

森林土壌の炭素蓄積プロセスの解明  
～微生物分解作用による炭素の放出・流出量の環境応答性の定量的評価～

安宅未央子  
京都大学 生存圏研究所

1、はじめに

森林土壌は陸域生態系の中でもっとも大きな炭素の貯蔵庫である。地球温暖化に伴う環境変動の影響を受けて、森林土壌から放出・流出する炭素のわずかな変動が全球レベルの大気中の  $\text{CO}_2$  濃度に強く影響する。樹木から脱落した落葉などの大量の枯死有機物は、土壌微生物による分解作用を受けて、分解呼吸として大気への  $\text{CO}_2$  放出そして溶脱として水とともに系外へ流出する。そのため森林土壌においては、枯死有機物の供給量と炭素の放出量（分解呼吸量）・流出量（溶脱量）のバランスによって、土壌炭素蓄積量が決定される（図 1）。しかし、森林土壌の炭素蓄積量は十分な精度で定量評価されてこなかった。この理由として、手法上の制限から、温度や水分などのフィールドの環境場の影響をうけて時々刻々と変化する分解呼吸量と溶脱量を同時に測定することができなかつたことが挙げられる。そこで、分解呼吸量と溶脱量を同時に測定することができるチャンバー（測定容器）を開発し、分解呼吸量を高頻度で測定できるシステムと組み合わせることで、炭素放出量と流出量の環境応答性を定量的に評価し、土壌の炭素蓄積プロセスを明らかにできると考えた。

本研究は、土壌炭素蓄積への寄与度が大きい落葉を対象に、時々刻々と変化する温度や降雨などの環境要因に対して、落葉の分解呼吸量と溶脱量がどのように応答するのかをフィールド観測に基づいて定量的に評価し、土壌炭素蓄積プロセスを明らかにすることを目的とする。

$$\text{土壌炭素蓄積量} = \text{供給量} - (\text{分解呼吸量} + \text{溶脱量})$$

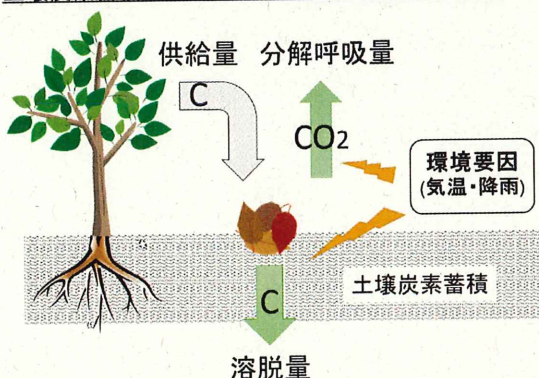


図1. 森林土壌の炭素蓄積プロセス

## 2、方法

### 2. 1 試験地の概要

微生物分解が早く進行する温暖・湿潤な気候下にある山城試験地（京都府南部）において行った（図 2）。平均温度は 15.5℃、平均年間降水量は 1500 mm である。落葉広葉樹二次林であり、優占樹種はコナラである。このサイトは森林が成立した約 50～150 年前までは、平城時代から続く過剰の森林伐採によって風化花崗岩土のはげ山・荒地であった。そのため、初期植生・初期土壌炭素蓄積量が既知であるため、土壌炭素蓄積の研究をするのに優れたサイトとして選定した。また、気象因子や枯死有機物の供給量などの基礎データは継続してモニタリングされている。

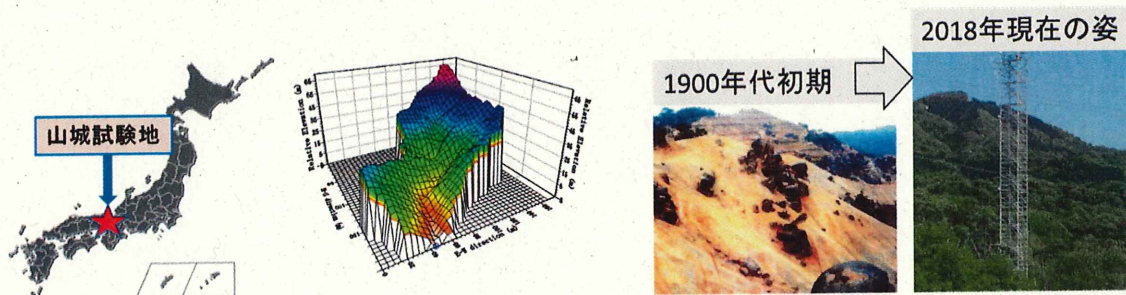


図2. 山城試験地(京都府南部)

