

森林土壌および土壌空気中の CO₂ 炭素同位体分析 (スロベニア、北海道)

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

藤吉 亮子¹⁾ 天野 光²⁾

Ryoko FUJIYOSHI Hikaru AMANO

¹⁾北海道大学、²⁾日本分析センター (2016年3月退職)

森林域における二酸化炭素 (CO₂) 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・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 濃度およびその炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{14}\text{C}$) を検討し、ローカルな知見から一般的な特性を引き出すことを目的とした。北海道大学構内冷温帯樹林における地表面下 1 m での土壌空気 CO₂ の連続モニタリングを通して冬季積雪期における CO₂ 濃度の変動の様子が明らかになった。また、2016年2月から6月 (初春から初夏) における CO₂ 炭素同位体の変化は、気温 (地温) の上昇にともなう (微) 生物活動の活性化を裏付ける結果となり、これまで得られている夏季から秋季の炭素同位体の季節変化と矛盾しないことが確認された。一方、スロベニアにおいてはカルスト地形の洞窟内および周辺森林土壌空気中の CO₂ 濃度およびその炭素同位体分析を行った。その結果、炭酸塩岩石で囲まれた洞窟内空気中の CO₂ は周囲の森林土壌と同様、有機物の分解に伴う比較的若い CO₂ に大気混入した状態であることが炭素同位体分析の結果から初めて確認された。また、炭酸塩岩石の溶解に伴う CO₂ の寄与 (約 9%) も無視できないことが示唆された。

キーワード: 森林土壌 CO₂, 炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{14}\text{C}$), 北海道、スロベニア

1. 目的 人為的介入の比較的少ない森林域 (北海道、スロベニア) において土壌空気に含まれる CO₂ 濃度の変動およびその発生源を明らかにすることを目的とした。地質・地形・気象条件の異なる地域の森林土壌および土壌空気中の CO₂ 濃度およびその炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{14}\text{C}$) を検討することによりローカルな知見から一般的な特性を引き出すことを試み、ひいては森林生態系の CO₂ ダイナミクス解明をめざしている。

2. 方法 北海道大学構内およびスロベニア森林域の観測ポイントにおいて、林床に掘削した試坑 (0.3, 0.6, 1.0 m) から定量ポンプを用いて土壌空気を吸引し、アルカリ吸収-炭酸塩法により CO₂ 成分を CaCO₃ として定期的に採取。得られた CaCO₃ は貴研究機構むつ AMS に送付し、前処理を経た後グラファイト試料として AMS 分析に供した。土壌空気中の CO₂ 濃度は、赤外線センサ内蔵のプロープ (Testo 435, TESTO, ドイツ) を用いて測定した。北海道の観測ポイントでは、2016年2月から2深度 (0.3 および 1.0 m) で CO₂ 濃度、地温および地圧を 10 分間隔で連続的に測定した。主な気象パラメータ (気温、降水量および大気圧) は札幌管区気象台のデータを取得した。

3. 結果及び考察

3.1 北海道 北海道大学構内に設置された観測ポイント (深度 1 m) において冬季 (2016年1~3月) に得られた土壌空気中の CO₂ 濃度と地温の時系列データを図 1 に示す。1月から3月の積雪期間における積雪深は 27~83 cm の間で推移し、

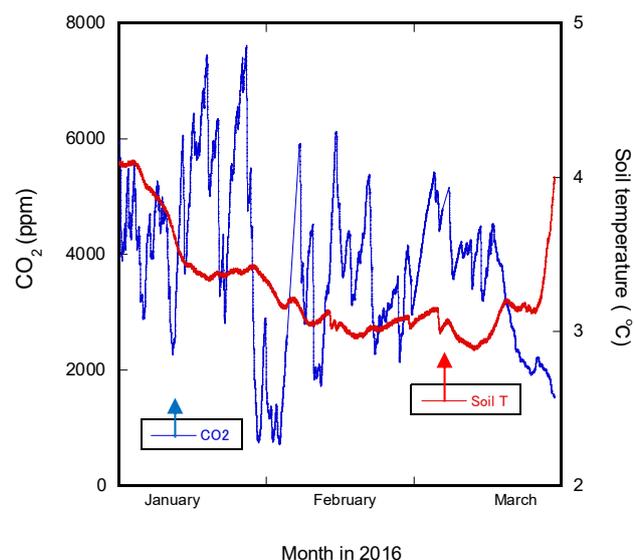


図 1 土壌空気中 (深度 1 m) における CO₂ 濃度と地温の時系列プロット (2016年1月~3月)

地表面下1 m における地温は3~4 °Cでほぼ一定の値を示した。土壤空気の CO₂ 濃度は1000~7500 ppm の範囲で大きく変動し、地中の水の動きに影響されることが示唆された。また、3月下旬の本格的な融雪開始に伴って濃度の急激な減少が確認された。融雪水へのCO₂の溶解に起因するものと考えられる (Nakamura et al., 2016)。

図2に冬季から初夏(2016年2~6月)にかけて月ごとに採取したCO₂炭素同位体比($\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{14}\text{C}$)の変化を示した。得られた $\delta^{13}\text{C}$ 値(深度1 m)は5月に高い値(-16.4‰)を示したもののその後大きな変化は見られなかった。一方、 $\Delta^{14}\text{C}$ 値は2月から徐々に増加してほぼ一定値(-56.8から7.60‰)を示した。この期間においては、気温(地温)の上昇に伴って土壤(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が $\Delta^{14}\text{C}$ 上昇の要因と考えられる。夏季から秋季にかけて土壤空気CO₂の $\delta^{13}\text{C}$ はほぼ一定の値を示すのに対し、 $\Delta^{14}\text{C}$ は徐々に減少することがこれまでの検討で確認されている (Fujiyoshi et al. 2009)。図2で得られた結果と合わせて、土壤CO₂への生物活動の関与を矛盾なく説明出来ることが明らかになった。今後、年間を通したより詳細な検討が必要だと考えられる。

図3に異なる深度(0.3, 1.0 m)で2016年4月から6月に捕集した土壤空気CO₂の炭素同位体分析の結果を示した。初春から初夏にかけて $\delta^{13}\text{C}$ と土壤深度との間に明瞭な関連性は見出されなかった。一方、深度1 mにおける $\Delta^{14}\text{C}$ は、0.3 mの場合に比較して一貫して正の値で減少、深度0.3 mでの $\Delta^{14}\text{C}$ は4月から5月にかけて大きく増加(-26.9から-8.9‰)した。これらの結果から、土壤空気CO₂の炭素同位体組成は、春季から夏季にかけて土壤中の微生物活動を反映し、表層およびより深部に存在するバイオマスや分解対象となる植物種の種類・量および特性に大きく影響されることがあらためて示唆された。

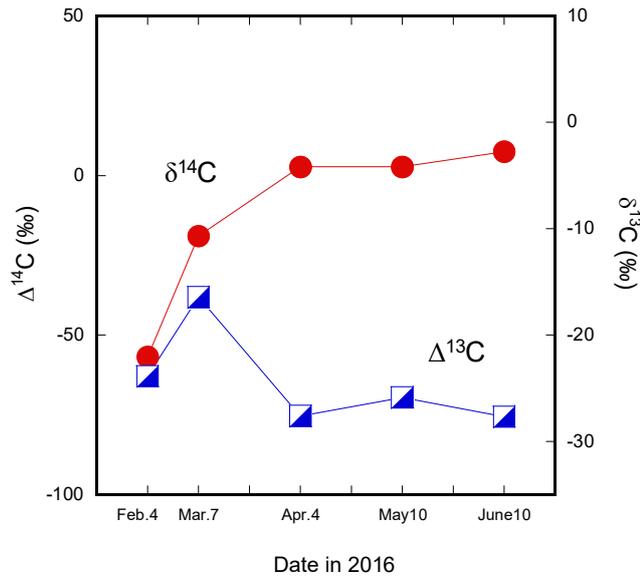


図2 土壤空气中(深度1.0 m)のCO₂炭素同位体($\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{14}\text{C}$)分析結果(2016年2月~6月)

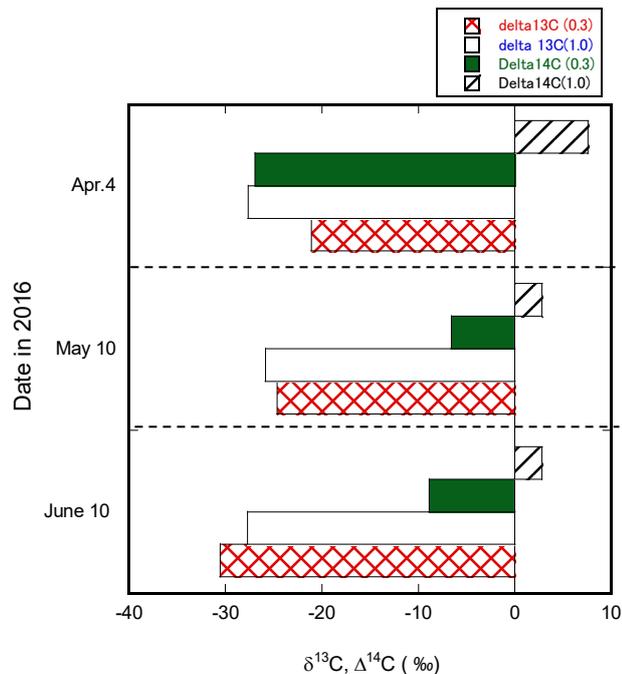


図3 異なる深度(0.3, 1.0 m)における土壤空気CO₂の炭素同位体($\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{14}\text{C}$)分析結果(2016年4月~6月)

3.1 スロベニア スロベニアの観測サイトは、Postojna 洞窟の周辺森林域(45°47'N, 14°12'E)で海拔575m地点に設置した(Krajnc et al. 2016)。年平均気温および降水量はそれぞれ9.3 °C および1500 mmである。深度0.8 mにおける土壤空気および洞窟内の空気を2015年冬季および夏季に採取し、CO₂濃度およびその炭素同位体分析を行った。表1から明らかのように、冬季における土壤空気CO₂は積雪の有無により異なる値を示し、積雪のない場合(1516~1673 ppm)に比較して積雪のある場合にはより高い値(2213~2362 ppm)を示した。一方、洞窟内の空気に含まれるCO₂濃度(積雪なし; 1521 ppm、積雪有り; 1658 ppm)は積雪の有無にほとんど影響されないことがわかった。

