

## 降雨イベント中の土壌中二酸化炭素濃度と 土壌呼吸速度の変化

堀田紀文\*<sup>1</sup>・奈良康平\*<sup>2</sup>・小田智基\*<sup>1</sup>・鈴木雅一\*<sup>1</sup>

### Changes in soil CO<sub>2</sub> concentration and soil respiration during rainfall events

Norifumi HOTTA \*<sup>1</sup>, Kohei NARA \*<sup>2</sup>, Tomoki ODA \*<sup>1</sup>  
and Masakazu SUZUKI \*<sup>1</sup>

#### 1. 研究の背景と目的

土壌中での根呼吸と有機物分解によって生じた二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) が土壌表面から放出される現象を土壌呼吸と呼ぶ。森林土壌は陸域における炭素の主要な貯留場所の一つであり、森林における土壌呼吸の研究が各地で実施されてきた (Raich and Nadelhoffer, 1989; Schlesinger, 1997)。土壌中での CO<sub>2</sub> の移動は一般に拡散現象として取り扱われ、土壌呼吸速度の計測と土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度分布の測定との併用 (Hashimoto *et al.*, 2007) や、土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度分布の連続測定 (Hirano *et al.*, 2003) の結果に拡散方程式を適用することによって、土壌中での CO<sub>2</sub> 湧き出し速度の深度分布推定が可能になる。通常、土壌呼吸は、このように求められた土壌中における CO<sub>2</sub> の湧き出しの積算値として理解される。土壌中の CO<sub>2</sub> 湧き出し速度は温度や水分条件によって変化するため、土壌呼吸には、温度・水分などの環境条件への依存性が存在することが知られている (Davidson *et al.*, 2000; Hashimoto *et al.*, 2007)。

しかしながら、降雨時のように土壌中の水分条件などが急激に変化する場合に、土壌中の CO<sub>2</sub> 環境や土壌呼吸がどのような影響を受けるかについては明らかになっていない点が多い。溝口ら (2003) は、落葉広葉樹林 (埼玉県・川越市) において自動開閉チャンバーを用いた土壌呼吸速度の連続観測の結果から、降雨時に土壌呼吸速度が低下する場合と上昇する場合があることを示した。土壌呼吸速度の低下に関しては、土壌水分の上昇に伴うガス拡散係数の低下をその要因として挙げている。中本ら (2001) は、砂丘砂で形成された裸地 (鳥取県・鳥取市) において、異なる二深度で土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度の連続観測を実施し、降雨時に土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度が急激に上昇することを確認した。その上で、降雨時に生じる現象については、土壌中のガス拡散係数の低下よりも土壌表面の雨水による被覆に伴う拡散停止と理解する方が実態に合うことを指摘している。両者は降雨中に土壌呼吸速度の低下が生じたという点で共通した結果を得ているが、異なるメカニズムを要因として挙げている。溝口ら (2003) と中本ら (2001) は、それぞれ土壌呼吸速度と土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度分布だけを測定しているが、降雨時に土壌中の CO<sub>2</sub> 拡散プロセス

\*<sup>1</sup> 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

\*<sup>2</sup> 東日本高速道路株式会社  
East Nippon Expressway Company

がどのように変化するかを実証的に示すためには、両者の同時連続観測が必要となる。

さらに、雨水の土層への浸透が面的に均一ではなく、局所選択的に生じること (Weiler and Flühler, 2004) や、雨水の浸透に伴い土壌中の気相率が低下し、その分のガス移動が生じるであろうことを考慮すると、拡散の低下や停止だけでは降雨時の土壌中  $\text{CO}_2$  の挙動を説明できない可能性がある。事実、土層がほぼ飽和した時に土層内の不連続な気相が、水圧や毛管圧力の影響など、拡散以外のメカニズムによって移動すること (Mumford *et al.*, 2009) も知られている。また、Davidson *et al.* (2001) は、比較的乾燥した地域では降雨が土壌呼吸速度を上昇させる要因になることを報告している。温暖湿潤な地域においても、夏季の乾燥により土壌水分が著しく低下した際に、生物活性の低下による土壌呼吸速度の低下が生じることがある (溝口ら, 2003) ため、降雨が土壌呼吸に与える影響を明らかにするためには、微生物活性の変化などによって生じる土壌内部での  $\text{CO}_2$  湧き出し量の変化についてもあわせて調べることが重要であろう。土壌中の  $\text{CO}_2$  の湧き出しや移動の実態の詳細な検討には、土壌呼吸速度に関して、土壌内部の  $\text{CO}_2$  濃度と環境条件 (温度・水分) から得られる拡散プロセスによる推定値と連続観測による実測値との比較が必要である。

従来の土壌呼吸観測の多くが無降雨時に行われてきたことから、土壌呼吸の活発な夏季に降雨が頻繁に生じる日本のような地域では、降雨が土壌呼吸速度に与える影響を評価することは重要だと考えられる。そこで本研究では、降雨が土壌中の  $\text{CO}_2$  濃度と土壌呼吸に与える影響を明らかにすることを目的として、降雨時の土壌呼吸速度・土壌中  $\text{CO}_2$  濃度の同時測定を連続的に実施した。測定結果を用いて  $\text{CO}_2$  湧き出し量の深度分布と土壌中に貯留された  $\text{CO}_2$  量を併せて推定し、それぞれの時間変化を測定結果と比較することによって、降雨時の土壌中  $\text{CO}_2$  環境の変化の実態とそのメカニズムについて検討した。

## 2. 観測概要

### 2.1 観測地

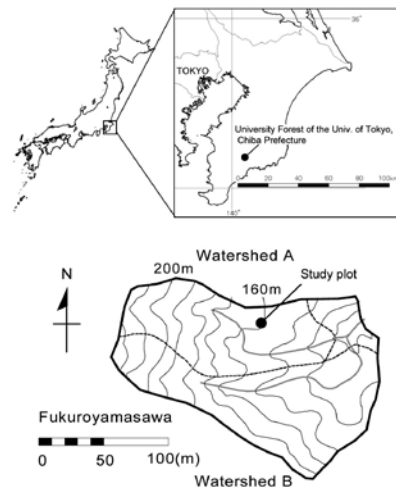


図-1 袋山沢試験流域および観測地点の位置図

Fig. 1. Location of Fukuroyamasawa experimental watershed and study plot.

