

札幌市郊外落葉広葉樹林における土壤中 CO₂動態—CO₂濃度分布から推定したフラックスの季節変化—森林総合研究所北海道支所 阪田 匡司・宇都木 玄・相澤 州平
森林総合研究所 石塚 成宏

はじめに

森林は大気中の CO₂ の約 2 倍、陸域生態系の約半分も
の多量の炭素を貯留していると考えられ、その多くは土
壤炭素や木質バイオマスといった形で存在している(2)。
特に土壌からの CO₂ 放出(土壌呼吸)は森林生態系の炭
素動態の中でも非常に大きく、大気 CO₂ 動態への影響が
大きいことから、土壌呼吸の環境変動に対する応答につ
いてはそれらの将来予測も含めて重要な課題として研究
がなされている。

土壌呼吸は一般に土壌温度(地温)に強く制限されて
おり、筆者らが長期モニタリングサイトとして観測を続
けている札幌市羊ヶ丘にある落葉広葉樹林においても土
壌呼吸は地温に対して強い依存性を示すことが明らかにな
っている(4)。土壌呼吸は土壌中で発生した CO₂ の移動
現象であり、生物学的な CO₂ 発生と物理的な CO₂ 移動に分
けることが出来るが、土壌中の詳細な CO₂ 発生メカニ
ズムは不明な点が多い。地温や水分変動など将来的な環境
変動に対応した土壌呼吸の変動を予測するためにはそれ
ら土壌中で CO₂ 発生・移動メカニズムを明らかにする
必要がある。そこで、本報告では土壌中の CO₂ 動態、特
に深さ方向の CO₂ 動態の実態解明のため、土壌中の CO₂
濃度分布特性やそれらの季節変動を明らかにし、土壌炭
素動態に与える影響について検討した。

調査方法

札幌市南東郊外にある森林総合研究所北海道支所羊ヶ
丘実験林内で調査をおこなった。本試験地はシラカンバ、
ミズナラ、ハリギリを中心に、シナノキやイタヤカエデ、
林床にはクマイザサ、チシマザサを交えた落葉広葉樹天
然性二次林(約 90 年生)である。植生については宇都木
らの報告が詳しい(6)。標高は約 180m で土壌型は火山放
出物を母材とする適潤性黒色土および適潤性褐色森林土
である。

土壌中 CO₂ 濃度は深さ 5,10,20,40cm に横穴を空けたス
テンレスチューブを埋設し、各深度の土壌ガスをシリン
ジにより 20mL 採取し、室内において赤外線 CO₂ 分析器
(富士電機, ZFP5) によって分析した。ガス採取は各深
度 4 反復ずつおこない、無積雪期は月に数回、積雪期は
厳冬期に数回おこなった。得られた CO₂ 濃度分布はシグ
モイド式を用いて帰帰し、各深度濃度勾配を推定した(式
-1; C(z): 深さ z の CO₂ 濃度 (mgCO₂m⁻³), z: 深さ (m),
C₀, z₀, a, b: パラメータ)。

$$C(z) = C_0 + \frac{a}{1 + e^{-(z-z_0)/b}} \quad \dots \text{式-1}$$

各深度のガス拡散係数は深さ 5,20,40cm に埋設した
TDR 方式土壌水分センサーにより体積含水率を計測し、
各深度の全孔隙率からそのときの気相率を計算し、得ら
れた気相率を、用いてガス拡散係数を次式により推定し
た(3) (式-2, 式-3; D/D₀: 相対ガス拡散係数
(D₀: 1.35×10⁻⁵m²s⁻¹), ε: 気相率(m³m⁻³), D(z): 深さ z の時
のガス拡散係数(m²s⁻¹), T(z): 深さ z の地温(°C))。

$$D/D_0 = 0.872 \times \varepsilon^{2.104} \quad \dots \text{式-2}$$

$$D(z) = D/D_0 \times 1.35 \times 10^{-5} \times \left((T(z) + 273.15) / 273.15 \right)^{1.75} \quad \dots \text{式-3}$$

各深度の CO₂ フラックスについては土壌中の CO₂ 移動
は拡散によるものと仮定し、各深度の CO₂ 濃度勾配とガ
ス拡散係数から Fick の第 1 拡散則により推定した(式-4;
F(z): 深さ z の CO₂ フラックス(mgCO₂m⁻²s⁻¹)。

$$F(z) = C(z)' \cdot D(z) \quad \dots \text{式-4}$$

各深度間の CO₂ 発生速度は各深度の CO₂ フラックスの
収支から推定した。なお、表層 0~10cm の CO₂ 発生速度
については土壌呼吸(林床面 CO₂ フラックス)と深さ
10cm のフラックスの差とした。

土壌呼吸速度は自動開閉式チャンバシステム(ダイレ
ック, DY-SR01-S)により地表面 CO₂ フラックスを測定
した。チャンバは 4 地点に設定し 1 時間毎、無積雪期
のみ測定した。積雪期については CO₂ センサ(バイサラ,
GMM-343)をつけたチャンバを雪面にかぶせ、手動によ
る静置密閉法により雪面からの CO₂ フラックスを測定し
た。