表 1 土壌および洞窟内空気の CO₂ 濃度および炭素同位体組成

空気試料	日時	積雪	CO ₂ (ppm)	Δ ¹³ C (‰)	Δ ¹⁴ C (‰)
土壌	Feb. 3 2015	有	2362	-20.5	-20.4
土壌	Feb. 3 2015	有	2213	-20.6	-20.3
洞窟	Jan. 28 2015	有	1521	-16.8	-25.5
土壌	Feb. 18 2015	無	1516	-19.0	-18.0
土壌	Feb. 18 2015	無	1673	-19.7	-21.9
洞窟	Feb. 18 2015	無	1658	-19.2	-12.7
土壌	Aug. 26 2015	-	8275	-21.8	-32.2

森林土壌空気 (0.8 m) および洞窟内空気の発生源を推定するため、得られた CO₂ 炭素同位体分析の結果を図 4 にプロットした (Fujiyoshi et al. 2012)。図には、現世 C3 植物 (δ¹³C; -25.2, Δ¹⁴C; 85.1) および大気 (δ¹³C; -9, Δ¹⁴C; 49.5) の文献データ (Levin et al. 2010, Liu et al. 2006) を合わせて記載した。図から明らかのように、いずれの場合も C3 植物および大気由来の混合ライン (点線) の中に収まっており、両者の混合であることが示唆された。具体的には、夏季において CO₂ の 54~86% がフレッシュな土壌有機物由来であり、残りの大部分が大気、そして約 9% が炭酸塩由来であると推定された。検討した洞窟は鍾乳洞であり、洞窟内に多くの亀裂や破砕面が存在することから、大気や表層土壌空気の混入しやすい環境であることがわかる。得られた結果から、カルスト地形における土壌空気が比較的フレッシュな植物由来の CO₂ からなることが理解できた。その一方で、非生物由来の CO₂ の影響も無視できないことが本検討の結果から明らかになった。

スロベニアにおける検討は、Jozef Stefan 研究所の共同研究者 (Prof. Nives Ogrinc) およびポスドク学生 (Mr. Bor Krajnc) によった。

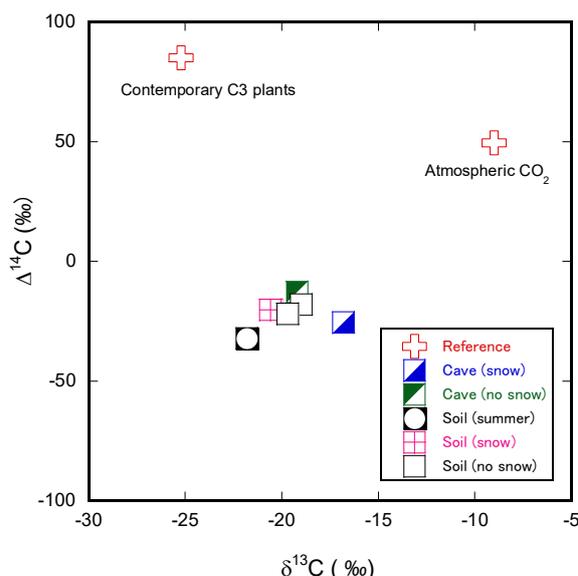


図 4 土壌および洞窟内空気の CO₂ 炭素同位体比(δ¹³C, Δ¹⁴C) の分布—季節・積雪の影響 (図中の⊕は文献データ)

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 (²²²Rn, CO₂ 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 isotope measurements. *Environ. Earth Sci.*, 67(1), 133-140.
3. Krajnc B., Fujiyoshi R., Vaupotič J., Amano H., Sakuta Y., Gregorič A., Ogrinc N. (2016) Using ²²²Rn and carbon isotopes (¹²C, ¹³C and ¹⁴C) to determine CO₂ sources in forest soils developed on contrasting geology in Slovenia. *Environ. Earth Sci.* 75, 1068-1-1068-10. doi: 10.1007/s12665-016-5866-0.
4. Levin I., Naegler T., Kromer B., Diehl M., Francey R.J., Gomez-Palaez A.J., Steele P.L., Wagenbach D., Weller R., Worthy D.E. (2010) Observations and modelling of the global distribution and long-term trend of atmospheric ¹⁴CO₂. *Tellus* 62B, 26-46.
5. Liu W., Morizumi J., Yamazawa H., Iida T. (2006) Depth profiles of radiocarbon and carbon isotopic compositions of organic matter and CO₂ in a forest soil. *J. Environ. Radioact.* 90, 210-223.
6. Nakamura T., Fujiyoshi R. and others (2016) Soil CO₂ monitoring in winter under a cool-temperate forest site in Hokkaido, Japan. *International Conference on Radioecological Concentration Processes*, Nov. 6-9, 2016, Seville, Spain.