

炭素同位体比を用いた森林土壌呼吸中の根呼吸の評価  
**Estimation of root respiration to a forest-floor CO<sub>2</sub> flux  
using carbon isotopes**

蜂谷 真史<sup>1\*</sup>・森泉 純<sup>1</sup>・山澤 弘実<sup>1</sup>

M.Hachiya<sup>1\*</sup>, J.Moriizumi<sup>1</sup>, H.Yamazawa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名大院・工(<sup>1</sup>Graduated school of Engineering, Nagoya Univ.)

*\*Correspondence to: M.Hachiya; E-mail: hachiya-masashi09@ees.nagoya-u.ac.jp*

**Abstract**

Efflux of soil respired carbon dioxide(CO<sub>2</sub>) is very important component for the global carbon cycle and dynamics of <sup>14</sup>C in environment, and to predict the global climate changes caused by increasing CO<sub>2</sub> concentrations in the atmosphere. There are two components that generate CO<sub>2</sub> in soil, soil organic matter decomposition and root respiration. Although the former is relatively well understood, the root-derived CO<sub>2</sub> efflux has not been evaluated sufficiently. The objective of our research is to estimate depth profile of the root respiration rate. Thus we developed a box model which calculates the depth profile. In this paper, we discussed about the adequacy of calculated result by comparing it to the observed soil respired CO<sub>2</sub> flux with trenching method.

The result showed that the depth profile of root respiration rate decreased with soil depth. This is attributed to the distribution of fine roots which dominate root respiration. And the estimation result of root respiration was almost equal to observed one.

**Keywords** : root respiration, soil respiration, carbon cycle, carbon isotope, global climate change

**1 緒言**

大気中に約 0.04%存在する二酸化炭素 (以下、CO<sub>2</sub>) は、メタン、亜酸化窒素、フロンおよびハロンなどのハロカーボン類と同様に赤外線を吸収し、温室効果ガスと呼ばれる。大気中 CO<sub>2</sub> 濃度は約 200 年前から増え始め、現在では年間 1.8ppmv ずつ増加し続けている<sup>1)</sup>。IPCC (気候変動に係わる政府間パネル)の第四次評価報告書によれば、温室効果ガスの地球温暖化への寄与割合は CO<sub>2</sub> が最も大きく約 63%、次いでメタンが 20%、フロンおよびハロンが 14%、亜酸化窒素が 6%であり、CO<sub>2</sub> が地球温暖化に最も寄与していると推定されている<sup>2)</sup>。

森林は大気中 CO<sub>2</sub> の吸収源および放出源としてその重要性が認識されている。原子力発電所や核燃料再処理施設から放出される放射性炭素同位体である <sup>14</sup>C は大気中では主に <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> として存在し、CO<sub>2</sub> と同じような動態を示す。<sup>14</sup>C は 5730 年という半減期をもち、原子力利用に伴う大気中放出核種の中で最も集団線量に寄与すると考えられている<sup>3)</sup>。森林床中での CO<sub>2</sub> 生成源には土壌有機物分解と根呼吸があり、地球温暖化及び気候変動の将来予測のためにはそれら生成源ごとの定量評価が必要である。

既往研究では土壌有機物分解起源 CO<sub>2</sub> (以下、SOMD- CO<sub>2</sub>)の同位体比が有機物自身の同位体比と

異なる、根呼吸の直接的な測定が困難である等の問題があった。そのためこれまでは根呼吸を精度良く、定量的に評価することは困難であった。

本研究では、観測サイトでの土壌呼吸  $\text{CO}_2$  のフラックス、土壌中  $\text{CO}_2$  の濃度及びそれらの炭素同位体比の現地観測を行った。そして安定同位体比を考慮した土壌中  $\text{CO}_2$  輸送の一次元ボックスモデルを考案し、根呼吸の土壌深さ分布を計算した。そしてトレンチング法を用いた根呼吸量の測定結果と比較を行い、計算結果の妥当性を評価した。

## 2 現地観測及び室内実験

### 2-1 観測サイト

観測は2008年の6,7,11月と2009年の6月に行った。観測地は愛知県豊田市稲武町(35°12'N, 137°24'E)、名古屋大学生命農学研究科・農学部付属演習林(フィールド教育支援センター稲武フィールド)内にあるカラマツ林である。カラマツは植林されたものであり、樹齢は約45年、樹高は約23mである。観測地の標高は約1010m、アメダス(地域気象観測システム, 標高505m, 気象庁)によると、2008年の稲武町の年降水量は1884.5mm、平均気温は11.9℃であった。

