

平成 22 年 5 月 19 日現在

研究種目：若手研究 (B)
研究期間：2008～2009
課題番号：20780112
研究課題名 (和文) 土壌呼吸速度に降雨が与える影響に関する土壌中ガス拡散係数の変化に着目した検討
研究課題名 (英文) Changes in soil CO ₂ concentration and soil respiration during rainfall events: analysis focused on change of soil gas diffusion coefficient
研究代表者
堀田 紀文 (HOTTA Noeifumi)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・助教
研究者番号：323478

研究成果の概要 (和文)：降雨が土壌中の二酸化炭素 (CO₂) 濃度と土壌呼吸速度に与える影響を調べるため、降雨時に土壌中 CO₂ 濃度の深度分布と土壌呼吸速度の連続観測を実施した。観測データは、併せて測定された地温・土壌水分から得られる土壌中のガス拡散係数と比較された。結果として、土壌中 CO₂ 貯留量が降雨時の短期的な土壌中 CO₂ 濃度・土壌呼吸速度の変化パターンを規定することが示された。それらの変化パターンは、降雨や土壌中 CO₂ 湧き出し量の深度分布の季節変化に伴い、降雨ごとに異なる。

研究成果の概要 (英文)：Soil respiration and soil CO₂ concentration profile were measured during two rainfall events to investigate the effect of rainfall on soil respiration and soil CO₂ concentration. Those data were compared with gas diffusion coefficients in soil derived from observed soil temperature and moisture. As a result, soil CO₂ storage determined the patterns of soil CO₂ concentration and soil respiration during rainfall. The pattern was different among rainfall events due to different soil CO₂ regime which was induced by seasonality of rainfall and soil CO₂ production profile.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・森林科学

キーワード：土壌呼吸・土壌中二酸化炭素濃度・土壌中ガス拡散係数・降雨・季節性

1. 研究開始当初の背景

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 (CO₂) 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 CO₂ 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 CO₂ 濃度分布の測定の併用 (Hashimoto et al., 2007) や、土壌中 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ の湧き出しの積算値として理解される。土壌中の CO₂ 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 CO₂ 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において、異なる二深度で土壌中 CO₂ 濃度の連続観測を実施し、降雨時に土壌中 CO₂ 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、異なった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 CO₂ 濃度分布だけを測定している。降雨時に土壌中の CO₂ 拡散プロセス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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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。

2. 研究の目的

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 CO₂ 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 CO₂ 濃度の同時測定を連続的に実施した。測定結果を用いて CO₂ 湧き出し量の深度分布と土壌中に貯留された CO₂ 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 CO₂ 環境の変化の実態とそのメカニズムについて検討した。

3. 研究の方法

(1) 観測

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、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。

観測では、土壌呼吸速度、土壌中 CO₂ 濃度、土壌水分、地温、雨量について測定した。降雨中の集中観測は 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。

土壌呼吸速度観測には赤外線 CO₂ ガスアナライザー (Li-6252 及び Li6262, Li-COR 社), エアーポンプ (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 0.013m³) 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 CO₂ ガス濃度の経時変化を記録した。

記録した CO₂ 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、F₀ は土壌呼吸速度 (kgCO₂・m⁻²・s⁻¹), dC/dt はチャンバー内の CO₂ ガス濃度の時間変化 (ppm・s⁻¹), V は 1mol あたりの気体の体積 (m³・mol⁻¹), V₁ はチャンバーの容積 (m³), 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 CO₂ 濃度は、5cm, 15cm, 25cm, 35cm の各深度に CO₂ 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)・CO₂ ガス検知管 (ガステック) を用いて測定した土壌中 CO₂ 濃度と自記センサーによる土壌中 CO₂ 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。

