

森林土壌および土壌空気の CO₂ 炭素同位体分析（スロベニア、北海道）

Carbon isotope analyses of CO₂ in forest soil and soil air (Slovenia, Hokkaido)

藤吉 亮子

Ryoko FUJIYOSHI

北海道大学

（概要）

土壌空気は、気象条件や土壌中の根の呼吸、(微)生物活動等に依存してその組成を変化させながらダイナミックに動く。自然環境が比較的多く残されている大学構内の樹林中で、土壌空気成分(CO₂, ²²²Rn)の連続観測を行った。物理化学的特性の異なる2種類の気体を同時に測定することで土壌表層の空気の動きを追跡することが可能になる。また、アルカリ吸収-炭酸塩法を用いて土壌空気を定期的に採取し、CO₂の炭素同位体分析($\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{14}\text{C}$)を行った。その結果、季節ごとに採取した土壌空気 CO₂のほとんどすべては大気およびローカルな植物由来の炭素からなることが明らかになった。しかし、その一方で、冬季から初春にかけて他とは異なるきわめて古い CO₂の存在が確認された。同様な結果は、本観測ポイントにおいて以前にも得られており、扇状地堆積物という地質の特異性を反映した事象である可能性も否定できない。本研究では、土壌空気の動きおよびそのダイナミクスにおよぼす気象および土壌パラメータの影響を明らかにした。

キーワード：土壌空気、CO₂、炭素同位体、²²²Rn、ダイナミクス

1. 目的

森林域における二酸化炭素の収支および発生源を明らかにする研究の一環として、地質・地形および気象条件の異なる地域(北海道、スロベニア)において森林土壌および土壌空気中のCO₂炭素同位体比($\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{14}\text{C}$)を検討し、ローカルな知見から一般的な傾向を導き出すことを本研究の目的としてきた。2017年度は、北海道(北海道大学構内)の観測ポイントにおいて異なる深度(0.3, 1.0 m)で採取した土壌空気CO₂の炭素同位体分析結果の解析を行い、森林域における土壌CO₂のダイナミクスを明らかにすることを目的とした。また、土壌空気の超微量成分であるラドン(²²²Rn)のデータも合わせて考察した。

2. 方法

北海道大学構内の冷温帯広葉樹林内に異なる深度の試坑を掘削して、CO₂(TESTO 435, TESTO, ドイツ), ²²²Rn(VDG, Algade, フランス)および水分プローブ(SM300, DELTA T DEVICES, イギリス)をそれぞれ埋設し、1時間ごと(CO₂は10分ごと)の測定値をデータロガーに蓄積した。また、定量ポンプを用いて定期的に土壌空気を吸引し、アルカリ吸収-炭酸塩法によりCO₂をCaCO₃として回収した。試料は貴研究機構むつAMSに送付し、精製・グラファイト化等の前処理を行った後AMS分析に供した。主な気象パラメータ(気温、降水量、大気圧および冬季積雪深)は札幌管区気象台のデータを取得した。

3. 結果及び考察

北海道大学構内の観測ポイントにおいて得られた土壤空気中の CO₂ 濃度（深度 1 m）は、春季（4 月初旬）から初夏（6 月下旬）にかけて気温（地温）の上昇とともにほぼ直線的に増加（1.1~1.7 ppm day⁻¹）することを確認した。土壤 CO₂ 濃度の上昇開始時期および変動のパターンは気象条件等に依存して年ごとに異なったが、濃度の上昇率は過去数年間ほぼ同様の値を示した。また、チャンバー法により測定した林床面からの CO₂ 放出速度は夏季（8 月）において約 2 ppm min⁻¹ であった（図 1）。一方、秋季における CO₂ 濃度の下降はおおむね 11 月中旬から始まるものの、下降速度やそのパターンは年により大きく異なることが明らかになった。冬季積雪期（1 月から 3 月）において、土壤深度 1 m 地点における CO₂ 濃度は大きく変動（2000~10000 ppm）した（Nakamura et al., 2016）。時系列データのフーリエ変換により、このような変動は、地温の日変動とほぼ一致し、地表面下 1 m の積雪条件下においても土壤空気中の CO₂ 濃度は気象パラメータに依存して変動することがわかった。