### 2. 2 分解呼吸量・溶脱量の同時測定チャンバーの開発

落葉の分解呼吸量と溶脱量を同時に測定することができるチャンバー（図 3 左）を作製した。チャンバーの下部には落葉層溶脱水を貯めることができる空間をつくり、筒をとおして水を回収できるようにした。また、落葉のみからの  $\text{CO}_2$  放出を測定するために、有機土壌のかわりにマッフル炉で焼いたマサ土や石などをつめてできるだけ自然状態に近い土壌環境を作成した。

落葉層分解呼吸速度を連続的に測定するために、チャンバーに  $\text{CO}_2$  濃度高頻度測定システム（図 3 右）を組み合わせた。 $\text{CO}_2$  濃度高頻度測定システムは、 $\text{CO}_2$  濃度測定機器とポンプ、流量計、電磁弁で構成されている。リレーシステムによる電磁弁の切り替えを行うことで5個のチャンバーの測定を可能にしている (Ataka et al. 2014b)。落葉層分解呼吸速度の測定は、1つのチャンバ一つき測定時間は10分間、1時間に

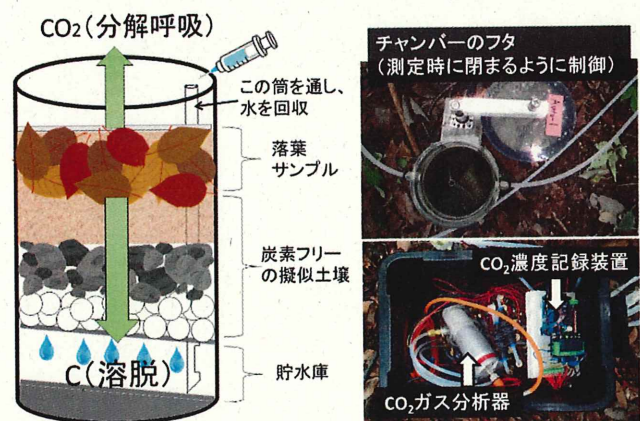


図3. (左)分解呼吸量・溶脱量の同時測定チャンバーの概要  
(右)  $\text{CO}_2$ 濃度高頻度測定システムの写真

1回の頻度でおこなった。

### 2. 3 落葉分解呼吸速度の観測方法

枯死有機物のなかでも土壌炭素蓄積への寄与度が大きい落葉を対象にした。樹種は、炭素動態に与える影響が大きいと考えられる優占種のコナラを用いた。10m×10mのプロットを設定し、落葉の分解呼吸量・溶脱量の測定チャンバー (N=5) と林内雨 (N=5)、地温・土壌含水率センサー・落葉水分センサーを設置した。落葉層は表層に位置するため日射や降雨などの環境の影響を受けやすく、土壌と比べて落葉の水分変動はダイナミックな湿潤-乾燥サイクルを示す。そのため、落葉分解呼吸の炭素動態を定量する上で、落葉の水分変動を観測することは非常に重要である。落葉の水分変動は、土壌含水率計のまわりに落葉を巻いて落葉層内に設置することで測定を行った (Ataka et al. 2014a)。落葉の分解呼吸量と土壌環境因子は、30分ごとの高頻度測定を行った。季節変化を調べるために、これらの観測は1年間継続して行った。

### 2. 4 落葉層透過水と林内雨の溶存有機炭素量の測定

落葉層透過水と林内雨の採取は月に1、2回の頻度で行った。落葉層透過水は、チャンバー内に設置している筒にチューブを挿入し、ポンプを使って回収した。採水したサンプルは実験室に持ち帰り、0.45 $\mu$ mのフィルター (ADVANTEC, 25HP045AN) に通して冷凍保存した。