(2) 解析方法

土壌中での CO₂ 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 CO₂ のフラックスは、土壌中 CO₂ 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 CO₂ 拡散速度 (kgCO₂・m²・s⁻¹)、D_s は土壌中ガス拡散係数 (m²・s⁻¹) である。z は土壌の深さ方向を表し、dC/dz は土壌中の CO₂ 濃度勾配 (kgCO₂・m⁻³・m⁻¹) で、各深度の CO₂ 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/D₀ は相対ガス拡散係数であり、D_s は土壌中ガス拡散係数 (m²・s⁻¹)、D₀ は大気中ガス拡散係数 (m²・s⁻¹)、ε は気相率である。D₀ 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 14.7mm²・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。ε は以下の式で与えられる。

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

ここで θ_s は飽和体積含水率、θ は体積含水率である。θ_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 CO₂ 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 CO₂ 拡散速度をそれぞれ求めた。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。

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

ここで F_i および F_{i+1} はそれぞれ土壌中の上下層の CO₂ 拡散速度 (kgCO₂・m²・s⁻¹)、α_i は各層の CO₂ 湧き出し速度の推定値 (kgCO₂・m²・s⁻¹) である。ただし、F₀ は土壌呼吸速度の観測値である。また、35cm より下層の CO₂ 拡散速度は求められないため、F₄ と α₄ 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 CO₂ 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 CO₂ の移動が生じる際には、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 CO₂ 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 CO₂ の量 (CO₂ 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_2 貯留量 ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$) であり、 C_i 、 ε_i はそれぞれ土壌各層での CO_2 濃度と気相率、 Δz_i は土壌各層の厚さ (m) である。

4. 研究成果

(1) 観測結果

図1に降雨イベント1(a-d)および2(e-h)における時間雨量、体積含水率、土壌中 CO_2 濃度、土壌呼吸速度の観測結果を示す。

図1から、土壌中 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 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 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。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が、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。

このように、5月と9月の降雨イベントでは、土壌中 CO_2 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。

(2) 土壌各層での CO_2 湧き出し量

図2は、土壌呼吸速度観測値と CO_2 拡散速度から求めた土壌各層での CO_2 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_s) の変化も併せて示した。