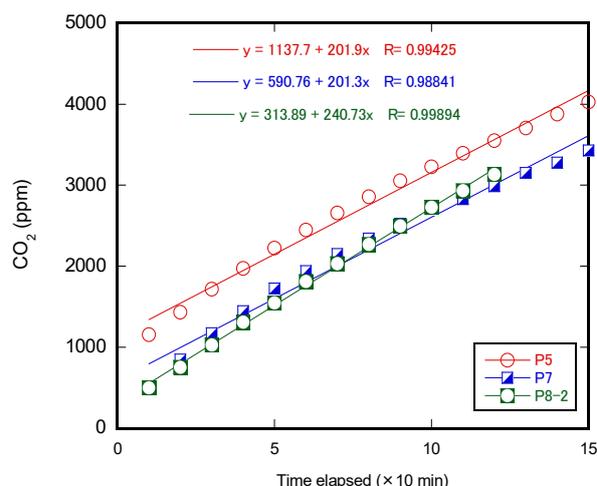


図 1 林床面からの土壤 CO₂ 放出速度（8 月）

一方土壤空気中の ²²²Rn 濃度は、土壤 CO₂ と同様春季から夏季の高気圧条件下において気温（地温）の変化に追従して日変化を伴いながら増加した。降雨事象は ²²²Rn のこのような変動パターンを変化（変質）させた。これは、²²²Rn の水への溶解性に起因することが以前の研究結果から示唆されている（Fujiyoshi et al., 2016）。すなわち、降雨に伴って土壤中の空隙が徐々に水で満たされるため、土壤空気中の ²²²Rn 放射能濃度は降雨初期において見かけ上増加し（キャッピング効果）、その後、空隙が完全に水で飽和した後に濃度は極小値に達した。降雨後には土壤水分の蒸発に伴って ²²²Rn 放射能濃度は再び増加して以前のレベルまで回復した。一方、秋季から冬季における土壤 ²²²Rn 放射能濃度は気温の低下とともに徐々に減少し、その減少速度および変動性は土壤深度に大きく影響された（図 2）。その後の ²²²Rn 濃度は低いレベルで推移すること、数十 cm の積雪深においても ²²²Rn は土壤内部および積雪層中を拡散移動することが明らかになった（Fujiyoshi et al., 2013）。

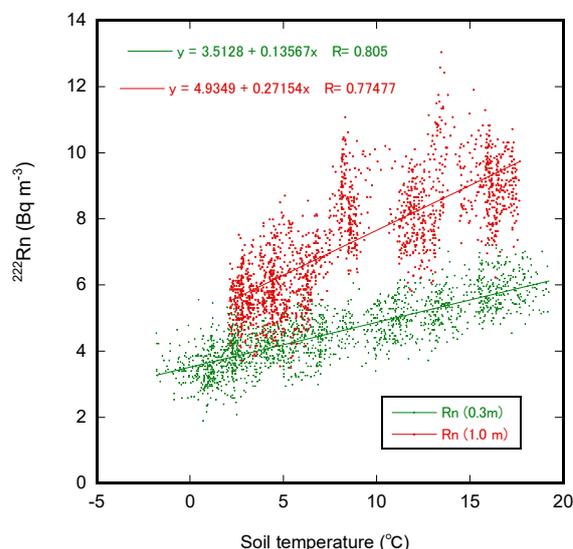


図 2 土壤 ²²²Rn 濃度と地温の関係（深度 0.3, 1.0 m）

中の ²²²Rn 放射能濃度は降雨初期において見かけ上増加し（キャッピング効果）、その後、空隙が完全に水で飽和した後に濃度は極小値に達した。降雨後には土壤水分の蒸発に伴って ²²²Rn 放射能濃度は再び増加して以前のレベルまで回復した。一方、秋季から冬季における土壤 ²²²Rn 放射能濃度は気温の低下とともに徐々に減少し、その減少速度および変動性は土壤深度に大きく影響された（図 2）。その後の ²²²Rn 濃度は低いレベルで推移すること、数十 cm の積雪深においても ²²²Rn は土壤内部および積雪層中を拡散移動することが明らかになった（Fujiyoshi et al., 2013）。

