

森林土壌における有機物の分解速度と回転速度の評価

鈴木 孝守, 森泉 純, 山澤 弘実, 飯田 孝夫

名古屋大学大学院工学研究科原子核工学専攻

〒464-8603 名古屋市千種区不老町

Tel. 052-789-4676 Fax. 052-789-3782

1. はじめに

炭素は有機生命体を構成する最も重要な元素であり、様々な化合物の形で地球上に広く存在している。炭素は大気中では主に二酸化炭素（以下 CO_2 ）の形で存在し、陸上生物圏では有機化合物の形態をとって植物体を構成している。それが枯死したあとは土壌中に堆積して土壌有機物となって存在している。海水中には炭酸イオンの形で貯蔵されている。地球温暖化の主な原因は、大気中温室効果ガス、特に CO_2 の濃度の増加であると考えられている（IPCC, 1996）。多くの研究者のあいだで炭素循環に関する研究が行われている。しかし、生物圏で炭素循環の過程についていくつかの重要な情報が乏しく、 CO_2 濃度増加量の予測を不確実なものにしている（Suzuki, 1995）。

本研究は、多くの重要な炭素リザーバーを有している森林の土壌に着目し、土壌中の有機物および CO_2 の ^{14}C 比放射能分布を把握することにより、有機物分解と根呼吸による CO_2 の生成比を算出し、炭素循環に対して重要な情報の一つである有機物の分解速度・回転時間を評価した。

2. 観測

2.1 観測場所

土壌空気中の $\text{CO}_2 \cdot ^{14}\text{CO}_2$ 濃度、土壌-大気 $\text{CO}_2 \cdot ^{14}\text{CO}_2$ フラックス、土壌有機物の ^{14}C 比放射能の測定を2003年の2, 5, 8, 10月に名古屋大学構内の雑木林にて行った。雑木林を構成する主な木はカシとアカマツである。地面は2度程度の斜面となっている。土壌の上には、落ち葉が積もっており、その下に3~4cmほどの腐葉腐植の黒い土が存在する。その下は鉱物土壌である。本研究では土壌表面の枯葉を取り除いて観測を行った。

2.2 測定

本研究では土壌空気の採取には化学反応による同位体分別が生じないグラブサンプリング法を用いた。採取の1ヶ月以上前に土壌にサンプリング管を目的の深さまで打ち込んだ。サンプリング管の材質はステンレスであり、外径 13.8 mm、内径 7.8 mm、先端には空気を採取するための直径 4 mm の吸気孔が3つ空けられている。本測定では、穴の位置を 15・30・50・80・120 cm の深さに設置した。各管の水平位置の間隔は 30 cm ほどである。土壌空気の採取にはダブルダイヤフラム方式の小型ポンプを用いた。他の深さの土壌空気が混合しないように流量は 500 mL min^{-1} で約 200~400 mL の土壌空気をアルミニウムバックに採取し、 $\text{CO}_2 \cdot ^{14}\text{CO}_2$ 濃度を定量した。

土壌-大気 CO_2 フラックスの測定は比較的簡便に測定ができること、同位体測定で空気を直接サンプリングする必要があることなどから密閉チェンバー法（Swiler et al., 1984; Yagi and Minami, 1990）

と通気チェンバー法 (Koarashi et al., 2002) を用いた。密閉チェンバー法は対象土壌表面をチェンバーで覆い、内部の濃度変化からフラックスを評価する。通気チェンバー法は対象土壌表面をチェンバーで覆い、一定流量でチェンバー内の空気を引き、定常になったところで、大気とチェンバー内の濃度差からフラックスを評価する。密閉チェンバーの大きさは幅 1.5 m × 奥行 0.2 m × 高さ 0.5 m (底面積 0.3m²) である。チェンバーを設置する際に地面に 2 cm ほど埋め込むため内容積は 0.144m³ となる。材質は透明なメタクリル樹脂でありチェンバー内の様子を見ることができる。密閉チェンバーの側面にチェンバー内空気の採取を行うための空気採取孔を設置し、ストップバルブが付いている。測定装置上部に設けた小型のファンはチェンバー内部の空気を混合して濃度勾配を一様にするためである。通気チェンバーの構造は密閉チェンバーの構造とほとんど同じである。異なる点としては常時通気を行うために 0.2 m × 0.5 m の側面の地面から高さ 34 cm から 46 cm までに 0.2 m × 0.12 m の大きさ窓があいている。