落葉層透過水と林内雨の溶存有機炭素濃度は、試料 2N 塩酸を添加し、キャリアガス (純空気) を通気し無機炭素を除去した後、全有機体炭素計 (島津製作所、TOC-V<sub>CSH</sub>) により測定した。落葉層溶脱量は、落葉層透過水と林内雨の溶存有機炭素量の差し引きにより求められた。

### 3、結果と考察

#### 3. 1 落葉層の分解呼吸速度の季節変化

落葉層の分解呼吸速度は温度に応じて大まかな季節変化を示したのに対し、短期的には落葉層の湿潤－乾燥サイクルに従って時間変動を示した（図 4）。落葉分解呼吸速度は降雨時にピークを示し、その後の落葉層の乾燥に従って数日ではほぼゼロにまで減少した。落葉層の湿潤－乾燥サイクルに従った落葉層分解呼吸速度の速い応答は、先行研究の結果と一致した (Borken et al. 2003; Lee et al. 2004)。

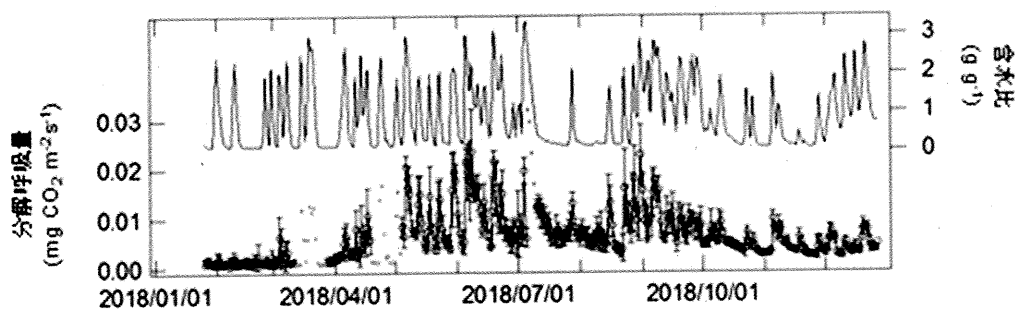


図4. 分解呼吸速度の季節変化

#### 3. 2 林内雨、落葉層の透過水・溶脱水の炭素溶脱量の季節変化

落葉層透過水の DOC 濃度と量は、林内雨よりも期間をとおして高い傾向にあった（図 5、表 1）。落葉層の炭素溶脱量は季節変化を示し、分解初期や夏期において高い傾向にあった。分解初期のリターは、分解が進んだリターと比べると溶脱量が多い (Magill and Aber 2000)。また、初期リターに含まれている水溶性の有機化合物は数ヶ月で枯渇することが報告されている (Don and Kalbitz 2005)。これは、本研究で観測された分解初期の高い炭素溶脱量の結果と一致する。

夏期には溶脱量が多い時期がみられたが、これは DOC 生成が温度と関係していることが影響していると考えられる (Kalbitz et al. 2000)。また採水量と溶脱量の関係が正の関係であることから（図 6）、降水量が大きい場合は溶脱量も多くなると考えられる (Easthouse et al. 1992)。相対的に温度が高く湿潤な環境によって分解が進行することで可溶性炭素が生成され、降水とともに洗い流されたと考えられる。

#### 3. 3 落葉炭素収支

落葉の初期落葉炭素量 ( $246.90 \text{ gC m}^{-2}$ ) のうち、分解呼吸量として  $52.42 \text{ gC m}^{-2}$ 、溶脱量として  $2.17 \text{ gC m}^{-2}$  の炭素が放出した（図 7）。落葉からの全炭素放出量は、落葉の初期炭素量の 32.1% を占めていた（うち分解呼吸量として 21.2%、溶脱量として 0.9%）。

Kammer and Hagedorn (2011) はブナを用いた試験により、初期重量に対して分解呼吸

として 31%、溶脱量として 4%の炭素が放出したと報告した。本研究で観測された溶脱量は他の研究とくらべて小さかった。DOC は、生成と同時に微生物による分解を受ける。可溶性有機物の大部分を占める糖類は、微生物にとって利用しやすい化合物でありすばやく分解される (Nordén and Berg 1990)。本サイトは、高温多湿で微生物にとって分解活動しやすい環境条件であるため、落葉層から溶脱した炭素の一部は、微生物による分解作用によって分解呼吸として放出したのかもしれない (Moore and Dalva 2001)。