土壌空気 CO₂ の発生源に関する知見は、定期的に採取した CO₂ の炭素同位体分析の結果を用いて推定することができる。すなわち土壌空気に含まれる CO₂ 炭素同位体 (¹²C, ¹³C, ¹⁴C) の同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{14}\text{C}$) をプロットすると、図 3 から明らかなように、検討した期間において土壌 CO₂ は大気および林床の植物に由来していることがわかった。しかしその一方で、2016 年 3 月 4 日に採取した CO₂ の炭素同位体組成は、他の場合に比較して著しく低い ¹⁴C 同位体比 ($\Delta^{14}\text{C}$) を示し、一時的に古い炭素が土壌空気中に含まれることが明らかになった。同様の結果は本観測サイトで以前 (2007 年 2 月) にも観測されている (Fujiyoshi et al., 2009)。また、図 4 に 2016 年から 2017 年に得られた土壌 CO₂ の ¹⁴C ($\Delta^{14}\text{C}$) および気温の月別変化をプロットした。2016 年 2 月から 6 月にかけて $\Delta^{14}\text{C}$ 値は徐々に増加する傾向はこれまでに得られた結果と一致した。すなわち、気温の上昇とともに土壌 (微) 生物の活動が活発化するため、前年秋に堆積したリターなどの比較的フレッシュな有機物の分解が進むことに起因することがあらためて確認された。本観測サイトはもともと扇状地堆積物からなる湿潤土壌で、笹やトクサなど冬季積雪期においても枯死しない植物が多く繁茂し続け、それに伴う微生物活動が冬季も継続していることが考えられる。2017 年 3 月に採取した土壌空気は、独立に掘削したいずれの深度 (0.3, 1.0 m) においても極めて低い $\Delta^{14}\text{C}$ 値 (~-600 ‰) および高い $\delta^{13}\text{C}$ 値 (~-19 ‰)

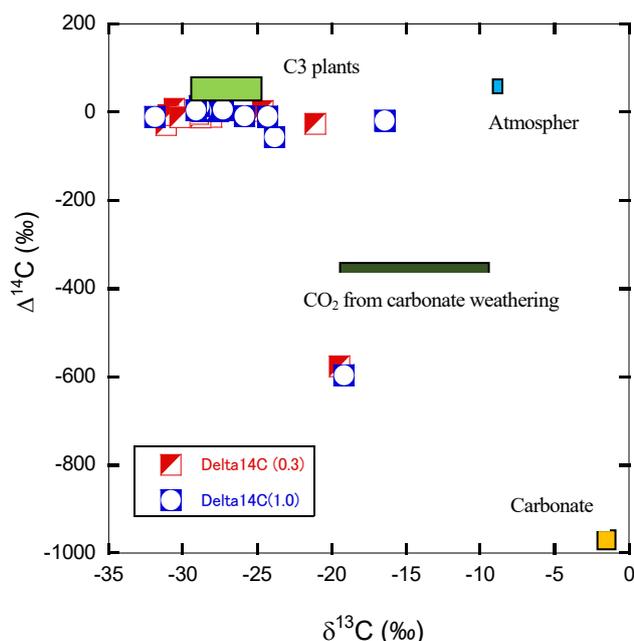


図 3 土壌空気 CO₂ の炭素同位体 ($\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{14}\text{C}$) 分布