観測は東京大学千葉演習林袋山沢試験流域で行った。千葉演習林は房総半島南部に位置し（図-1）、袋山沢試験流域は演習林内の北西部（北緯 35 度 12 分 18 秒，東経 140 度 06 分 23 秒）の東向き斜面である。袋山沢試験流域は北側の非伐採流域（0.8ha），南側の伐採流域（1.1ha）の二つの隣り合った流域からなり，流域全体の標高は 124m から 227m である。地質は新第三紀層三浦層群に属し，基岩は砂岩泥岩互層，土壌は褐色森林土である。植生は 1929 年に植栽されたスギ・ヒノキ人工林である。年平均気温は 14.2℃（1998～2000 年），年平均降水量は 2216mm（1994～2003 年）である。

袋山沢試験流域では継続的な観測の結果，土壌呼吸速度は夏季に極大値をもつ季節変化を示し，温度依存性が高いことが明らかにされている（Hashimoto *et al.*, 2007）。3 月頃まで CO<sub>2</sub> はほとんど放出されず，その後徐々に土壌呼吸速度が大きくなり，7 月頃に最大となる。その後は低下に転じて 12 月には再びほとんど CO<sub>2</sub> が放出されなくなる。土壌呼吸として放出される年間の CO<sub>2</sub> 量の約 75% が深度 10cm までの浅い土層から湧き出す。

本研究における土壌呼吸速度の測定は非伐採流域中部に新たな観測地点を設置して実施した（図-1）。

## 2.2 観測方法

観測は 2008 年の 5 月と 9 月にあった 2 つの降雨イベントを対象とした。5 月（降雨イベント 1）は 10 日から 11 日にかけての降雨に合わせて土壌呼吸速度の連続観測を行い，降雨前の 8 日，9 日，降雨後の 12 日にも観測を行った。9 月（降雨イベント 2）は 18 日の降雨と，19 日から 20 日の降雨に合わせて土壌呼吸速度の連続観測を行い，降雨前の 17 日にも観測を行った。

観測では，土壌呼吸速度，土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度，土壌水分，地温，雨量について測定した。観測地点に設置した土壌呼吸速度測定点（9 点），各センサーの設置位置及び観測地点付近の樹冠投影図を図-2 に，下層植生の一覧を表-1 に示す。

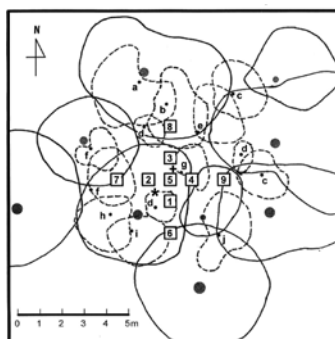


図-2 土壌呼吸速度観測点と各センサーの位置図および観測地点周辺の樹冠投影図

数字（1～9）が示された□が土壌呼吸速度観測点，★が土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度センサーと地温センサー，+が TDR センサーの位置を表す。実線で示された樹冠はスギの樹冠を表し，破線で示された樹冠は下層植生の樹冠を表す。添字のアルファベットは表-1 の下層植生の樹種に対応している。

Fig. 2. Canopy projection map of study plot and locations of measurement points for soil respiration (1-9). Locations of infrared gas analyzers for CO<sub>2</sub> concentration profiles and thermometers for soil temperature profile (asterisk), and TDR sensors (cross) are also shown. Solid and dotted circles indicate canopy projections of *Cryptomeria japonica* and understory trees respectively (also with additional characters: see Table 1 for the tree species).

表-1 観測地点周辺の下層植生一覧  
Table 1. Understory trees of the study plot.

	Species	和名
a	<i>Quercus sessilifolia</i>	ツクバネガシ
b	<i>Quercus myrsinifolia</i>	シラカシ
c	<i>Quercus glauca</i>	アラカシ
d	<i>Eurya japonica</i>	ヒサカキ
e	<i>Cephalotaxus harringtonia</i>	イスガヤ
f	<i>Prunus spinulosa</i>	リンボク
g	<i>Camellia japonica</i>	ヤブツバキ
h	<i>Illicium anisatum</i>	シキミ
i	<i>Quercus salicina</i>	ウラジロガシ
j	<i>Abies firma</i>	モミ

記号 (a~j) は図-2 に対応している。

Identification characters (a-j) for the trees correspond with those in Fig. 2.

土壌呼吸速度観測には赤外線 CO<sub>2</sub> ガスアナライザー (Li-6252 及び Li6262, Li-COR 社), エアerpンプ(チャンバー内の空気を循環させるため), チャンバー(直径 0.37m, 容積 0.013m<sup>3</sup>) をチューブで接続したうえで地面にかぶせ, 密閉されたチャンバー内の CO<sub>2</sub> ガス濃度の経時変化を記録した。

記録した CO<sub>2</sub> 濃度の変化量を元に, (1) 式を用いて土壌呼吸速度を計算した。

$$F_0 = 0.044 \times 10^{-6} \pi r^2 \left( \frac{dC}{dt} \right) \left( \frac{V_1}{V} \right) \quad (1)$$

ここで,  $F_0$  は土壌呼吸速度 (kgCO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>),  $dC/dt$  はチャンバー内の CO<sub>2</sub> ガス濃度の時間変化 (ppm·s<sup>-1</sup>),  $V$  は 1mol あたりの気体の体積 (m<sup>3</sup>·mol<sup>-1</sup>),  $V_1$  はチャンバーの容積 (m<sup>3</sup>),  $r$  はチャンバーの半径 (m) である。観測を行った 9 地点の平均値を土壌呼吸速度とした。9 地点全ての観測に要する時間は 2 時間弱であり, 平均値は 2 時間ごとの値として用いた。

土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度は, 5cm, 15cm, 25cm, 35cm の各深度に CO<sub>2</sub> ガス濃度センサー (GMT221, VAISALA 社) を埋設し, ロガー (CR10X, Campbell 社) を用いて 2 時間毎に測定と記録を行った。また, 観測点にはガス採取管を複数深度に埋設しており, 連続観測の前後にはガス吸引器 (GV-100S, ガステック)・CO<sub>2</sub> ガス検知管 (ガステック) を用いて測定した土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度と自記センサーによる土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度が一致することを確認している。

土壌水分の観測としては, TDR 式土壌水分計 (CS616-L, Campbell 社) を 10cm, 20cm, 30cm の各深度に埋設し, ロガー (CR10X, Campbell 社) を用いて 10 分毎に各深度における体積含水率を測定・記録した。また, 土壌呼吸観測時には各観測点の地表付近 (0~5cm) の体積含水率を土壌水分計 (DIK311A, 大起理化工業) で測定した。ただし, 降雨イベント 2 については, 土壌水分計の故障により地表付近の体積含水率が測定できなかったため, 降雨イベント 1 およびその他の期間の観測データから 10cm 深度の体積含水率と地表付近の体積含水率の関係を求めたうえで, 10cm 深度の体積含水率から推定した値を用いた。地温は 5cm, 15cm,

25cm, 35cm の各深度に自記式温度計 (TR-71U, T&D 社) を埋設し, 10 分毎に各深度で測定・記録した。また土壌呼吸速度観測時には各観測点の地表面温度と 10cm 深地温を, それぞれ放射温度計 (THI-700, 安藤計器製工所), ペン型温度計 (AD5625, A&D) を用いて測定した。体積含水率及び地温は土壌中のガス拡散係数を算出する際に使用した。