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_2 湧き出し速度の深度分布

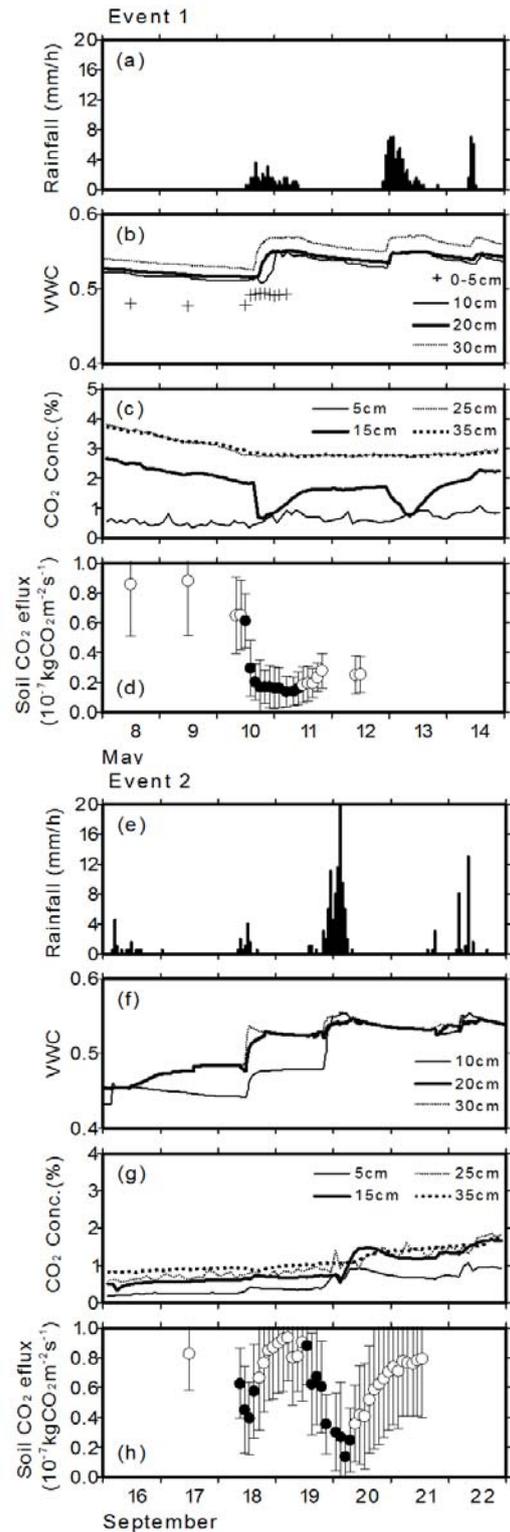


図1 集中観測結果

に違いがあることが分かる。降雨イベント1の前は、比較的深い土壌からも CO_2 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壌呼吸に寄与していた。一方、降雨イベント2の前は、 CO_2 湧き出し速度の大部分が地表近くの土壌を起源とし

ている。CO₂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

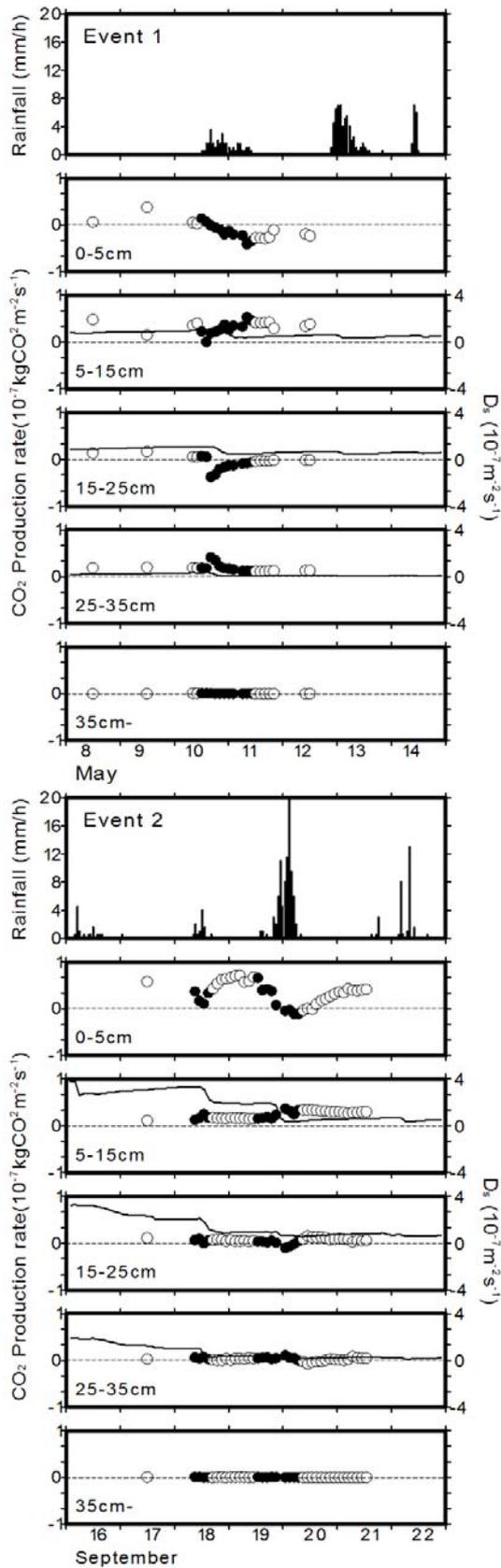


図2 CO₂湧き出し量の深度分布

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1)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1)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、降雨後の回復は緩やかであり、図2に示した期間内ではほとんど回復を示していない。

(3) CO₂貯留量

図3は、土壤各層のCO₂濃度と気相率から求めた土壤中CO₂貯留量の変化を示している。土壤中CO₂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CO₂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CO₂量(土壤呼吸量:土壤呼吸速度から算出)も併せて示した。