土壌有機物の ¹⁴C 比放射能の測定は有機物を燃焼して、CO₂ 化して精製した後、加速器質量分析にて行った。

CO₂ 濃度の定量方法は、広い測定レンジと直線性が良い利点から FID 式ガスクロマトグラフ (GC-14A ; 島津製作所製) を使用した。FID は CO₂ に対して感度はないが、メタナイザー (MT-221; GL sciences 製) により CO₂ を CH₄ に還元することで検出可能となる。分析カラムは長さ 2m、内径 3mm のステンレスカラムで、充填剤としてシリカゲル (60/80 mesh) を用いた。恒温槽温度は 135°C とした。キャリアガスとして高純度窒素ガス (N₂ ≥ 99.9999%, CO₂ ≤ 0.1 ppmv) を使用し、35 mL min⁻¹ の流量で流した。燃焼用ガスとして、FID に水素と空気を 0.7 kg cm⁻² と 0.6 kg cm⁻² の圧力で供給した。メタナイザーの炉温度は 390 °C とした。

¹⁴CO₂ 濃度の定量方法は 1 mgC というわずかな試料で測定ができる加速器質量分析法を用いた (中村, 1988)。試料空気中 CO₂ の精製後、グラファイト化を行った。CO₂ からグラファイトの調製には低バックグラウンドで長時間の安定な測定が可能な水素還元法を用いた (Kitagawa et al. 1993)。CO₂ 濃度の低い地表層の空気のように 1mgC の試料の確保が困難な場所から採取した空気試料に対しては希釈法によって必要な試料量を確保した (後藤, 2000)。

2.3 観測結果

2.3.1 土壌有機物のもつ ¹⁴C 比放射能分布

土壌有機物のもつ ¹⁴C 比放射能の深さ分布の測定結果を Fig. 1 に示す。土壌表層で有機物のもつ ¹⁴C 比放射能が大気 CO₂ の ¹⁴C 比放射能より 10 ~ 60 mBq gC⁻¹ ほど高かった。深さ 10 ~ 30 cm 程度では大気と変わらない ¹⁴C 比放射能をもっていた。30 cm 以深では大気よりも低い ¹⁴C 比放射能をもっていた。土壌表層では 1950 年代から 1960 年代にかけての大気圏核実験影響が今だ顕著であった。深さ 10 ~ 30 cm 程度では比較的新しい炭素を保持していると考えられる。30 cm 以深では有機物の含有率も低く、¹⁴C 比放射能も大気より低いため、かなり古い炭素を保持していると考えられる。

2.3.2 土壌空気中の CO₂ の ¹⁴C 比放射能

測定地点における地上 50cm の大気 CO₂ の ¹⁴C 比放射能は 240 ~ 246 mBq gC⁻¹ であった。

土壌空気中の CO₂・¹⁴CO₂ 濃度分布および ¹⁴C 比放射能を Fig. 2 および Fig. 3 に示す。土壌空気中の CO₂・¹⁴CO₂ 濃度は深いほど高いという似た分布を示した。土壌空気中の CO₂ の ¹⁴C 比放射能は大気中 CO₂