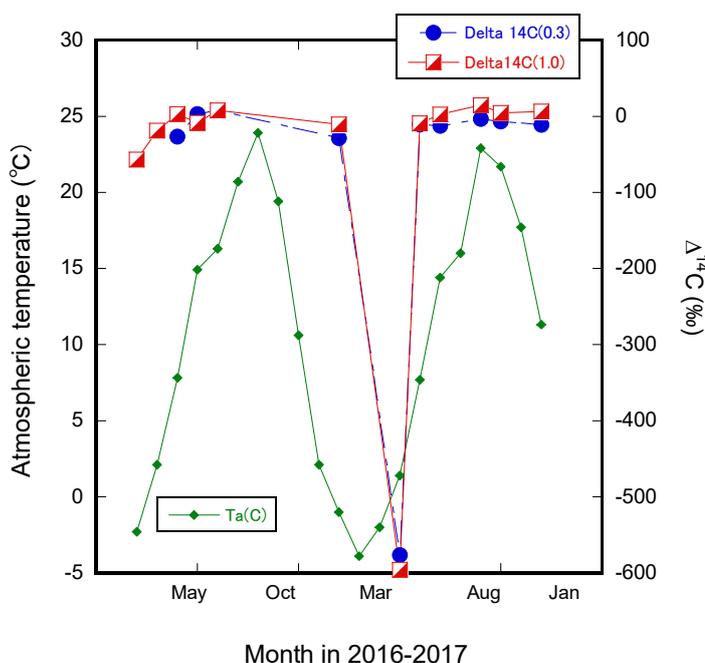


図 4 土壌空気 CO₂ の $\Delta^{14}\text{C}$ と気温の月変化 (2016 年 2 月~2017 年 10 月)

で、現地土壌有機物に由来するものではないことが明らかである。このような結果は、冬季から初春にかけて扇状地堆積物に特有な現象である可能性も否定できない。今後のデータ蓄積を通してその原因を解明することが望まれる。

本研究では、森林域における土壌空気の動きおよび CO₂ の発生源を明らかにするために、CO₂ 濃度、その炭素同位体 (¹²C, ¹³C, ¹⁴C) および ²²²Rn を自然のトレーサーとして使い、長期にわたるモニタリングを実施した (Fujiyoshi et al., 2012, Krajnc et al., 2016)。このような多角的な取り組みを通してデータを蓄積することにより、地球表層のカーボンサイクルにおける森林域土壌 CO₂ の役割や放射線防護の立場からみた土壌

^{222}Rn の評価に貢献できるものとする。

4. 引用(参照)文献等

1. Fujiyoshi R, Haraki Y, Sumiyoshi T, Amano H, Kobal I, Vaupotič J (2009) Tracing the sources of gaseous components (^{222}Rn , CO_2 and its carbon isotopes) in soil air under a cool-temperate deciduous stand in Sapporo, Japan. *Environ Geochem Health*, 32(1), 73-82.
2. Fujiyoshi R, Amano H, Sakuta Y, Okamoto K, Sumiyoshi T, Kobal I, Vaupotič J (2012) Practical evaluation of carbon sources of forest soils in Slovenia from stable and radio-carbon measurements. *Environ Earth Sci*, 67(1), 133-140.
3. Fujiyoshi R, Okabayashi M, Sakuta Y, Okamoto K, Sumiyoshi T, Kobal I, Vaupotič J (2013) Soil radon in winter months under snowpack in Hokkaido, Japan. *Environ Earth Sci*, 70, 1159-1167.
4. Ohno M, Okamoto K, Umegaki K, Fujiyoshi R (2016) Results of simultaneous monitoring of soil ^{222}Rn and moisture at different depths in a forest site in Fukushima Prefecture, Japan. *J. Radioanal Nucl Chem*, 310, 1013-1020.
5. Krajnc B, Fujiyoshi R, Vaupotič J, Amano H, Sakuta Y, Gregorič A, Ogrinc N (2016) Using ^{222}Rn and carbon isotopes (^{12}C , ^{13}C and ^{14}C) to determine CO_2 sources in forest soils developed on contrasting geology in Slovenia. *Environ Earth Sci* 75, 1068-1-1068-10.
6. Nakamura T, Fujiyoshi R, and others (2016) Soil CO_2 monitoring in winter under a cool-temperate forest site in Hokkaido, Japan, International Conference on Radioecological Concentration Processes, Nov. 6-9, 2016, Seville, Spain.