雨量は調査地より東に約 200m 離れた場所に位置する新田露場において, 転倒マス式雨量計により測定された値を用いた。

### 3. 解析

土壌中での CO<sub>2</sub> の移動が土壌孔隙内のガス拡散現象で生じるとき, 土壌中の CO<sub>2</sub> のフラックスは, 土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度の深度分布の測定結果を用いることによって Fick の第一法則より以下のように求めることができる。

$$F = -D_s \left( \frac{dC}{dz} \right) \quad (2)$$

ここで  $F$  は単位面積あたりの CO<sub>2</sub> 拡散速度 ( $\text{kgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $D_s$  は土壌中ガス拡散係数 ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) である。 $z$  は土壌の深さ方向を表し,  $dC/dz$  は土壌中の CO<sub>2</sub> 濃度勾配 ( $\text{kgCO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$ ) で, 各深度の CO<sub>2</sub> 濃度差を測定間隔で割って求める。 $D_s$  は以下の式で与えられる (Hashimoto and Suzuki, 2002)。

$$\frac{D_s}{D_0} = 2.03\varepsilon^{2.78} \quad (3)$$

ここで,  $D_s/D_0$  は相対ガス拡散係数であり,  $D_s$  は土壌中ガス拡散係数 ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $D_0$  は大気中ガス拡散係数 ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\varepsilon$  は気相率である。 $D_0$  は以下の式で表される。

$$D_0 = D_{std} \left( \frac{T}{293.15} \right)^{1.75} \left( \frac{1013}{P} \right) \quad (4)$$

ここで  $T$  は温度 (K),  $P$  は気圧 (hPa) であり,  $D_{std}$  は標準状態のガス拡散係数で, 293.15K, 1013hPa 条件下で  $14.7\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  が与えられている (Jones, 1992)。本研究では調査地の気圧を 1013hPa とみなし, 気圧の影響は考慮していない。温度としては, 各深度の地温の測定結果を用いた。 $\varepsilon$  は以下の式で与えられる。

$$\varepsilon = \theta_s - \theta \quad (5)$$

ここで  $\theta_s$  は飽和体積含水率,  $\theta$  は体積含水率である。 $\theta_s$  については観測点で採取した土壌サンプル (100cc) の分析結果から, 0~5cm 層では 0.61, 5~15cm 層では 0.64, 15~25cm 層では 0.65, 25~35cm 層では 0.62 を与えた。

地表の CO<sub>2</sub> 濃度を 400ppm として, (2) 式を用いて 0~5cm 層, 5~15cm 層, 15~25cm 層, 25~35cm 層の各層における CO<sub>2</sub> 拡散速度をそれぞれ求めた。図-3 に示すように, 土壌呼吸速度の観測値からそれらの値を順次差し引いていくことにより, 式 (6) によって土壌各層での湧き出し速度を推定することが可能となる。

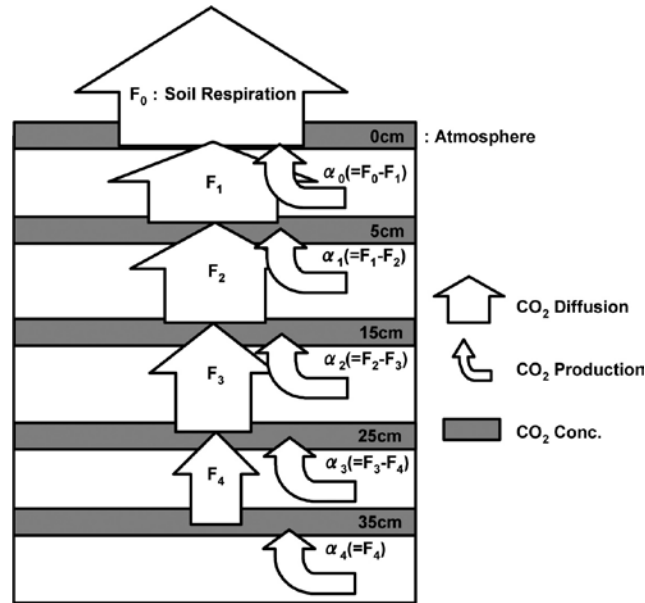


図-3 土壌呼吸速度と各層のCO<sub>2</sub>拡散速度、CO<sub>2</sub>湧き出し速度の関係  
Fig. 3. Diagram of CO<sub>2</sub> flux calculation.

$$\alpha_i = F_i - F_{i+1} \quad (6)$$

ここで  $F_i$  および  $F_{i+1}$  はそれぞれ図-3 に示す土壌中の上下層のCO<sub>2</sub>拡散速度 ( $\text{kgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\alpha_i$  は各層のCO<sub>2</sub>湧き出し速度の推定値 ( $\text{kgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) である。ただし,  $F_0$  は土壌呼吸速度の観測値である。また, 35cm より下層のCO<sub>2</sub>拡散速度は求められないため,  $F_4$  と  $\alpha_4$  は等しい値を取り, 35cm 以深からの湧き出し速度を示す。

無降雨時など, 土壌中のガス拡散が安定的に生じている場合には, (6) 式によって土壌中のCO<sub>2</sub>湧き出し速度が合理的に推定できることが知られている (Hirano *et al.*, 2003; Hashimoto *et al.*, 2007)。一方で, 降雨時に拡散以外の要因によって土壌中CO<sub>2</sub>の移動が生じる際には, 図-3 のように拡散のみを考慮して推定した「みかけの」湧き出し速度に何らかのシグナルが現れると考えられるため, 無降雨時と降雨中の湧き出し速度を区別し, 両者の比較を行った。

また, 土壌各層のCO<sub>2</sub>濃度と, (5) 式と土壌水分の観測値から求まる気相率から, 土壌中に存在するCO<sub>2</sub>の量 (CO<sub>2</sub>貯留量) が (7) 式のように求められる。

$$S = \sum_i \frac{C_i \varepsilon_i}{\Delta z_i} \quad (7)$$

ここで  $S$  はCO<sub>2</sub>貯留量 ( $\text{kgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$ ) であり,  $C_i, \varepsilon_i$  はそれぞれ土壌各層でのCO<sub>2</sub>濃度と気相率,  $\Delta z_i$  は土壌各層の厚さ (m) である。CO<sub>2</sub>貯留量は, 土壌中でのCO<sub>2</sub>湧き出し量と鉛直方向の拡散速度勾配に応じて変化するため, その変化を追跡することは降雨時の土壌中でのCO<sub>2</sub>の挙動を知る上で重要だと考えられる。

## 4. 結果

### 4.1 観測結果

図-4に降雨イベント1および2における時間雨量, 土壌水分(体積含水率), 土壌中CO<sub>2</sub>濃度, 土壌呼吸速度の観測結果を示す。降雨イベント1では, 5月10日から11日の約24時間の総雨量が29mm, 最大時間雨量が3.5mm/hであった。降雨イベント2には9月18日(10mm)と, 19日から20日(86.5mm)の2回の降雨が含まれ, 総雨量は96.5mm, 最大時間雨量は20mm/hであった。連続した降雨日を同一降雨イベントとしたとき, 2008年の降雨イベント総数は59であり, 降雨イベント1と2は, それぞれ25番目と7番目の規模であった。先行降雨として, 降雨イベント1の前には5月2日から4日にかけて総雨量58mmの降雨が, 降雨イベント2の前には9月16日に総雨量11mmの降雨があった。両イベント間で降雨前の土壌水分には差があり, 降雨イベント1では0.52~0.54程度であったのに対し, 降雨イベント2では0.44~0.48程度であった。降雨後の最後の観測時における土壌水分は, それぞれ0.54~0.56程度, 0.53程度となり, その差は小さくなっていた。どちらの降雨イベントでも, 土壌呼吸速度観測は降雨前から開始し, 降雨終了後もしばらく継続した。

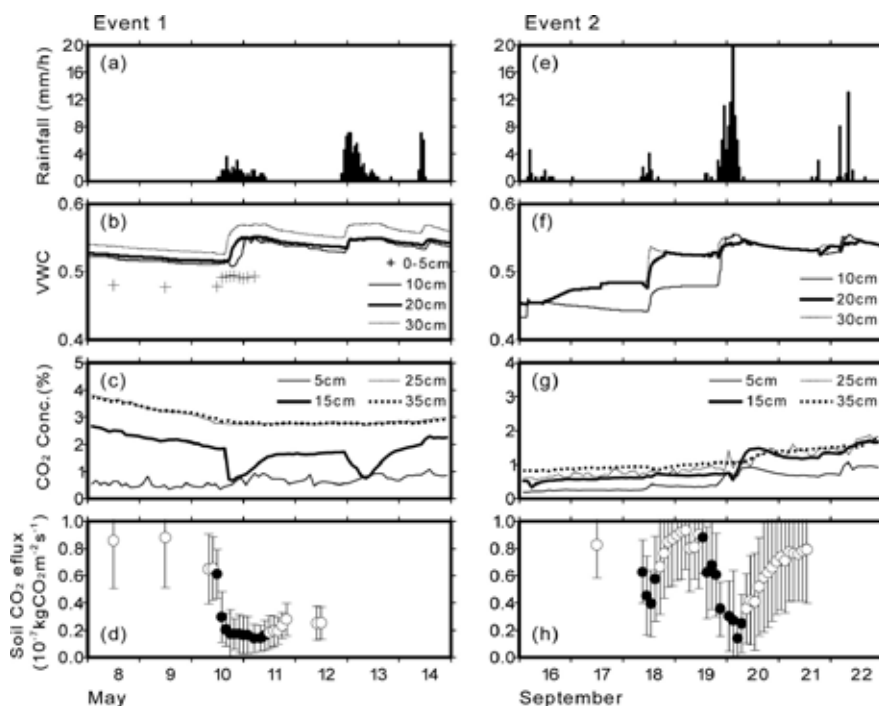


図-4 降雨イベント1および2における観測結果

(a) (e):雨量, (b) (f):土壌水分, (c) (g):土壌中CO<sub>2</sub>濃度, (d) (h):無降雨時の土壌呼吸速度 (○)と降雨時の土壌呼吸速度 (●)。土壌呼吸速度のエラーバーは標準偏差を表す。

Fig. 4. Time series of observation data in Events 1 and 2 for (a)(e): rainfall, (b)(f): volumetric water content (VWC) in soil, (c)(g): soil CO<sub>2</sub> concentration and (d)(h): soil respiration rate. Soil respiration rate is identified without rainfall (open circles) and during rainfall (closed circles). Error bars indicate standard deviation.

図-4 から、土壤中  $\text{CO}_2$  濃度の変化は、特に深度 15cm において、2つの降雨イベントで異なっていたことが分かる。降雨イベント 1 では、降雨開始から数時間後に深度 15cm の  $\text{CO}_2$  濃度が大きく低下し、その後降雨終了時まで回復している。一方、降雨イベント 2 では、9月20日の降雨終了直前に深度 15cm の  $\text{CO}_2$  濃度が上昇を開始し、降雨終了後にピークを迎えるが、降雨後も降雨前より高い濃度を保っている。他の深度の変化は 15cm に比べると顕著ではないが、降雨イベント 1 では、降雨前から低下傾向にあった深度 25cm と 35cm の濃度が降雨開始とともに低下をやめて一定の値を示しており、降雨イベント 2 では、深度 5cm の濃度が深度 15cm と同様に降雨開始後に上昇し、降雨前から上昇傾向にあった深度 25cm と 35cm の濃度が、降雨を境に上昇傾向を強めたように見える。また、降雨イベント 2 における深度 5cm の濃度変化は、深度 15cm の変化に先行して現れている。

土壌呼吸について、2つの降雨イベント前の土壌呼吸速度は同程度であった。前述のように、対象地での土壌呼吸速度は7月に極大値をもつ季節変化を示す。降雨イベント 1 を観測した5月と、降雨イベント 2 を観測した9月は、極大値を挟んで例年同程度の土壌呼吸速度が観測される。どちらの降雨イベントも降雨時に土壌呼吸速度が大きく低下するという点で共通していたが、降雨イベント 1 では降雨後も土壌呼吸速度が低下したまま回復しないのに対して、降雨イベント 2 では、降雨後に降雨前と同程度まで土壌呼吸速度が回復しているという違いがある。

次に、個別の観測点での土壌呼吸速度の変化について検討する。図-5 は、観測点 1~9 (図-2) の土壌呼吸速度の時間変化を示したものである。降雨イベント 1 と 2 において、降雨前の土壌呼吸速度の大きさに応じてそれぞれ3つのグループに分けてある。図から、土壌呼吸速度の各観測点間の大小関係は、必ずしも降雨前後で一致していないことが分かる。降雨イベント 1 においては、降雨後の土壌呼吸速度の平均値は降雨前の値に比べて低い(図-4)が、観測点 8

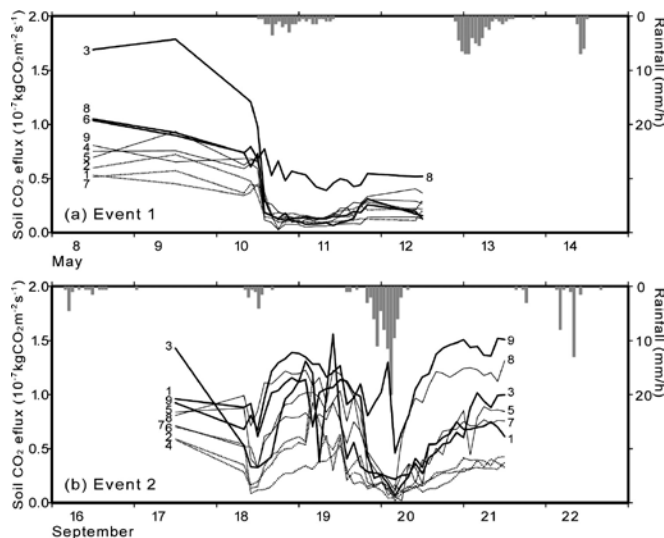


図-5 各観測点の土壌呼吸速度の変化

降雨前の土壌呼吸速度によって3つのグループ(土壌呼吸速度大:太実線, 中:実線, 小:点線)に分けて示している。

Fig. 5. Time series of soil respiration rate at each observation point. Observation points are classified into three groups according to the respiration rate (rapid: bold line, intermediate: solid line, slow: broken line).