図3(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CO₂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CO₂量と比較すると、降雨イベント1において土壤中CO₂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CO₂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CO₂貯留量の変化も両イベント

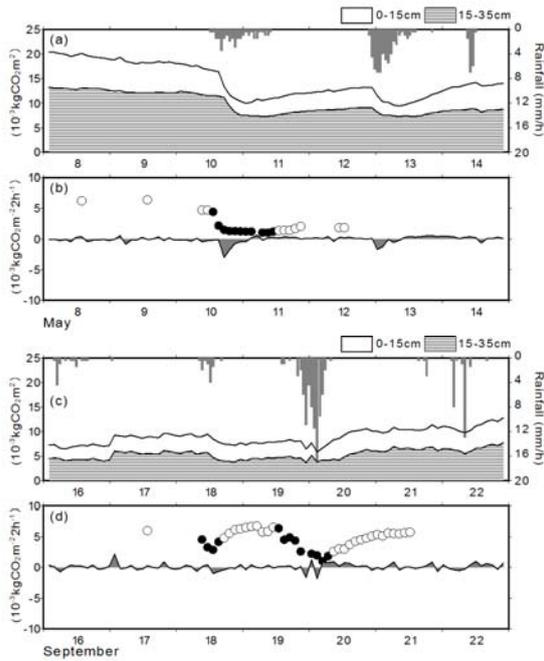


図3 CO₂貯留量の変化と土壌呼吸

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壌中CO₂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、土壌呼吸速度観測後の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3(b)、(d)から、土壌中CO₂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CO₂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CO₂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)とも土壌中CO₂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CO₂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。

(4) 降雨が土壌呼吸速度と土壌中CO₂濃度に与える影響

降雨時の土壌呼吸速度の変化をCO₂湧き出し速度の深度分布、土壌中CO₂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CO₂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CO₂貯留量やCO₂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。

図4に示すように、対象地においては夏季に乾燥が生じるという降雨の季節性が、土壌中ガス拡散係数(Ds)の変化を通して、8月を境に前後で土壌中CO₂濃度が大きく異なる(図1)という土壌中CO₂環境の変化を引き起こしていた。加えて、土壌中CO₂湧き出し速度の深度分布にも季節性が見られた。降雨時に生じる現象の差異は、このような季節性の影響を強く受けていると考えられた。

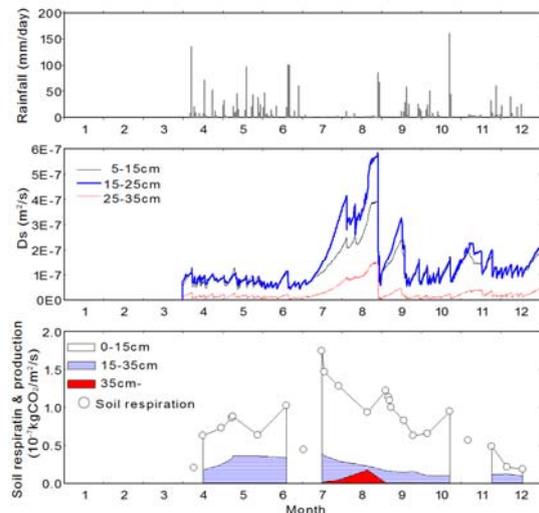


図4 降雨、ガス拡散係数およびCO₂湧き出し量深度分布の季節変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

堀田紀文, 奈良康平, 小田智基, 鈴木雅一.

2010. 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. 東京大学演習林報告, 査読有, 受理.

〔学会発表〕(計1件)

堀田紀文. 2009. 降雨の季節性が土壌呼吸に与える影響. 日本生態学会, 2009年3月19日, 岩手県立大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀田 紀文 (HOTTA Noeifumi)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・助教

研究者番号: 323478

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし