

機関番号：82105

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20780123

研究課題名 (和文) 3次元土壌 CO₂ ガス発生・移動シミュレーションモデルの開発研究課題名 (英文) Developing a three-dimensional model for CO₂ gas production and transfer in soil

研究代表者

橋本昌司 (HASHIMOTO SHOJI)

独立行政法人森林総合研究所・立地環境研究領域・主任研究員

研究者番号：90414490

研究成果の概要 (和文)：本研究では森林土壌中の CO₂ ガスの発生と移動を 3 次元でシミュレーションできる数値モデルを構築した。また、内部から CO₂ ガスが発生しない標準砂、CO₂ センサー、ロガーなどを用いて、人工的に発生させた 3 次元の CO₂ ガス拡散をモニタリングする実験システムを構築した。さらに 3 次元のガス拡散方程式から土壌中のガス拡散係数を逆推定する手法を考案し、実験システムを用いて検証した。

研究成果の概要 (英文)：A three-dimensional model for CO₂ gas production and transfer in forest soils was developed in this study. We developed a system for monitoring three-dimensional gas diffusion. The system is composed of a sample box and CO₂ gas monitoring system. Also, we invented a method for inversely estimating soil gas diffusivity.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：森林生態・保護・保全、土壌温室効果ガス

1. 研究開始当初の背景

(1) 森林土壌からの二酸化炭素(CO₂)ガスの放出は、地球上の炭素循環を考える上でも最も重要なフラックスの一つである。土壌呼吸は大きく分けて、土壌有機物の分解起源と樹木根系の呼吸起源とにわけられ、その比率は気候帯・生態系によって異なると考えられている。多くの研究が行われた結果、温度・水分との関係や、様々な地域での土壌呼吸量や季節性が明らかになっている。現在では、発表

されたデータを集約していく研究や一方でメカニズム理解をより深化する研究が散見し始めている。

(2) なかでも、現在注目されているのが光合成と土壌呼吸の関係である。土壌呼吸は大きく見れば地温と水分によってコントロールされており、多くの場面で季節性の説明がつく。特に地温とプロットすると指数関数的な関係が見られる。しかしながら、細部に目を

向けるとその指数関数的関係の中に、春よりも秋が高いなどのヒステリシスが見られており、土壤呼吸研究者の間でその原因は議論になっていた。最新の研究では光合成がそのヒステリシスの原因の一つではないかと言われている。またヒステリシス以外にも土壤呼吸の Q_{10} 値 (10 度温度が上がったときに土壤呼吸が何倍になるかの指標) の大きな変動が問題になっている。

(3) たとえば、光合成と土壤呼吸の関係についても、現実には、「光合成」→「根系の呼吸」→「土壤中のガス移動」→「地表面からの放出」というプロセスを経るが、現在では「光合成」と「地表面からの放出」を捕らえているのみで、土壤中のガス移動についてはブラックボックスのままである。土壤呼吸の Q_{10} 値についても、各深度の地温の周期のずれや CO_2 発生深度の変動でどれだけ説明がつくかの検討が必要と考えている。また土壤呼吸の大きな空間変動についても、その要因はそもそもの CO_2 発生特性の空間分布と土壤ガス拡散特性の分布に分けて考えることができるが、どちらがどのように寄与しているのかを検討する必要がある。

(4) このように、土壤呼吸の関わる問題をより深く理解するためには、3次元での土壤中の CO_2 ガスの発生と移動の取り扱いが必要である。

2. 研究の目的

研究の最終目標は、野外観測と3次元土壤ガス発生・移動シミュレーションモデルを通じて、土壤呼吸の地下過程を解明することにある。本研究ではそのうち、室内実験を通じて土壤中の CO_2 ガスの発生と移動のデータを取得し、3次元でシミュレーションできるモデルを構築することを目的とした。

3. 研究の方法

ガスの発生と移動を表現するフィックの第2法則を3次元で差分し、コンピュータ言語(C言語)でコーディングを行い3次元のシミュレーションモデルを構築する。また、室内において大型カラムに砂質土壤を充填し、人工的にガスを土壤中に注入した際の土壤中の CO_2 の変化をモニタリングし、コンピュータシミュレーションの結果と比較しながらモデルの検証を行う。

4. 研究成果

(1) ガスの移動を表現する基礎式であるフィックの法則 (速度式) と質量保存則を1次元か

ら3次元への拡張し、C言語でプログラム化を行った。方程式の差分化の際には陰解法を用いた。モデルの行列計算サブルーチンにはインテル・マス・カーネル・ライブラリーの PARADISO関数を使用した。モデルの動作を確認するため、上端を大気に解放した1 m×1 m×1 mのチャンバーに砂を充填し、中心から CO_2 が発生するという条件で、モデル計算を行った。時間刻みは360秒、空間刻みは2 cmとし、108000秒間 (30時間) のガスの移動と表面からのガスの放出量およびその分布をシミュレートした。出力結果をハワイ大学で開発されたGMTソフトウェアを用いて可視化し、それを結合することでガス移動を動的に可視化した (図1)。

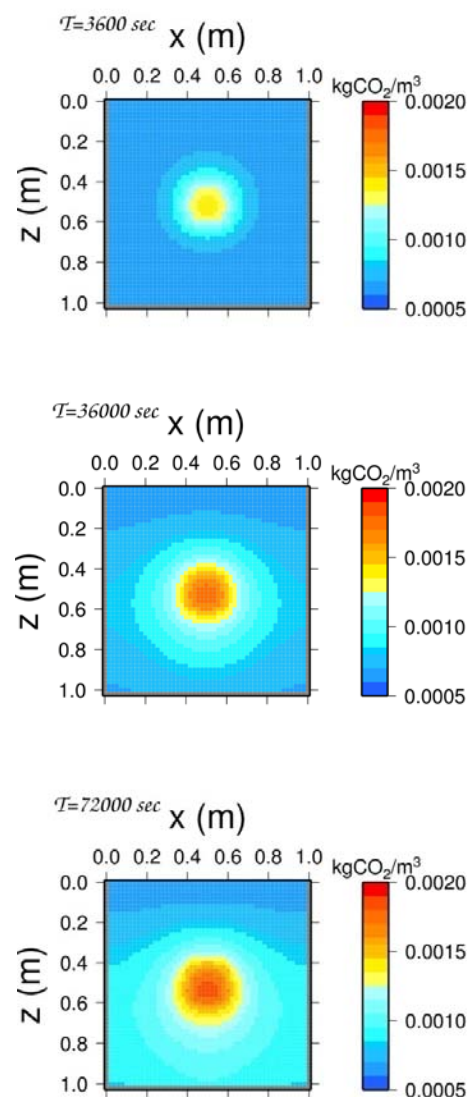


図 1: ガス濃度の変化を可視化した例

(2) 3次元のガス拡散を表現する偏微分方程式には数学的解析解が存在するが (式1)、シミュレーションの結果と比較したところ、両者

が一致することを確認した(図2)。これにより構築されたモデルが正確に差分化されていることを明らかにした。

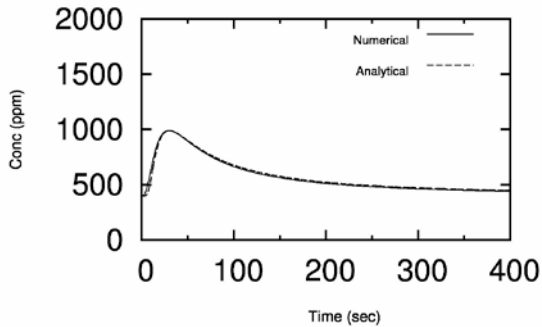


図 2: モデルの出力(数値解)と解析解の比較例

(3)内部からCO₂ガスが発生しない標準砂を用いて、実験システムを構築した。実験システムでは、縦38cm×横24cm×高さ26cmのボックスに豊浦標準砂を10cm深まで充填し、CO₂センサー(Vaisala GMT220)、圧力センサー(Vaisala PTB210)、温度センサー(TandD TR52)、ロガー(オムロンZR-RX40)、パソコンをもちいて土壌中のCO₂濃度をモニターできる(図3)。

センサーから既知の距離に、既知の濃度のCO₂を少量注入し、3次的に拡散していくCO₂の濃度の変化をCO₂センサーでモニターした。今回用いたCO₂センサーは応答遅れがあることが知られているため直接CO₂濃度の波形を比較することはできないが、CO₂濃度の極大時間について検討したところ、およそ100秒の遅れがあることが確認された(図4)。CO₂濃度の極大値はシミュレーション値とほぼ一致した(図5)。

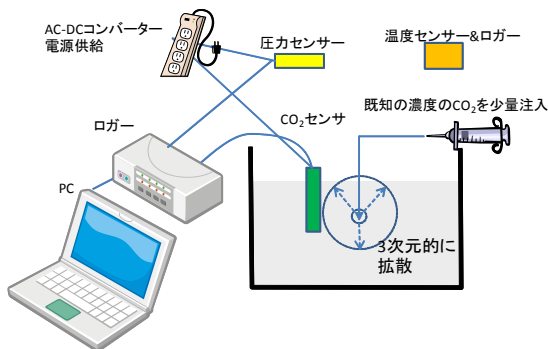


図 3: 砂質土壌を用いた実験システムの概要

(4)3次元ガス拡散パルスシミュレーションによる土壌拡散係数の逆推定手法を考案した。

内部からのCO₂の発生がない状態におけるガス拡散の3次元偏微分方程式の解析解を、濃度Cを時間の変数tについて偏微分し、 $\delta C / \delta t = 0$ として式を解くと、時間t、気相率a、ガス拡散係数Dの関係式が導ける。この式は、ある一定距離でガスパルスの濃度を測定し、その極大時間と気相率を測定することで、ガス拡散係数が測定可能であることを意味する。

$$C = \frac{(C_0 - C_s)}{8(\pi D_s t / \varepsilon)^{3/2}} e^{-r^2 / (4 D_s t / \varepsilon)} + C_s$$