と深さによらずほぼ同じ値であった。しかし、0 cm でわずかに ^{14}C 比放射能が高くなっており、土壤表層の大気より高い ^{14}C 比放射能をもった有機物分解により生成した CO_2 の影響と考えられる。土壤空気中の $\text{CO}_2 \cdot ^{14}\text{CO}_2$ 濃度で8月の深さ 120 cm の濃度が深さ 0 ~ 80 cm に対して急に高くなった。これは植物の根呼吸による CO_2 生成の影響がみられたと考えられる。夏に植物は活動的であり、根呼吸による CO_2 の生成量が増えた。植物の根は 1 m より深い部分で最も根呼吸をしていると考えることができる。土壤空気の CO_2 の ^{14}C 比放射能が一様であったのは深さ 30 cm 以深では有機物の含有率が低いことから有機物分解による CO_2 の影響はほとんどなく、 CO_2 が根呼吸および土壤中の拡散に支配されているからと考えられる。

2.3.3 土壤-大気 $\text{CO}_2 \cdot ^{14}\text{CO}_2$ フラックス

土壤-大気 $\text{CO}_2 \cdot ^{14}\text{CO}_2$ フラックスの測定結果を Table 1 に示す。なお Table 1 には土壤-大気 CO_2 フラックスの ^{14}C 比放射能も示す。 $\text{CO}_2 \cdot ^{14}\text{CO}_2$ フラックスは似た変動をしている。2月で最もフラックスが小さく、8月が最も大きかった。すべての測定において大気中 CO_2 よりも高い ^{14}C 比放射能を観測した。2月は地温が低いため、植物の活動や微生物による有機物分解が少ない、8月は地温も高く植物の活動や微生物による有機物分解が盛んに行われたためフラックスの大きさが変動したと考えられる。土壤空気中の CO_2 の ^{14}C 比放射能とは異なり、土壤表層の高い ^{14}C 比放射能をもった有機物の影響をフラックスでみることができた。

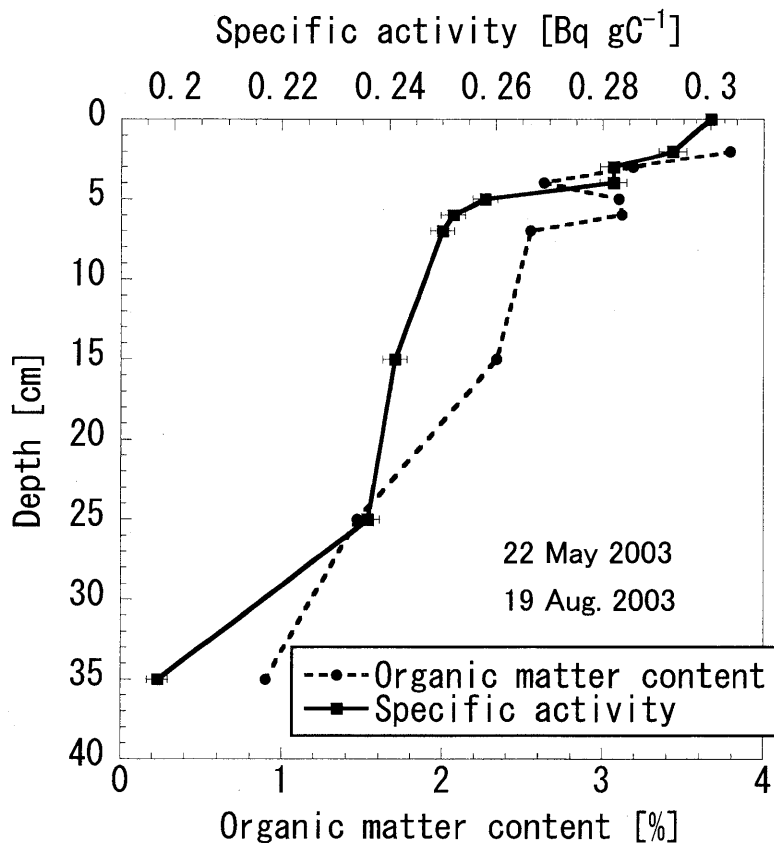


Fig. 1 Depth distributions of ^{14}C specific activities in soil organic matter and organic matter contents.