の土壌呼吸速度は降雨前後を通して比較的大きな値を維持している。一方、降雨前に最も大きな土壌呼吸速度を示していた観測点3は、降雨時に急激な土壌呼吸速度の低下を示し、降雨後も低下したままである。降雨後の土壌呼吸速度が降雨前と同程度に回復していた降雨イベント2においては、降雨前に大きな土壌呼吸速度を示していた観測点における土壌呼吸速度が、降雨後の回復時にも上位にきていることが分かる。ただし、個別の観測点間の大小関係には変化が見られる。特に、観測点8や9は、降雨前の土壌呼吸速度より降雨後の土壌呼吸速度の方が大きな値を示し、降雨後に土壌呼吸速度が回復した際に、降雨前と同じ状態に戻っているわけではないことが分かる。

このように、5月と9月の降雨イベントでは、土壌中CO<sub>2</sub>濃度、土壌呼吸速度の変化が相互に異なることが明らかになった。溝口ら(2003)、中本ら(2001)の結果と比較すると、土壌中CO<sub>2</sub>濃度の変化は、降雨時に上昇するという点で降雨イベント2で共通点が見られた。土壌呼吸速度に関しては、降雨時に低下するという点で両イベントとも溝口ら(2003)と共通していたが、溝口ら(2003)の観測では、降雨イベント2と同様に降雨後短時間で土壌呼吸速度の回復が見られた。溝口ら(2003)は、他に降雨時の土壌呼吸速度に大きな変化が見られない事例や、降雨初期に僅かな上昇が見られる事例も報告している。

#### 4.2 土壌各層でのCO<sub>2</sub>湧き出し量

図-6は、土壌呼吸速度観測値とCO<sub>2</sub>拡散速度から求めた土壌各層でのCO<sub>2</sub>湧き出し速度の変化を示している。式(3)、(4)から求まる土壌中ガス拡散係数(D<sub>s</sub>)の変化も併せて示した。

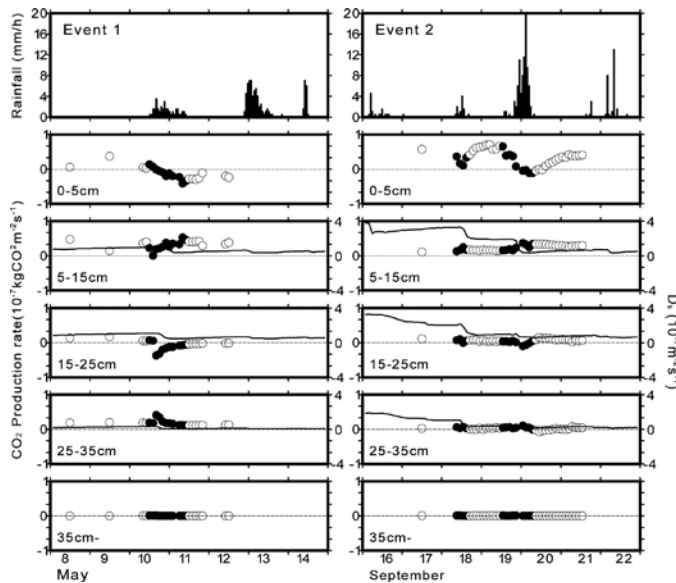


図-6 降雨イベント1および2における土壌各層からのCO<sub>2</sub>湧き出し速度推定値の変化  
無降雨時(○)と降雨時(●)で区別されており、5~15、15~25、25~35cmの3層については、ガス拡散係数(D<sub>s</sub>)の変化も示している。

Fig. 6. Profile of estimated soil CO<sub>2</sub> production rate in Events 1 and 2. Soil CO<sub>2</sub> production rate is identified without rainfall (open circles) and during rainfall (closed circles). Gas diffusion coefficients in soil (D<sub>s</sub>) at 5-15, 15-25, 25-35cm are also shown.

まず降雨前に着目すると、降雨イベント1と2の前では、CO<sub>2</sub>湧き出し速度の深度分布に違いがあることが分かる。降雨イベント1の前は、比較的深い土壤からもCO<sub>2</sub>の湧き出しがある。地表から深度5cmまでと、深度5cmから15cmまでの湧き出し速度が同程度で大きな割合であるが、深度35cmまでの層からの湧き出しも土壤呼吸に寄与していた。一方、降雨イベント2の前は、CO<sub>2</sub>湧き出し速度の大部分が地表近くの土壤を起源としている。CO<sub>2</sub>の湧き出しは地表から深度5cmまでに集中しており、5cmから25cmまで湧き出し速度は小さく、25cm以深からの湧き出しはほとんど無い。

降雨中の湧き出し速度推定値の土壤各層での変化の大きさは、降雨前の湧き出し速度の大きさに対応しているように見える。降雨イベント1においては、深度35cmまで比較的大きな変化を見せているのに対して、降雨イベント2では、地表から深度5cmまでの層以外での変化は小さい。また、降雨イベント1では地表から深度5cmまでの層、深度15cmから深度25cmまでの層で湧き出し速度が著しく低下し、負の値を示しているのに対して、降雨イベント2では、地表から深度5cmまでの層で湧き出し量が大きく低下しているものの、降雨イベント1に比較すると負の値は僅かに現れるだけである。

降雨後について、降雨イベント1では土壤呼吸速度の低下(図-4)に対応して湧き出し速度も回復しないが、降雨イベント2では回復している。ただし、降雨イベント2後の湧き出し速度の深度ごとの割合は、地表から深度5cmまでで降雨前より低下し、深度5cmから深度15cmまでの層で降雨前より増大している。

土壤中ガス拡散係数の降雨前の値は、土壤水分の値(図-4)に対応して、降雨イベント1より降雨イベント2の方が大きい。両イベントで降雨時に土壤中ガス拡散係数は低下しているが、降雨イベント2における低下の方がより顕著である。土壤表層ほど降雨時の低下は大きいですが、降雨後の回復は緩やかであり、図-6に示した期間内ではほとんど回復を示していない。

### 4.3 CO<sub>2</sub>貯留量

図-7は、土壤各層のCO<sub>2</sub>濃度と気相率から求めた土壤中CO<sub>2</sub>貯留量の変化を示している。土壤中CO<sub>2</sub>貯留量は深度35cmまでの値を算出し、地表から深度15cmまでの層(上層貯留量)と深度15cmから35cmまでの層(下層貯留量)に分けて示している。土壤中CO<sub>2</sub>貯留量の2時間ごとの増減と、地表から2時間あたりに放出されるCO<sub>2</sub>量(土壤呼吸量:土壤呼吸速度から算出)も併せて示した。

図-7(a),(c)において、降雨前に着目すると、両降雨イベントの前で土壤中CO<sub>2</sub>貯留量が異なることが分かる。上層貯留量と下層貯留量を合わせると、降雨イベント1の前は降雨イベント2の前の2倍から3倍程度の貯留量を有していた。地表から2時間あたりに放出されるCO<sub>2</sub>量と比較すると、降雨イベント1において土壤中CO<sub>2</sub>貯留量が3倍程度大きいものに対して、降雨イベント2では同程度であった。また、降雨イベント1の前の土壤中CO<sub>2</sub>貯留量はやや減少傾向にあることが見て取れるのに対して、降雨イベント2の前にはほぼ一定の値を維持していた。

降雨時のCO<sub>2</sub>貯留量の変化も両イベントで異なった。降雨イベント1では、5月10日の降雨開始数時間後に土壤中CO<sub>2</sub>貯留量が減少している。減少は上層貯留量で顕著であり、下層貯留量の減少に対して約3倍であった。同様の変化は、土壤呼吸速度観測後の12日から13日にかけての降雨でも見られたが、14日の降雨では見られなかった。一方、降雨イベント2では、9月18日、19日の降雨開始時には顕著な変化は見られないが、20日の降雨終了前から上層貯留