式 1: 数学的解析解

$$D_s = \frac{r^2}{6 t_{pt} / \varepsilon}$$

式 2: 解析解から得られたガス拡散係数とピーク時間の関係

これはCO₂ガスが発生しない理想状態での理論値であるので、構築した3次元土壌CO₂ガス発生・移動シミュレーションモデルを用いて、CO₂ガス発生がある場合にこの理論式が成り立つのかを検証した。ガス発生強度が0.2, 0.4 mgCO₂m⁻³s⁻¹の二つを仮定し、ガス発生から1000, 3000, 10000秒後にパルスを発生させて測定をした場合に、理論値からどの程度極大時間がずれるかを調べた。結果、パルス発生源から5cmの距離で時間のずれは1秒以下であり、ガスパルス法での土壌ガス拡散係数測定手法はCO₂ガスの発生がある土壌においても適用可能であることが明らかとなった。このガス拡散係数逆推定法は、土壌サンプルを破壊的に採取することなく、野外において適用可能であり、波及効果は大きいと考えられる。

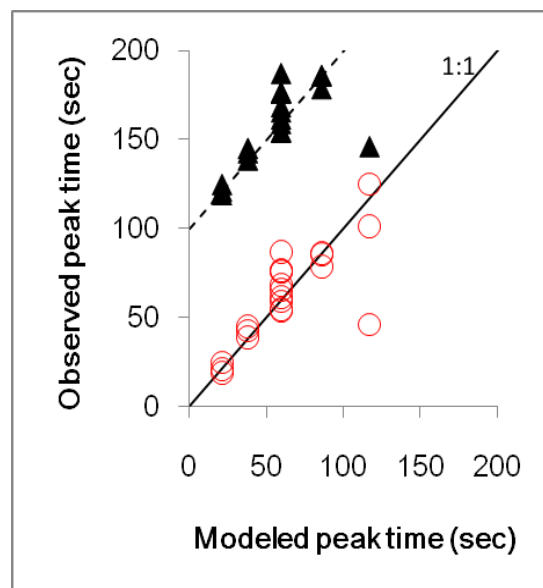


図 4: モデルで予測された極大時間と観測された極大時間。▲は補正前、○は時間遅れが約100秒と仮定し、補正したもの。

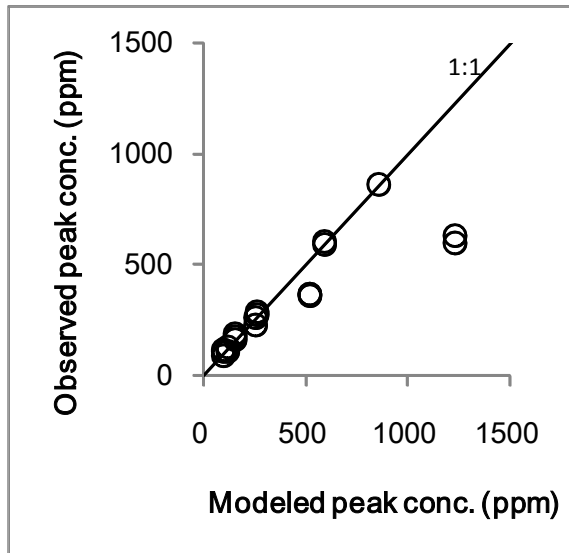


図 5: モデルで予測された濃度の極大値と観測された極大値

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

Shoji Hashimoto, Martin Wattenbach and Pete Smith, Litter carbon inputs to the mineral soil of Japanese Brown forest soils: comparing estimates from the RothC model with estimates from MODIS. Journal of Forest Research, Volume 16, Number 1, 16-25, DOI: 10.1007/s10310-010-0209-6, 査読有

〔学会発表〕(計1件)

橋本昌司、小野賢二、酒井佳美、石塚成宏、測定可能なプールで構築した土壤炭素動態モデル-日本で観測されたリター分解データを用いたパラメータ決定-、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、2010 年 5 月 26 日、幕張メッセ国際会議場 (千葉市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 昌司 (HASHIMOTO SHOJI)

独立行政法人森林総合研究所・立地環境研究領域・主任研究員

研究者番号：90414490