間分布が形成された、(3)L層有機炭素量の空間不均一性は表層土壌有機炭素量の空間分布に対して有意に寄与しなかった。

L層採取後の地表面状態を観察すると、目視によりL層が多いメッシュにおいて、地表面を細かい根がより多く被覆している傾向が見られた。採取した表層土壌試料を純水中で0.85mmメッシュのふるいにかけて、直径2mm以下の根の質量を根量として測定した。根量とL層堆積量は正の層間( $R^2=0.6497$ )を示した(図2)。細根が地表面を覆うことで地表面状態が粗くなり、リターの流出が抑制される、細根が枯死することでリターフォール以外のL層へのリター供給源となるなどの過程を経て、地表面の根被覆がL層における不均一な分布の形成要因のひとつとして働いたと考えられる。

炭素同位体比( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\Delta^{14}\text{C}$ )の土壌深さ分布の測定結果を図3に示す。 $\delta^{13}\text{C}$ 値はL層が表層土壌に比べ2.5‰程度低い値を示した。この要因として(1)Suess効果、(2)植生の変化に伴うL層 $\delta^{13}\text{C}$ 値の変化、(3)L層分解残渣が高い $\delta^{13}\text{C}$ 値を示す、などが考えられる。化石燃料の消費に伴い、大気中の $\delta^{13}\text{C}$ 値が1.5‰程度低下したこと(Suess効果)が報告されており<sup>[2]</sup>、今回対象とした森林でもL層、表層土壌間の $\delta^{13}\text{C}$ 値の差に最大1.5‰の寄与を与えていたと考えられる。しかしSuess効果だけではL層、表層土壌の $\delta^{13}\text{C}$ 値の差のすべてを説明することが出来なかったことから、可能性(2)、(3)についても生じていた可能性がある。可能性(3)について、培養実験結果から検討を行った(第4節)。 $\Delta^{14}\text{C}$ 値は大規模な大気圏内核実験の開始前である1950年を基準として、森林生態系に炭素が固定された年代が1950年以降の場合は正の値、1950年以前の場合は負の値を示す。したがって演習林発足(1955年)以降に形成されたL層から表層土壌へと供給された有機炭素は正の $\Delta^{14}\text{C}$ 値を示す。しかし測定した表層土壌0-5cmの $\Delta^{14}\text{C}$ 値は常に負の値だった。この結果は表層土壌全有機炭素に対するL層からの炭素供給の寄与が小さいことを示している。 $\Delta^{14}\text{C}$ 値の土壌深さ分布測定からL層の有機炭素量空間不均一性が表層土壌空間分布に対して寄与しなかった要因として、表層土壌への炭素蓄積速度が遅かった可能性が考えられる。