### 2-2 土壌呼吸 $\text{CO}_2$

土壌呼吸  $\text{CO}_2$  のフラックス及び炭素同位体比の測定には容積144Lのチャンバー(以下、144Lチャンバー)を用いて密閉チャンバー法<sup>4)</sup>と通気チャンバー法<sup>5)</sup>を併用して測定した。144Lチャンバーは上面に取り外しが可能なふたが付いた直方体型開口容器であり、観測サイトへ設置するとき土壌深さ2cmまで挿入した。測定時以外はチャンバー内外の状態を等しく保つために、上面のふたを外しておいた。チャンバー内に土壌呼吸を蓄積させる間はふたを被せ、チャンバー内に濃度差が生じないように内部に取り付けた小型ファンにより空気を攪拌した。チャンバー内の空気は土壌表面から20cm上部の空気採取口から流量  $3\text{L min}^{-1}$  で5min採取した。蓄積開始前に土壌表面及び土壌深さ5cmの土壌温度を測定した。

土壌呼吸  $\text{CO}_2$  フラックス  $F[\text{gC m}^{-3} \text{s}^{-1}]$  は、チャンバー内の  $\text{CO}_2$  濃度が時間とともに一次関数的に増加すると仮定してチャンバー内の  $\text{CO}_2$  濃度の時間変化から求められる。土壌呼吸  $\text{CO}_2$  フラックスの算出式を以下の式(2-1)に示す。

$$F = \frac{V}{S} \cdot \frac{\Delta C}{\Delta t} \quad (2-1)$$

ここで、 $V$  はチャンバー内容積 [ $\text{m}^3$ ]、 $A$  はチャンバーの開口部面積 [ $\text{m}^2$ ]、 $\Delta t$  はチャンバーの密閉時間 [s]、 $\Delta C$  は  $\text{CO}_2$  濃度の増加量 [ $\text{gC m}^{-3}$ ] である。

土壌呼吸  $\text{CO}_2$  の炭素同位体比は、144Lチャンバーによって採取された空気の  $\text{CO}_2$  濃度と炭素同位体比から求められる。チャンバー密閉後に蓄積された  $\text{CO}_2$  が土壌呼吸によるものであると仮定すると、質量保存則から式(2-2)が導かれる。

$$\delta C_{res} = \frac{\delta C_f \cdot C_f - \delta C_0 \cdot C_0}{C_f - C_0} \quad (2-2)$$

ここで、 $C$  は  $\text{CO}_2$  濃度 [ $\text{gC m}^{-3}$ ]、 $\delta C$  は  $\delta$  値表示の炭素同位体比 [%] である。添え字の 0、 $f$ 、 $res$  はそれぞれ密閉前のチャンバー内空気、密閉後のチャンバー内空気、及び土壌呼吸を表す。

### 2-3 土壌中 $\text{CO}_2$

本研究では土壌中  $\text{CO}_2$  の濃度及び炭素同位体比の測定を目的としているので、土壌中空気採取時に同位体効果の生じにくいグラブサンプリング法を使用した。サンプリング管は、2004年4月に観測サイトに設置したものをを用いた。サンプリング管は土壌深さ 10 cm、20 cm、40 cm、60 cm、80 cm の5深度に採取口が位置していた。土壌中空気を採取する際、始めにゴム栓およびサンプリング管内に残存している空気を廃棄するために、シリンジで 5 mL 空気を抜き取り、その後シリンジで土壌空気を 10 cm、20 cm では 200 mL、40 cm、60 cm、80 cm では 100 mL 採取し、容積 5 L のアルミニウムバックに移した。採取した空気の  $\text{CO}_2$  濃度及び炭素同位体比を測定した。

### 2-4 トレンチング法

土壌呼吸  $\text{CO}_2$  の発生源には土壌有機物分解と根呼吸の2つの要素が含まれている。トレンチング法とは土壌中に存在している植物の根を破壊することで土壌呼吸  $\text{CO}_2$  中の根呼吸の寄与を 0 とする方法である。