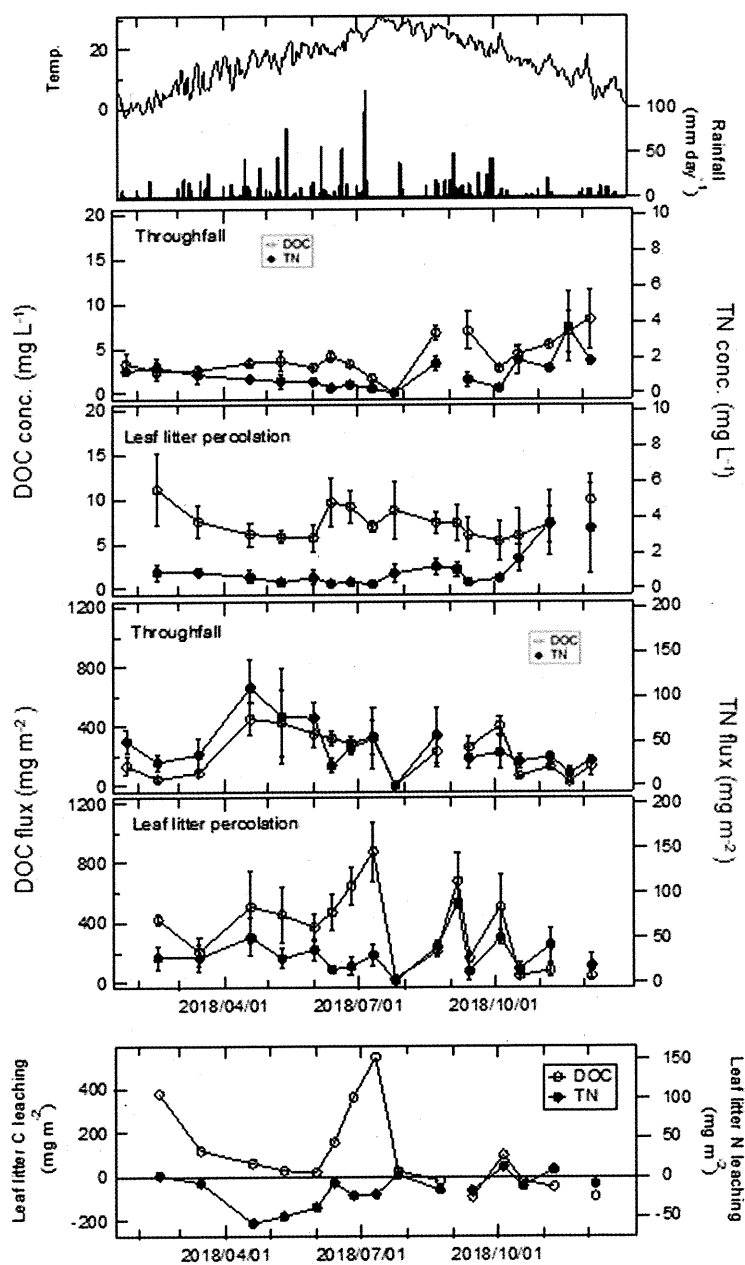


図5 林内雨, 落葉層の透過水・溶脱水の DOC, TNの濃度とフラックスの季節変化

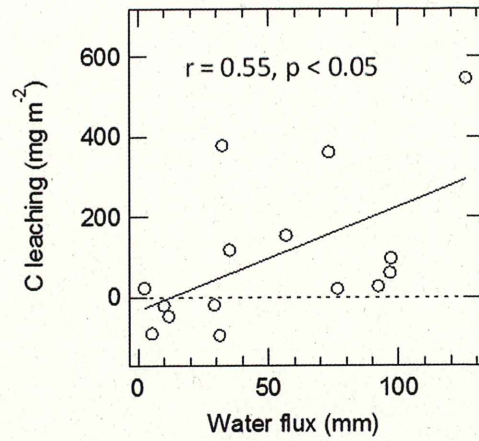


図6. 落葉層溶脱量と採水量の関係

表1. 林内雨, 落葉層の透過水・溶脱水のDOCフラックス

( $\text{gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ )	DOC
Throughfall	3.95
Leaf litter percolation	6.12
Leaf litter leaching (Leaf litter percolation - Throughfall)	2.17