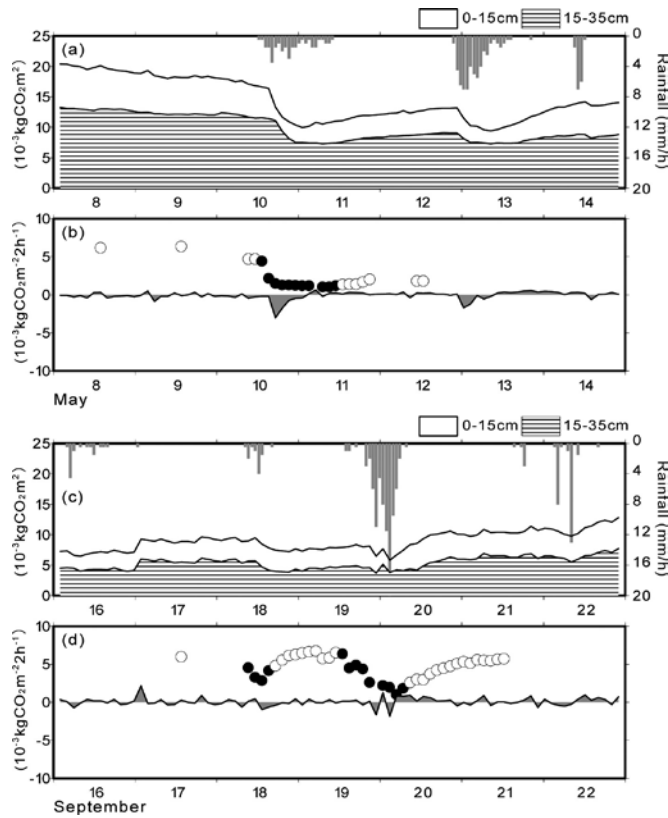


図-7 土壌中 CO<sub>2</sub> 貯留量と土壌呼吸量の変化

(a) (c) : 0~15cm と 15~35cm の層で区別された土壌中 CO<sub>2</sub> 貯留量の変化。(b) (d) : 土壌中 CO<sub>2</sub> 貯留量の 2 時間ごとの増減と、2 時間ごとに積算された土壌呼吸量。土壌呼吸量は無降雨時 (○) と降雨時 (●) で区別されている。

Fig. 7. Time series for soil CO<sub>2</sub> storage in (a) Event 1 and (c) Event 2, and time series of differential of soil CO<sub>2</sub> storage and soil respiration (accumulated every 2 h). Soil CO<sub>2</sub> storage is shown for 0–15cm and 15–35cm. Soil respiration is identified without rainfall (open circles) and during rainfall (closed circles).

量が増加を開始していることが分かる。降雨終了後は、降雨イベント 1, 2 ともに、上層貯留量と下層貯留量で緩やかな増加傾向が見て取れた。

ただし、図-7 (b), (d) から、土壌中 CO<sub>2</sub> 貯留量の変化は土壌呼吸量にそれほど影響を与えないことが分かる。2 時間ごとの土壌中 CO<sub>2</sub> 貯留量の変化と土壌呼吸量を比較すると、降雨時以外のほとんどの期間において、土壌中 CO<sub>2</sub> 貯留量の増減量は土壌呼吸量に比べて無視できる程度の範囲で変動している。降雨時については、降雨イベント 1 (5/10 の午後)、降雨イベント 2 (5/19 ~ 5/20 にかけて) とともに土壌中 CO<sub>2</sub> 貯留量の増減が土壌呼吸量と同オーダーになっていることがある。しかしながら、そのような土壌中 CO<sub>2</sub> 貯留量の増減が土壌呼吸量に与えている影響は見取れない。

## 5. 考察

4.1 節において、降雨時の土壌中  $\text{CO}_2$  濃度と土壌呼吸速度の変化は、降雨イベント 1 と 2 で異なることが分かった。それぞれの降雨イベントにおいて、土壌表面／土壌中でどのような現象が生じていたのか、4.2 節と 4.3 節で示された結果とともに考察する。

### 5.1 降雨イベント 1 で生じた現象

降雨イベント 1 では降雨開始とともに土壌呼吸速度は低下している（図-4）が、土壌中のガス拡散係数の低下は、深度 5cm 以深で降雨開始後数時間経過してから生じている。したがって、土壌中のガス拡散係数の全体的な低下が地表から放出される  $\text{CO}_2$  量の低下要因となっているわけではない。降雨開始と同時に観測された土壌呼吸速度の低下は、中本ら（2001）が指摘するように、土壌表面／表層の雨水による被覆に伴う拡散停止によって生じていると解釈するのが適当だと言える。

降雨イベント 1 では、深度 15cm における降雨中の土壌中  $\text{CO}_2$  濃度の低下が顕著であるが（図-4）、同時に上層での土壌中  $\text{CO}_2$  貯留量が降雨時に低下している（図-7）。いったん低下した土壌中  $\text{CO}_2$  濃度は降雨中に回復に転じるが、 $\text{CO}_2$  貯留量は低下したままであり、降雨開始後に土壌中の  $\text{CO}_2$  が急激に失われてしまったことが分かる。土壌中  $\text{CO}_2$  濃度は下層ほど高くなるので、深度 15cm における土壌中  $\text{CO}_2$  濃度が低下するためには、何らかの要因によって深度 15cm 付近で  $\text{CO}_2$  が吸収されるか、あるいは深度 15cm より浅い層とのガス交換が生じる必要がある。深度 5cm の土壌中  $\text{CO}_2$  濃度が低下していないこと（図-4）から、浸透した雨水による  $\text{CO}_2$  の吸収は生じていないと考えられる。また、深度 15cm での土壌中  $\text{CO}_2$  濃度が深度 5cm の土壌中  $\text{CO}_2$  濃度と同程度まで低下していることから、土壌中でのガス交換だけでは深度 15cm での土壌中  $\text{CO}_2$  濃度の低下を説明することは困難であろう。深度 15cm のほぼ全ての土壌中ガスが深度 5cm の土壌中ガスと置換されなければこのような低下は起きないからである。したがって、深度 15cm での土壌中  $\text{CO}_2$  濃度の低下は、雨水の浸透に伴う土壌中のガスの押し出しと、雨水の浸透に伴って土壌表面から流入してきた大気との交換によって生じている可能性がある。雨水の土層への浸透は平面的に均一ではなく、選択的に生じることが知られている（Weiler and Flühler, 2004）が、このような浸透様式が、降雨時の土壌中のガス交換とそれに伴う  $\text{CO}_2$  濃度の低下に関与していると考えられる。降雨時の土壌呼吸速度の変化が観測点によって異なっていたこと（図-5）も、このことに対応していると考えられる。

上述のような、雨水の浸透に伴う強制的なガス交換が生じていることを裏付ける結果として、 $\text{CO}_2$  湧き出し速度の深度分布の推定結果（図-6）が挙げられる。降雨イベント 1 中の湧き出し速度の推定値はいくつかの深度で負の値を取っているが、土壌中の特定の層でのみ  $\text{CO}_2$  の吸収が生じるとは考えにくい。ガス拡散による  $\text{CO}_2$  の移動という前提条件が満たされていないため、「みかけの」湧き出し速度が負の値を取ったと解釈することが妥当であろう。すなわち、雨水の選択的な浸透に伴う強制的なガス移動／交換のために、土壌中  $\text{CO}_2$  濃度の深度分布が拡散以外の要因で変化した結果を反映していると考えられる。