トレンチング法を用いた土壌呼吸  $\text{CO}_2$  の観測を行うために観測サイト内に直径 14.5 cm の塩化ビニル製円筒管を設置した(以下、トレンチトプロット)。同時に、トレンチトプロットと比較するため、トレンチングを行っていない測定点(以下、コントロールプロット)として、直径 10 cm の塩化ビニル製円筒管を土壌に 4cm の深さまで挿入して設置した。土壌呼吸  $\text{CO}_2$  フラックスの測定には容積 1L のチャンバーと非分散型赤外吸光式  $\text{CO}_2$  濃度分析計 (LI-840  $\text{CO}_2$  Gas Analyzer, LI-COR) 及びポンプが一体となった測定システムを用いた。それぞれの測定地点で土壌表面及び土壌深さ 5cm の土壌温度を測定した。

## 3 モデル計算

### 3-1 ボックスモデルの概要

土壌呼吸の構成要素は大きく分けて土壌有機物分解と根呼吸の二つに分けられる。土壌有機物分解の活性は土壌深さ、土壌温度、土壌含水率、 $\text{CO}_2$  濃度といった環境因子に依存することが知られている<sup>6)</sup>。しかし、根呼吸は土壌温度、土壌含水率に対して依存性を持つことが報告<sup>7)</sup>されているだけで、定量評価には至っていない。そこで本研究では、 $^{12}\text{CO}_2$  および  $^{13}\text{CO}_2$  の土壌中の輸送についての一次元ボックスモデルを作成し、根呼吸の土壌深さに対する依存性を解析、評価した。そしてトレンチング法を用いた観測結果との比較から計算結果の妥当性を検討した。更に、モデルの計算精度を評価するために土壌呼吸  $\text{CO}_2$  フラックスと SOMD-  $\text{CO}_2$  生成率についての感度解析を行った。

土壌中で生成された  $\text{CO}_2$  は拡散により上下方向に輸送される。土壌を深さ毎に層(以下、ボックス)に区切り、任意のボックス  $i$  についての  $^{12}\text{CO}_2$  および  $^{13}\text{CO}_2$  の収支方程式を式(3-1)、式(3-2)に示す。

$$a_i \cdot \frac{dC_i}{dt} = (C_{i-1} \cdot R_{i-1}^- + C_{i+1} \cdot R_{i+1}^+) - \{C_i \cdot (R_i^+ + R_i^-)\} + (S_{SOMD,i} + S_{root,i}) \cdot d_i \quad (3-1)$$

$$a_i \cdot \frac{\delta^{13}C_i \cdot dC_i}{dt} = (\delta^{13}C_{i-1} \cdot C_{i-1} \cdot R_{i-1}^- + \delta^{13}C_{i+1} \cdot C_{i+1} \cdot R_{i+1}^+) - \{\delta^{13}C_i \cdot C_i \cdot (R_i^+ + R_i^-)\} \\ + (\delta^{13}C_{SOMD,i} \cdot S_{SOMD,i} + \delta^{13}C_{root} \cdot S_{root,i}) \cdot d_i \quad (3-2)$$

ここで  $a_i$  はボックス  $i$  の気層率 [ $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ]、 $C_i$  はボックス  $i$  中の  $\text{CO}_2$  濃度 [ $\text{gC m}^{-3}$ ]、 $S_{SOMD,i}$  はボックス  $i$  での SOMD- $\text{CO}_2$  生成率 [ $\text{gC g}^{-1} \text{s}^{-1}$ ]、 $S_{root,i}$  はボックス  $i$  での根呼吸の  $\text{CO}_2$  生成率 [ $\text{gC g}^{-1} \text{s}^{-1}$ ]、 $d_i$  はボックス  $i$  での乾燥バルク密度 [ $\text{g m}^{-3}$ ]、 $\delta^{13}C_i$  はボックス  $i$  中の  $\text{CO}_2$  の  $\delta^{13}\text{C}$  値 [%]、 $\delta^{13}C_{SOMD,i}$  はボックス  $i$  での SOMD- $\text{CO}_2$  の  $\delta^{13}\text{C}$  値 [%]、 $\delta^{13}C_{root}$  は根の  $\delta^{13}\text{C}$  値 [%]、 $R_{i+}$  はボックス  $i$  から上方向への交換率 [ $\text{s}^{-1}$ ]、 $R_{i-}$  はボックス  $i$  からの下方向への交換率 [ $\text{s}^{-1}$ ]である。