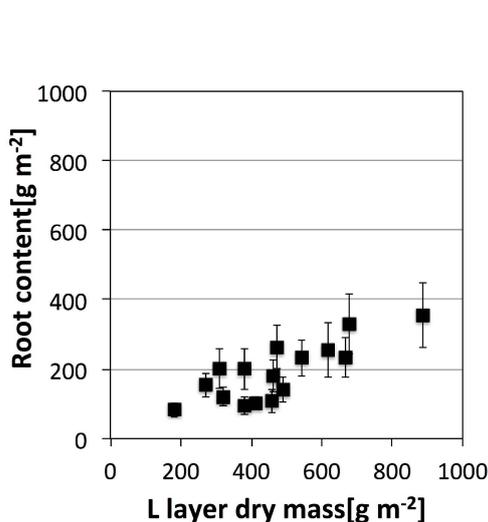


図2 各メッシュの根量とL層堆積量

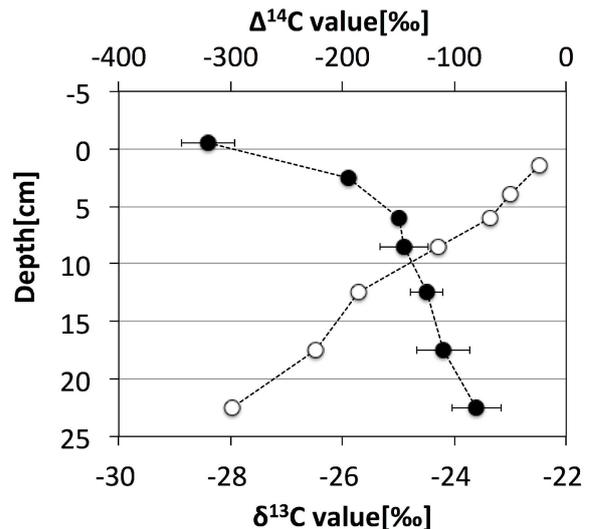


図3 炭素同位体比土壌深さ分布(●:  $\delta^{13}\text{C}$ , ○:  $\Delta^{14}\text{C}$ )

### 3. L層、表層土壌の培養実験

培養試料の採取は2013年8月2日に林内の数カ所で行い、L層、表層土壌それぞれ湿潤質量10g、40gの培養試料を3つずつ用意した。容積0.5Lの密閉容器内に各培養試料を封入し、20°Cで培養を行った。適宜CO<sub>2</sub>を含まない純空気中で密閉容器内の空気を置換し、24h後に容器内の空気を採取した。採取した空気はCO<sub>2</sub>濃度測定およびCO<sub>2</sub>の精製を行い、 $\delta^{13}\text{C}$ 値の測定を行った。容器内のCO<sub>2</sub>濃度上昇速度からCO<sub>2</sub>放出率(単位時間、単位乾燥質量あたりに放出されたCO<sub>2</sub>量)を算出した。CO<sub>2</sub>濃度測定にはガスクロマトグラフ(GC-14B, 島津製作所)を、 $\delta^{13}\text{C}$ 値の測定には安定同位体質量分析計(Finnigan MAT 252, Thermo Fisher Scientific)を用いた。

CO<sub>2</sub>放出率と $\delta^{13}\text{C}$ 値の経時変化を図4に示す。CO<sub>2</sub>放出率はL層が常に表層土壌よりも高い値を示した。L層は培養1週間程度ばらつきながらも高いCO<sub>2</sub>放出率を示し、培養20d以降ゆるやかに減少する傾向を示した。一方、表層土壌は培養1週間で急激に減少した後、培養40d以降はほぼ一定値を示した。表層土壌では培養初期の1週間と40d以降では減少速度が異なることから、分解速度の異なる有機物群が分解したと考えられる。 $\delta^{13}\text{C}$ 値はL層が培養60dまでばらつきながらもほぼ一定の値を示し、60d以降に1%程度増加する傾向を示した。一方、表層土壌は培養初期の10d以内に2%程度減少した後、40dまでほぼ一定、40d以降ゆるやかに増加する傾向を示した。この結果から異なる $\delta^{13}\text{C}$ 値を示す有機物群が少なくともL層で2種類、表層土壌で3種類分解したと考えられる。図4中に点線で示した試料全体の $\delta^{13}\text{C}$ 値と比較するとL層は培養期間を通して常に高い値、表層土壌は初回以降常に低い値を示した。