### 5.2 降雨イベント 2 で生じた現象

降雨イベント 2 における土壌呼吸速度の低下も、降雨イベント 1 と同様に、土壌表面／表層

の雨水による被覆に伴う拡散停止によって生じていると考えられる。一方、降雨イベント1と異なり、降雨中に土壌中CO<sub>2</sub>濃度の低下が見られない要因として、降雨イベント2開始前の土壌中CO<sub>2</sub>濃度が降雨イベント1開始前と比べて低かったために、ガス交換の影響が明確に検知できなかった可能性がある。さらに、降雨イベント2では、降雨イベント1では見られなかった深度15cmでのCO<sub>2</sub>濃度の上昇が生じていることに関して、降雨イベント1と2でのCO<sub>2</sub>湧き出し速度の深度分布の違いが大きな影響を与えている可能性が以下のように考察できる。

降雨イベント1と2の開始前のCO<sub>2</sub>湧き出し速度推定値(図-6)を比較したとき、降雨イベント1開始前は比較的深い層からの湧き出しも土壌呼吸に寄与していたのに対して、降雨イベント2開始前は大部分が地表近傍からの湧き出しによるものであったことが分かる。したがって、雨水による地表の被覆によって地表からの放出が妨げられたCO<sub>2</sub>は、降雨イベント2では地表近傍にとどまることになる。それに対応して、まず深度5cmのCO<sub>2</sub>濃度が上昇し、続いて深度15cmのCO<sub>2</sub>濃度が上昇している(図-4)。このようなCO<sub>2</sub>濃度の上昇が、降雨に伴う強制的なガス交換による土壌中CO<sub>2</sub>濃度の減少の影響を弱めている可能性がある。降雨後の土壌呼吸速度の回復とともに、土壌中CO<sub>2</sub>濃度の上昇が停止していることから、雨水の影響を強く受ける期間にCO<sub>2</sub>濃度の上昇が生じており、ガス交換によるCO<sub>2</sub>濃度の減少が生じていたとしても相殺され易いことが読み取れる。

降雨イベント2終了後には、土壌中ガス拡散係数の低下(図-6)に伴って、図-7(c)に示すように土壌中CO<sub>2</sub>貯留量の増加が見られるものの、表層からの湧き出しの寄与が大部分であるために、短時間で土壌呼吸速度が回復していると考えられる。

### 5.3 降雨が土壌呼吸速度と土壌中CO<sub>2</sub>濃度に与える影響

以上を総合すると、降雨時には、雨水による地表の被覆によるガス拡散の停止と、雨水の浸透に伴う強制的なガス交換が生じることによって、土壌中CO<sub>2</sub>濃度と土壌呼吸速度が変化すると考えられる。それぞれの変化の程度は、降雨前の土壌中CO<sub>2</sub>貯留量やCO<sub>2</sub>湧き出し速度の深度分布に影響されて変化するため、降雨時に引き起こされる現象に差異が生じるとまとめることができよう。

降雨イベント1と2では雨量が異なったが、雨量の違いによる影響は小さかったと考えられる。降雨イベント2の方が雨量が大きく、イベント前後での表層・深層での土壌水分の変化も大きかった。にも関わらず、降雨イベント2では降雨後すぐに土壌呼吸速度が回復していた。それに対して、降雨イベント1では降雨後の土壌呼吸速度の回復が遅れており、この点で、雨量の小さな降雨イベント1の方が、土壌呼吸速度に対する降雨の影響が大きかったと言える。前節で述べたように、降雨イベント2では、土壌呼吸が主に土壌表層からのCO<sub>2</sub>の湧き出しによって生じていたために、降雨後の回復が早かったと考えられる。一方、降雨イベント1では、深層からのCO<sub>2</sub>の湧き出しの土壌呼吸への寄与が大きかったため、土壌水分の変化に伴って生じた拡散係数の低下の影響を、降雨終了後に受けることになった可能性がある。しかしながら、降雨イベント1では、土壌中CO<sub>2</sub>貯留量も降雨後に僅かな増大しか示していない(図-7)ことから、土壌中でのCO<sub>2</sub>湧き出し量自体が降雨を契機として低下していることが見て取れる。降雨による地温の変化(降雨イベント2ではほとんど無かったのに対して、降雨イベント1では約3℃低下した)などの影響についても併せて検討する必要があるだろう。

なお、降雨によって生じる土壌中CO<sub>2</sub>貯留量の変動が土壌呼吸速度に与える影響は小さかつ

た(図-7)。Hirano *et al.* (2003) が指摘するように、土壌中の気相体積の小ささがその要因であろう。したがって、土壌中 CO<sub>2</sub> 貯留量の変動は主に土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度の変化に現れると考えられる。

また、土壌呼吸速度は空間的なばらつきが大きく、降雨時の変化も地点によって異なった(図-5)。雨水の選択的な浸透に伴うガス交換が土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度低下の要因として挙げられたが、そのような浸透に関わるマクロポアでは、無降雨時の土壌呼吸が活発に生じることがある(Ohashi *et al.*, 2007)。したがって、降雨が土壌呼吸に与える影響は、ガス・水の移動経路の変化を通して、場所により大きく異なることが考えられる。例えば、降雨イベント2の観測点8や9のように、降雨後の土壌呼吸速度が降雨前の値を上回る場所では、水分増加に伴う土壌中有機物の分解活性の上昇だけでなく、降雨に伴うガス・水の移動経路の変化の影響を受けている可能性も指摘できるだろう。また、図-7(b)では、降雨イベント1の降雨前半に土壌中 CO<sub>2</sub> 貯留量が大きく減少したにも関わらず、その減少に対応した(CO<sub>2</sub> の放出による)土壌呼吸量の上昇は生じていなかった。この点についても、雨水の選択的な浸透に伴うガス交換によって短時間で局所的に放出された CO<sub>2</sub> が、9つの観測点での土壌呼吸速度を順次計測していくという本研究の観測方法では十分に検出できなかったことがその要因の候補として挙げられる。

## 6. 結論

降雨が土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度及び土壌呼吸速度に与える影響を明らかにすることを目的として、2回の降雨イベントにおいて降雨中の連続観測を実施した結果、降雨イベントによって土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度、土壌呼吸速度の変化が異なることが明らかになった。土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度の変化は、特に深度 15cm において、降雨イベントにより上昇/減少と逆の変化を示した点で大きく異なっていた。土壌呼吸速度に関しては、降雨前の値は両降雨イベントで同程度であり、降雨開始後に大きく低下するという点でも共通していた。しかしながら、降雨終了後すぐに土壌呼吸速度が回復する/しないという点で異なっていた。

降雨時の土壌中から CO<sub>2</sub> 湧き出し速度分布の推定値、土壌中の CO<sub>2</sub> 貯留量とあわせて検討した結果、降雨時には、雨水による地表の被覆が引き起こすガス拡散の停止と、雨水の浸透に伴う強制的なガス交換という2つのプロセスによって、土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度と土壌呼吸速度が変化すると考えられた。それぞれのプロセスの寄与の割合が、降雨前の土壌中 CO<sub>2</sub> 貯留量や CO<sub>2</sub> 湧き出し速度の深度分布に影響されて変化するため、降雨イベントによって降雨時に引き起こされる現象は一意に定まらないことが示唆された。