式(3-1)、式(3-2)中の未知数は、 $S_{root,i}$ 、 $R_{i-}$ 、 $R_{i+}$ であり、方程式二つに対して未知数が五つ存在し、解析的に解くことは不可能である。以下の仮定及び境界条件を導入することで方程式中の未知数を二つとし、 $^{12}\text{CO}_2$ と $^{13}\text{CO}_2$ の方程式を連立させて上端のボックスから $S_{root}$ について逐次計算を行った。

仮定 1. 土壤中  $\text{CO}_2$  は定常状態 ( $dC/dt = 0$ )

仮定 2. 隣接したボックス同士の  $\text{CO}_2$  交換率は同じ ( $R_{i+} = R_{i-1} = R_i$ )

境界条件 1. 大気-土壌間の正味の  $\text{CO}_2$  輸送量は土壌表面  $\text{CO}_2$  フラックスと等しい

境界条件 2. 最下端のボックスでの  $\text{CO}_2$  の下方向への輸送はなし

### 3-2 モデルへの入力値

土壤中  $\text{CO}_2$  濃度及びその  $\delta^{13}\text{C}$ 、境界条件として使用した土壌呼吸  $\text{CO}_2$  フラックスは、現地観測により得られた測定結果を使用した。

SOMD- $\text{CO}_2$  の生成率は Kawai(2008)らの経験式モデル<sup>6)</sup>を用いて、ボックスの深さごとの  $\text{CO}_2$  生成率を入力値とした。SOMD- $\text{CO}_2$  の  $\delta^{13}\text{C}$  は Kawai(2008)らの実験方法<sup>6)</sup>に基づいて室内実験を行い、その測定結果を入力値として使用した。

## 4 計算結果

根呼吸の  $\text{CO}_2$  生成率の土壌深さ分布の計算結果を Fig. 1 に示す。

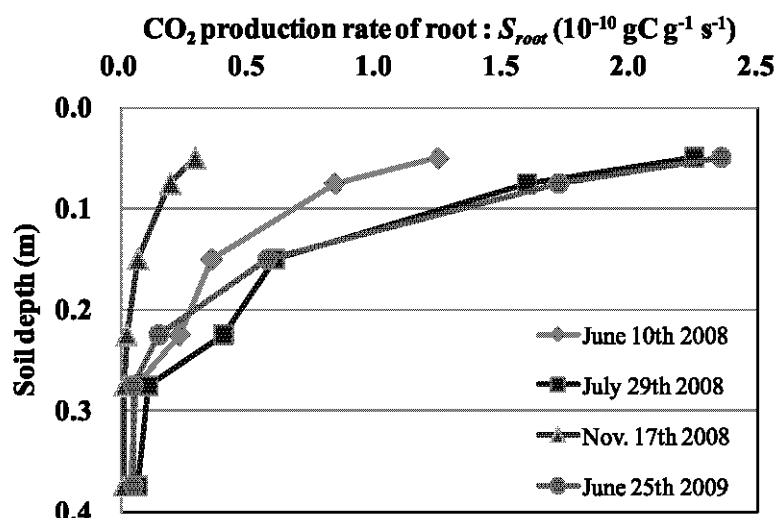


図1 根呼吸率の土壌深さ分布の推定結果

Fig. 1 Estimated depth profile of root respiration rate.

Fig. 1 より、根呼吸の  $\text{CO}_2$  生成率は土壌深さに対して減少傾向にあることが示された。さらに、表層 10 cm 以浅において、根呼吸全体のうちの 80 % 以上を占める結果となった。

Table 1 にトレンチング法を用いた土壌呼吸  $\text{CO}_2$  フラックスの観測結果と観測及び計算により得られた土壌呼吸  $\text{CO}_2$  フラックスに対する根呼吸寄与割合の結果を示す。ここで、根呼吸寄与割合  $R_{root}$  は以下の式(3-3)で表わされる。

$$R_{root} = \frac{\int S_{root,i} dz}{\int (S_{root,i} + S_{SOMD,i}) dz} \quad (3-7)$$

表1 土壌呼吸  $\text{CO}_2$  フラックスの測定結果及び根呼吸寄与割合の推定結果Table 1 Observed and calculated fractional contribution of root respiration  $R_{root}$  to total soil respiration.