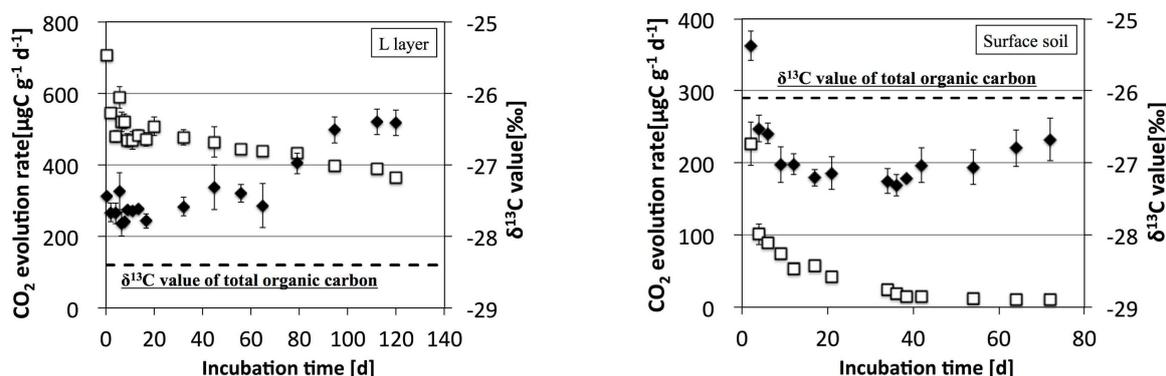


図4 CO<sub>2</sub>放出率(□)、 $\delta^{13}\text{C}$ (◆)経時変化

図4に示したCO<sub>2</sub>放出率 $S(t)$ の変化は分解速度の異なる有機物群がそれぞれ独立に分解され、CO<sub>2</sub>放出量は原料となる有機炭素に比例する(1次反応)と仮定すると、次式で表される。

$$S(t) = \sum_i S_{0,i} \exp\left(-\frac{t}{T_i}\right) \quad (1)$$

ここで、分解性 $i$ の初期CO<sub>2</sub>放出率を $S_{0,i}$ 、回転時間を $T_i$ とする。 $T_i$ は分解性 $i$ の平均滞留時間に相当する。CO<sub>2</sub>放出率の測定結果からL層は分解性1種類、表層土壌は分解性3種類として式(1)をCO<sub>2</sub>放出率測定結果に当てはめ、 $S_{0,i}$ 、 $T_i$ を推定した。分解性別の回転時間はL層が416d、表層土壌がそれぞれ回転時間1.8d、21d、107dだった。式(1)の右辺の項を $t=\infty$ まで積分すると、放出されるCO<sub>2</sub>の総量が分解性別に得られる。分解された有機物はすべてCO<sub>2</sub>になると仮定すると、L層の全有機炭素量の46.2%、表層土壌の全有機炭素量の6.9%に相当する有機炭素が可分解性であると推定された。L層、表層土壌それぞれ残りの53.8%、93.1%はより分解されにくく実験期間では顕わ

に CO<sub>2</sub> 放出率への寄与が見えなかった難分解性有機炭素と見なせる。L 層の  $\delta^{13}\text{C}$  値は培養期間中常に有機物全体より常に高い  $\delta^{13}\text{C}$  値を示していたため、質量保存の関係から L 層の難分解性有機炭素が示す  $\delta^{13}\text{C}$  値は L 層全体の  $\delta^{13}\text{C}$  値 -28.4‰より低い値を示す。L 層の難分解性有機炭素が分解残渣として表層土壤に供給されるとした場合、表層土壤の有機物の  $\delta^{13}\text{C}$  値が L 層残渣より高い-26‰程度を持つことと合致しない。従って可能性(3)を否定する結果だった。本研究で対象とした森林において、L 層分解残渣が表層土壤を形成する土壤深さ方向の単純な炭素供給過程では表層土壤における炭素収支を説明できない可能性が示唆された。