指数関数による非線形帰帰モデルは SigmaPlot (Systat
Software Inc., Version 11) を、重回帰分析およびその他の
統計量の計算には JMP (SAS Institute Inc., Version 6) を
用いた。

結果

土壌中 CO₂ 濃度は深くなるほど高くなっていたが、深
さ 20cm と 40cm の濃度差は小さく、逆に深さ 40cm の CO₂
濃度の方が若干低いときもあり、深さ 20~40cm 程度で
頭打ちとなる深度分布であった(図-1)。CO₂ 濃度の季
節変動は主に地温と連動して推移したが、土壌水分にも

Tadashi SAKATA, Hajime UTSUGI, Shuhei AIZAWA (Hokkaido Research Center, Forestry and Forest Products Institute, Sapporo 062-8516), Shigehiro ISHIZUKA (Forest Products Institute, Tsukuba 305-8687)

Soil CO₂ dynamics in deciduous forest of northern Japan - Seasonal fluctuation of CO₂ efflux was estimated from the concentration distribution -

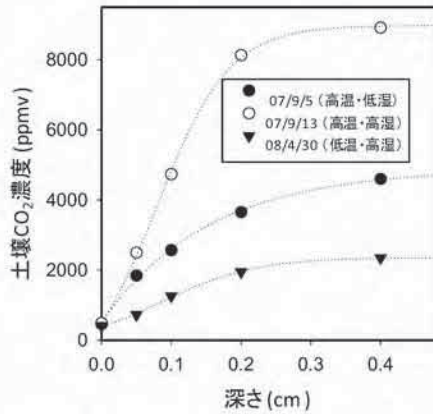


図-1 土壤中 CO₂濃度の深度分布

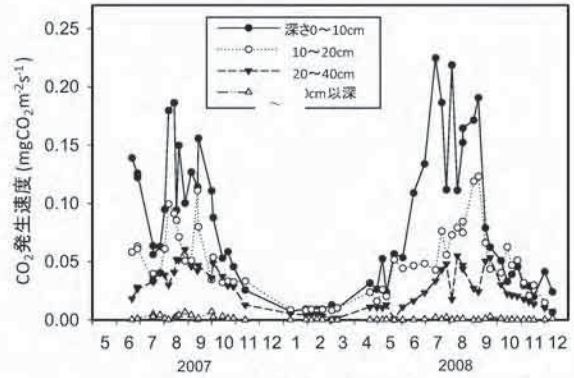


図-3 各深度の CO₂発生速度の季節変動

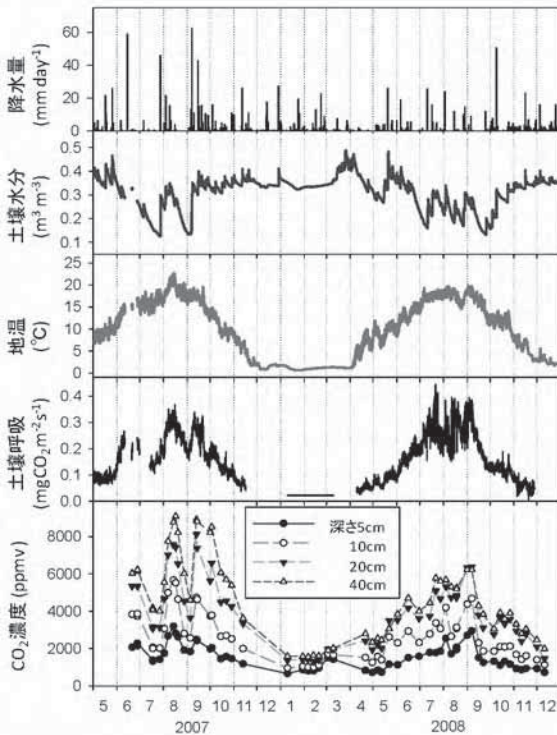


図-2 土壤中 CO₂濃度および土壤呼吸・土壤温度水分の季節変動

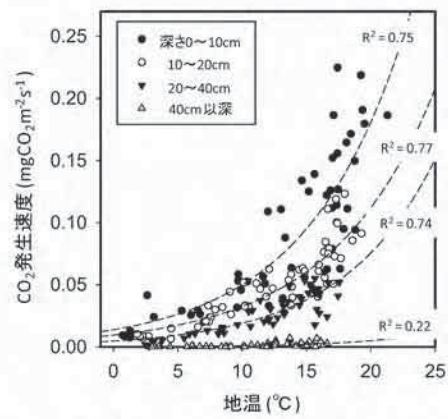


図-4 各深度の CO₂濃度発生速度と温度の関係

0~10cm: $y = 0.014 \exp(0.129x)$
 10~20cm: $y = 0.009 \exp(0.124x)$
 20~40cm: $y = 0.005 \exp(0.138x)$
 40cm~: $y = 0.0002 \exp(0.173x)$