| Date in<br>2008 | Soil respired $\text{CO}_2$ flux ( $10^{-5}$ gC $\text{m}^{-2}$ $\text{s}^{-1}$ ) |               |  | $F_{root}$ ( $10^{-5}$ gC $\text{m}^{-2}$ $\text{s}^{-1}$ ) |            | $R_{root}$  |            |
|-----------------|---|---------------|--|---|------------|-------------|------------|
|                 | Control plot  | Trenched plot |  | Observation   | Estimation | Observation | Estimation |
| 10 June         | 1.4 ± 0.6   | 0.9 ± 0.3     |  | 0.52  | 0.87       | 0.36        | 0.34       |
| 29 July         | 3.8 ± 2.1   | 2.7 ± 0.7     |  | 1.15  | 1.55       | 0.30        | 0.31       |
| 17 Nov.         | 0.8 ± 0.3   | 0.7 ± 0.2     |  | 0.08  | 0.29       | 0.10        | 0.25       |

Table 1 より、実測・計算ともに根呼吸量は7月に最大の値となり、11月に最小の値となった。根呼吸寄与割合は実測・計算ともに6月に最大の値となり、11月に最小の値となった。これらの結果は細根の多い土壌表面で根呼吸量が多い、土壌温度の高い夏季に根呼吸量が多い、植物の生長の

著しい初夏に根呼吸寄与割合が大きいという根呼吸の特徴<sup>8)</sup>と一致するものであった。

#### 4 結論

森林床中の根呼吸量評価を行うために、土壌中 CO<sub>2</sub> 輸送の一次元ボックスモデルを考案し、根呼吸の CO<sub>2</sub> 生成率の土壌深さ分布を明らかにした。根呼吸の CO<sub>2</sub> 生成率は土壌深さに対して減少傾向にあることが示された(Fig. 1)。計算結果とトレンチング法を用いた現地観測の結果の比較では、季節変動の再現を含めおおむね一致した結果であった(Table 1)。計算結果はこれまでに報告されている根呼吸の特徴と矛盾しないものであった。

#### 謝辞

名古屋大学年代測定総合研究センターの中村 俊夫教授、小田 寛貴助教授、池田 晃子技官、太田 友子氏には MASS やその他諸々の測定機器の使用法の指導等、様々なご協力をしていただきました。ここに深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) Annual Report on Atmospheric and Marine Environment Monitoring No.7 Observation Results for 2005. Japan Meteorological Agency. 2007.
- 2) IPCC. A Report of Working Group 1 of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2007. The Scientific Basis, Cambridge University Press. 2007.
- 3) Man-sung Yim, Francois Caron. Lifer cycle and management of carbon-14 from nuclear power generation. Progress in Nuclear Energy, volume 48, 2006, p2-36,
- 4) Yagi K. and K. Minami. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. Soil sci. Plant Nutr., Volume 36, (1990), p 599-610.
- 5) J. Koarashi, H. Amano, M. Andoh, T. Iida and J. Moriizumi. Estimation of <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> flux at soil-atmosphere interface and distribution of <sup>14</sup>C in forest ecosystem. Environmental Radioactivity, Volume 60, (2002), p249-261.
- 6) S.Kawai, H.Yamazawa, J.Moriizumi, W.Liu, T.Iida, Analysis of carbon isotope ratio variation in CO<sub>2</sub> efflux from forest floor, Journal of Nuclear Science and Technology, Supplement 5, Atomic Energy Society of Japan, 2008, p152-157
- 7) D.R.BRYLA, T.J.BOUMA, U.HARTMOND and D.M.EISSENSTAT. Influence of temperature and soil drying on respiration of individual roots in Citrus : integrating greenhouse observations into a predictive model for the field. Plant, Cell and Environment 24, (2001), p781-790
- 8) Noboru Karizumi. Illustration of tree roots. (1979).

要旨 土壌呼吸 CO<sub>2</sub> の放出は全球的な炭素循環と環境中の <sup>14</sup>C 移行において、加えて、大気中 CO<sub>2</sub> の増加による全球的な気候変動を予測するためにも、非常に重要な要素である。土壌中には CO<sub>2</sub> を生成する 2 つの要素、土壌有機物分解と根呼吸が存在する。前者は比較的良く理解されつつある一方、根に由来する CO<sub>2</sub> 放出は十分な評価がなされていない。本研究の目的は、根呼吸速度の深さ分布を評価することである。ボックスモデルを開発し、計算結果の正確性をトレンチ法による土壌呼吸 CO<sub>2</sub> フラックス観測値

と比較した。計算結果は、深いほど小さい根呼吸速度分布を示した。これは根呼吸を支配する細根の分布による。根呼吸による CO<sub>2</sub> フラックスの計算結果は観測結果とほぼ一致した。