#### 4. まとめ

有機炭素量水平分布の測定からリターフォールは地表面に水平方向均一に供給され、L 層の段階で不均一な分布を形成、表層土壤には L 層の不均一性が反映されないことを明らかにした。根量と L 層堆積量間に正の層間が見られ、地表面の根被覆が L 層の不均一性形成要因のひとつとなった可能性が考えられる。 $\Delta^{14}\text{C}$  値土壤深さ分布の測定から今回対象とした森林の土壤に対する炭素蓄積速度が遅かった可能性が示唆され、L 層有機炭素の不均一性が表層土壤に反映されていなかった原因のひとつとして考えられる。培養実験から L 層、表層土壤の全有機炭素のそれぞれ 46.2%、6.9%に相当する有機炭素の回転時間を明らかにした。L 層分解残渣の  $\delta^{13}\text{C}$  値は L 層全体と比べ低い  $\delta^{13}\text{C}$  値を示し、L 層、表層土壤間の  $\delta^{13}\text{C}$  値の不一致を説明できなかった。今回推定された分解性有機炭素の分解速度温度依存についての知見を得ることで、今後温度変動を考慮した L 層、表層土壤からの年間 CO<sub>2</sub> 放出量及び表層土壤の炭素収支を推定することが期待される。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、名古屋大学年代測定総合研究センターの中村俊夫教授、池田晃子様には炭素同位体比測定で大変御支援頂きました。研究対象とする森林の選定にあたり、名古屋大学大学院生命農学研究科附属フィールド科学教育研究センターの高部直紀様に御協力頂きました。深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (2013), "Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC", (2013)
- [2] Francey R. J., Allison C. E., Etheridge D. M., Trudinger C. M., Enting I. G., Leuenberger M., Langenfelds R. L., Michel E., and steel L. P., "A 1000-year high precision record of  $\delta^{13}\text{C}$  in atmospheric CO<sub>2</sub>.", *Tellus*, 51B, pp.170-193, (1999)

#### 日本語要旨

森林土壤に対する炭素供給機構を解明するため、リター及び土壤の有機炭素量、炭素同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\Delta^{14}\text{C}$ ) の変化を現地観測により、有機物分解由来の CO<sub>2</sub> の放出率及び  $\delta^{13}\text{C}$  値の経時変化を室内培養実験により測定した。研究対象として愛知県豊田市稲武町(35°198' N, 137°574' E)の標高 1200m に位置するヒノキ-カラマツ混合林を選定した。リターフォールは水平方向均一に供給され、L 層で不均一な分布が形成、表層土壤には L 層の不均一な分布が反映されていないことを明らかにした。L 層の  $\delta^{13}\text{C}$  値は表層土壤に比べ 2.5‰低い値を示した。 $\Delta^{14}\text{C}$  値は表層土壤が負の値を示した。

$\Delta^{14}\text{C}$  値の測定結果から表層土壌に対する炭素蓄積速度が遅い可能性が示唆された。室内培養実験では L 層、表層土壌を  $20^\circ\text{C}$  で培養し、 $\text{CO}_2$  放出率、 $\delta^{13}\text{C}$  値の経時変化を測定した。 $\text{CO}_2$  放出率は L 層が培養 20 d 以降ゆるやかに減少し、一方で表層土壌は培養 10 d 程度で急激に減少し、培養 40 d 以降は  $10 \mu\text{gC (g-dry)}^{-1} \text{d}^{-1}$  程度の値を示した。培養期間中 L 層から放出された  $\text{CO}_2$  の  $\delta^{13}\text{C}$  値は常に L 層の有機物全体より高い値を示した。培養実験結果から推定した L 層分解残渣の  $\delta^{13}\text{C}$  値では L 層、表層土壌間の  $\delta^{13}\text{C}$  値の不一致を説明できなかった。対象とした森林では L 層分解残渣によって表層土壌が形成される炭素供給過程では、表層土壌の炭素収支を説明できない可能性が示唆された。

## 関連する学会発表

伊藤健二、森泉 純、山澤弘実

「ヒノキ-カラマツ林におけるリター層-土壌層間炭素供給機構の解明」

第 60 回日本地球化学会 口頭発表 2013 年 9 月 11~13 日

筑波大学

酒井義人、森泉 純、山澤弘実

「乾燥再湿潤による土壌有機物分解  $\text{CO}_2$  の放出率・炭素同位体比の変化」

第 60 回日本地球化学会 口頭発表 2013 年 9 月 11~13 日

筑波大学