表-1 各深度の年間 CO₂発生量

深さ	2007	2008	平均 (%)	土壤炭素含量
	(MgC ha ⁻¹ y ⁻¹)			(MgC ha ⁻¹)
0~10cm	5.3	4.6	4.9 (46)	45.2
10~20cm	3.1	2.8	3.0 (28)	35.2
20~40cm	2.1	1.9	1.9 (18)	52.3
40cm以深	0.8	0.7	0.8 (7)	47.3

影響されていた。地温は比較的高いが、土壤水分が著しく低下した時には全深度において CO₂濃度が低下していた(図-2)。また、冬季の深さ 5cm の CO₂濃度が少し上昇していたが、この現象は地表面上の積雪による CO₂移動阻害が原因と思われる。

各深度の CO₂フラックスは表層ほど大きく、深さ 40cm でのフラックスは非常に小さかった。各深度の CO₂フラックスの収支から推定された各深度の CO₂発生速度についてはほとんどの時期で深さ 0~10cm が最も大きく、主に地温と連動して推移していた(図-3)。また、すべての深度において CO₂発生速度とそれぞれの深度の地温は指数回帰式で有意に示され(図-4)、各深度においての CO₂発生速度は地温によって制限されていることが明ら

かになった。また、地温と水分を目的変数とした重回帰分析を行ったところ、深さ 0~10cm および 10~20cm の CO₂発生速度に関しては双方が有意に選択され、土壤水分についても正の効果があることが示された一方、深さ 20~40cm および 40cm より深い深度に関しては地温のみ選択され、水分の影響は小さいことが示された。

各深度の CO₂発生速度の指数回帰式を用いて、各深度の年間 CO₂放出量を推定した結果、表層ほど高く深さ 0~10cm で発生した CO₂は全体の 46%にもなり、40cm より深い深度からの CO₂発生量は 10%にも満たなかった(表-1)。

考察

すべての深度において CO₂ 発生速度が地温の指数関数によって有意に回帰され、また、表層・次表層において土壤水分が CO₂ 発生速度に有意な正の効果を示したことは興味深い。土壤水分が野外で観察される土壤呼吸に及ぼす影響は過湿条件での酸素供給不足による負の効果と乾燥から適潤条件での生物呼吸の水分要求による正の効果が挙げられる(7)。地表面に近い上部の層位では微生物ないしは根の水分ストレスがかかっており、下層ではストレスの影響が認められなかったことから、本試験地において土壤有機物の分解特性(温度や水分に対する応答)は深度によって異なることが示唆される。

一般に表層ほど根や微生物が多く存在し、リターや土壤有機物も多量に含むため、CO₂ 発生速度は表層で大きく、下層ほど低下することが予想され、本報告においてもそれに従う結果であった。本試験地は埋没腐植層も見られる黒色土の影響のためか、比較的深くまで土壤炭素が多量に含まれている(表-1)。しかし、微生物バイオマスや細根の深度分布は表層に集中しており(5)、CO₂ 発生速度はそれら生物量の深度分布に従う傾向が見られ、CO₂ 発生速度は基質の量より生物の量の方がより影響が大きいことが示された。また、表層ほど炭素ターンオーバーが大きいことを意味し、仮に微生物呼吸と根呼吸の割合を 1:1 とする(1)と、土壤炭素ターンオーバーは表層 0~10cm では 18y⁻¹、40cm より深い深度では 118y⁻¹ と約 6 倍も異なっていた。ターンオーバーの違いは生物量

の違い以外にも分解されやすい有機物が表層により多いためと考えられるが、それらの詳細な検討は今後の課題である。また、40cm より深い深度の CO₂ 発生量が土壤呼吸の 10%にも満たなかったことから、本試験地においての土壤呼吸の環境変動に対する応答研究において特に 0~40cm での土壤 CO₂ 発生メカニズムを明らかにしていく必要がある。

引用文献

- (1) Hanson PJ. et al. (2000) Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry* 48: 115-146
- (2) IPCC (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press.
- (3) 石塚成宏ほか (2006) 日本の森林土壤に適合するガス拡散係数推定式について. *森林立地* 48: 9-15
- (4) 阪田匡司ほか (2008) 札幌市郊外落葉広葉樹林における土壤からの CO₂ 放出量の推定. *日林北支論* 56: 91-93
- (5) 阪田匡司ほか (2008) 北方落葉広葉樹林の土壤炭素動態. *土肥学会講演要旨集* 54: 10
- (6) 宇都木玄ほか (2007) 札幌市郊外の落葉広葉樹林における上層林冠木の 25 年間の動態. *日林北支論* 55: 35-37
- (7) Xu L. et al. (2004) How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature. *Global Biogeochemical Cycles* 18: GB4002, doi:10.1029/2004GB00228