## 謝 辞

本研究を進めるうえで、降雨時集中観測においては、江草智弘氏、額爾徳尼氏、厚井高志氏、佐藤貴紀氏、長谷川賢太郎氏、松澤健介氏、山本哲裕氏、渡邊祐哉氏(以上、東京大学大学院農学生命科学研究科森林理水及び砂防工学研究室)、土肥和貴氏(東京農業大学)、星野晋一郎氏(東京大学農学部)に多大なるご協力をいただいた。さらに、東京大学大学院農学生命科学研究科森林植物学研究室の松下範久准教授には植生の同定を行う上で、同研究科附属千葉演習林の林長をはじめ職員の方々には現場でのさまざまな作業を行う上で多くの助力をいただいた。同研究科森林理水及び砂防工学研究室の大手信人准教授には数々の貴重な助言をいただいた。ここに記して深く感謝致します。なお、本研究は、科学研究費「土壌呼吸速度に降雨が与える影響に関する土

「降中ガス拡散係数の変化に着目した検討」(若手B, 堀田紀文, 課題番号 20780112) の補助を得て行われた。

## 要 旨

降雨が土壌中二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 濃度及び土壌呼吸速度に与える影響を調べるため, 2008 年 5 月(降雨イベント 1)と 9 月(降雨イベント 2)の 2 回の降雨を対象に降雨中の土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度, 土壌呼吸速度の連続観測を行った。その結果, 両降雨で観測値の変化に違いが見られた。土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度の変化は, 特に深度 15cm において大きく異なっていた。降雨イベント 1 では, 降雨開始から数時間後に CO<sub>2</sub> 濃度が大きく低下し, その後降雨終了時まで回復した。一方, 降雨イベント 2 では, 降雨終了直前に CO<sub>2</sub> 濃度が上昇を開始し, 降雨終了後にピークを迎えた後も降雨前より高い濃度を保っていた。土壌呼吸速度に関しては, 降雨前の値は両降雨で同程度であり, 降雨開始後に大きく低下するという点でも共通していた。しかしながら, 降雨イベント 1 では降雨終了後も土壌呼吸速度が回復しなかったのに対して, 降雨イベント 2 後には, 降雨前と同程度まで土壌呼吸速度が回復した。土壌各層の CO<sub>2</sub> 湧き出し速度, CO<sub>2</sub> 貯留量の推定結果から, 降雨イベント 1 では, 雨水が土壌表面を被覆することによる CO<sub>2</sub> 拡散の停止に加えて, 雨水に伴って侵入する低濃度 CO<sub>2</sub> による土壌中高濃度 CO<sub>2</sub> の押し出しという 2 つの現象が生じたと考えられた。一方, 降雨イベント 2 では, CO<sub>2</sub> 拡散の停止が卓越していたと考えられた。降雨中に生じる現象が 2 回の降雨イベントで異なった要因は, 降雨前の土壌中 CO<sub>2</sub> 環境の違いにあることが示唆された。

キーワード: 土壌呼吸, 降雨, 土壌中二酸化炭素濃度, ガス拡散

## 引 用 文 献

- Davidson, E.A., Verchot, L.V., Cattanino, J.H., Ackerman I.L. and Carvalho, J.E.M. (2001) Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry* 48: 53-69.
- Hashimoto, S., Suzuki, M. (2002) Vertical distribution of carbon dioxide diffusion coefficients and production rates in forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1151-1158.
- Hashimoto, S., Tanaka, N., Kume, T., Yoshifuji, N., Hotta, N., Tanaka, K. and Suzuki M. (2007) Seasonality of vertically partitioned soil CO<sub>2</sub> production in temperate and tropical forest. *J. For. Res.* 12: 209-221.
- Hirano, T., Kim, H. and Tanaka, Y. (2003) Long-term half-hourly measurement of soil CO<sub>2</sub> concentration and soil respiration in a temperate deciduous forest. *J Geophys. Res.* 108: 4631-4644.
- Jones, H.G. (1992) *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to environmental Plant Physiology.* 456pp. Cambridge University Press, New York.
- 溝口康子・大谷義一・渡辺力・安田幸生・岡野通明 (2003) 自動開閉型チャンバーを用いた林床面からの CO<sub>2</sub> 放出速度の長期連続測定. *日本生態学会誌* 53: 1-12.
- Mumford, K.G., Dickson, S.E. and Smith, J.E. (2009) Slow gas expansion in saturated natural porous media by gas injection and partitioning with non-aqueous phase liquids. *Advances in Water Resources* 32: 29-40.
- 中本恭子・神近牧男・早川誠而 (2001) 砂丘地裸地圃場における土壌中 CO<sub>2</sub> 濃度のプロファイル. *中国・四国の農業気象* 14: 68-69.
- Ohashi, M., Kume, T., Yamane, S. and Suzuki, M. (2007) Hot spots of soil respiration in an Asian tropical rainforest. *Geophysical Research Letters*, 34: L08705.

- Raich, J.W. and Nadelhoffer, K.J. (1989) Belowground carbon allocation in forest ecosystems. *global trends Ecology* 70: 1346-1354.
- Schlesinger, W.H. (1997) *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. 588pp. 2nd edn. Academic Press, San Diego.
- Weiler, M. and Flühler, H. (2004) Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils. *Geoderma* 120: 137-153.

(2009年4月28日受付)

(2010年5月10日受理)

### Summary

Soil respiration and soil CO<sub>2</sub> concentration were measured during two rainfall events in May (Event 1) and September (Event 2) 2008 to investigate the effect of rainfall on soil respiration and soil CO<sub>2</sub> concentration. The behavior of soil respiration and soil CO<sub>2</sub> concentration during rainfall differed between Events 1 and 2. Soil CO<sub>2</sub> concentrations were significantly different at a depth of 15 cm. During Event 1, soil CO<sub>2</sub> concentration decreased rapidly in the first several hours after rainfall began, but returned to the initial concentration by the time rainfall stopped. In contrast, during Event 2, soil CO<sub>2</sub> concentration increased at the end of rainfall and reached a peak after rainfall stopped, thereafter retaining a higher CO<sub>2</sub> concentration than that before rainfall. Soil respiration during both Events 1 and 2 was similar at the beginning of rainfall and decreased rapidly after rainfall began. However, after rainfall, soil respiration in Event 2 recovered to the same level observed before rainfall, whereas soil respiration in Event 1 remained lower. From the estimated soil CO<sub>2</sub> production profile and soil CO<sub>2</sub> storage, lack of gas diffusion induced by coverage of the soil surface with rainwater and gas exchange enforced by infiltrating rainwater affected soil respiration and soil CO<sub>2</sub> concentration during Event 1. During Event 2, on the other hand, only the lack of gas diffusion was dominant. It is inferred that such different processes during different rainfall events depend on the initial condition of the soil CO<sub>2</sub> regime.

**Key words** : Soil respiration, rainfall, soil CO<sub>2</sub> concentration, gas diffusion