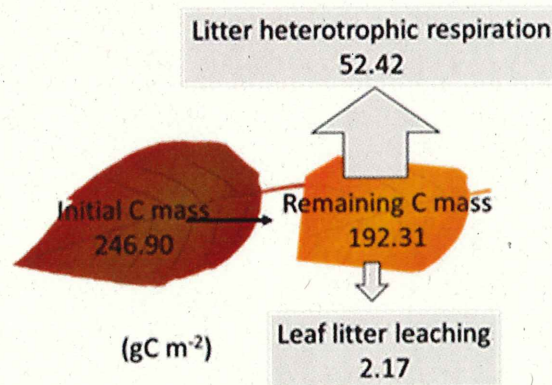


図7. 落葉層の炭素収支

#### 4、結論

フィールド観測による結果から、初期落葉炭素量のうち分解呼吸量として 21.2%、溶脱量として 0.9%の炭素が1年間で放出されることが明らかとなった。炭素放出プロセスとしては、落葉層の分解呼吸量は温度や水分といった環境要因の影響をうけて変動していた。また、落葉の炭素溶脱量は温度や降水量の影響をうけて季節変化していることが明らかとなった。温暖湿潤な環境下では溶脱した炭素の大部分は微生物による異化作用によってCO<sub>2</sub>として放出されたのではないかと考えられた。

1年間の観測データに基づく結果から、初期重量のうち 22.1%の落葉が分解されたことが示された。落葉は数年かけて分解されると考えられることから、引き続き炭素の放出・流出量の観測を行い、炭素の供給量と炭素放出・流出量との差として評価される土壌炭素蓄積プロセスの評価を行う予定である。

#### 6、謝辞

本研究の遂行にあたりエスベック地球環境研究・技術基金は資金面で大きな助力となりました。ここに厚く御礼申し上げます。

#### 引用文献

- Ataka M, Kominami Y, Miyama T, Yoshimura K, Jomura M, Tani M (2014a) Using capacitance sensors for the continuous measurement of the water content in the litter layer of forest soil. *Applied and Environmental Soil Science* 2014: <https://doi.org/10.1155/2014/627129>.
- Ataka M, Kominami Y, Yoshimura K, Miyama T, Jomura M, Tani M (2014b) In situ CO<sub>2</sub> efflux from leaf litter layer showed large temporal variation induced by rapid wetting and drying cycle. *Plos One* 9: e108404.
- Borken W, Davidson EA, Savage K, Gaudinski J, Trumbore SE (2003) Drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizons. *Soil Sci Soc Am J* 67: 1888-1896.
- Don A, Kalbitz K (2005) Amounts and degradability of dissolved organic carbon from foliar litter at different decomposition stages. *Soil Biol Biochem* 37: 2171-2179.
- Easthouse KB, Mulder J, Christophersen N, Seip HM (1992) Dissolved organic carbon fractions in soil and stream water during variable hydrological conditions at Birkenes, Southern Norway. *Water resources research* 28: 1585-1596.
- Kalbitz K, Solinger S, Park J-H, Michalzik B, Matzner E (2000) Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. *Soil science* 165: 277-304.
- Kammer A, Hagedorn F (2011) Mineralisation, leaching and stabilisation of <sup>13</sup>C-labelled

- leaf and twig litter in a beech forest soil. *Biogeosciences* 8: 2195-2208.
- Lee X, Wu HJ, Sigler J, Oishi C, Siccama T (2004) Rapid and transient response of soil respiration to rain. *Global Change Biol* 10: 1017-1026.
- Magill AH, Aber JD (2000) Variation in soil net mineralization rates with dissolved organic carbon additions. *Soil Biol Biochem* 32: 597-601.
- Moore T, Dalva M (2001) Some controls on the release of dissolved organic carbon by plant tissues and soils. *Soil Science* 166: 38-47.
- Nordén B, Berg B (1990) A non-destructive method (solid state  $^{13}\text{C}$ NMR) for determining organic chemical components of decomposing litter. *Soil Biol Biochem* 22: 271-275.