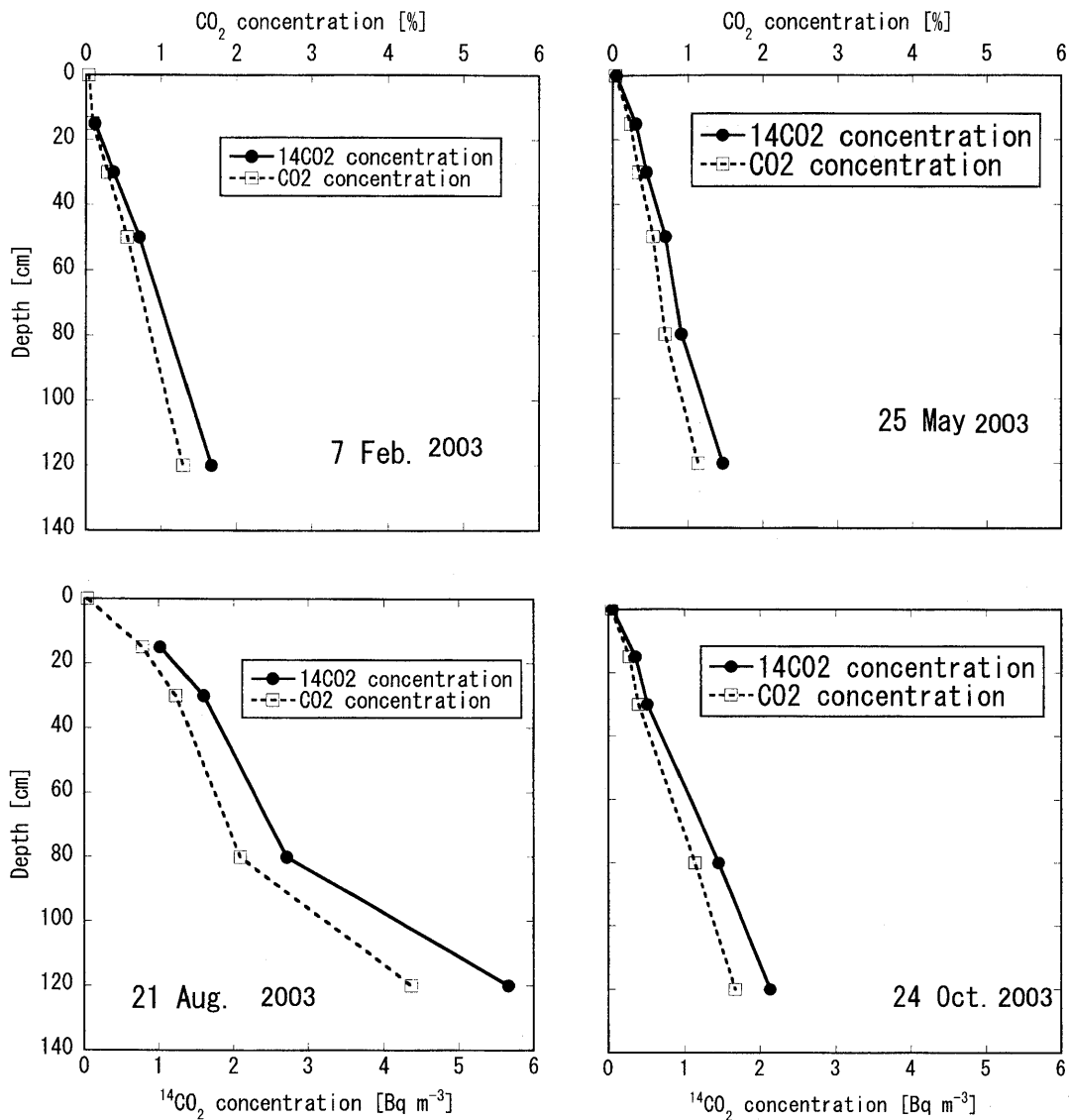


Fig. 2 Depth distributions of ¹⁴CO₂ concentrations.

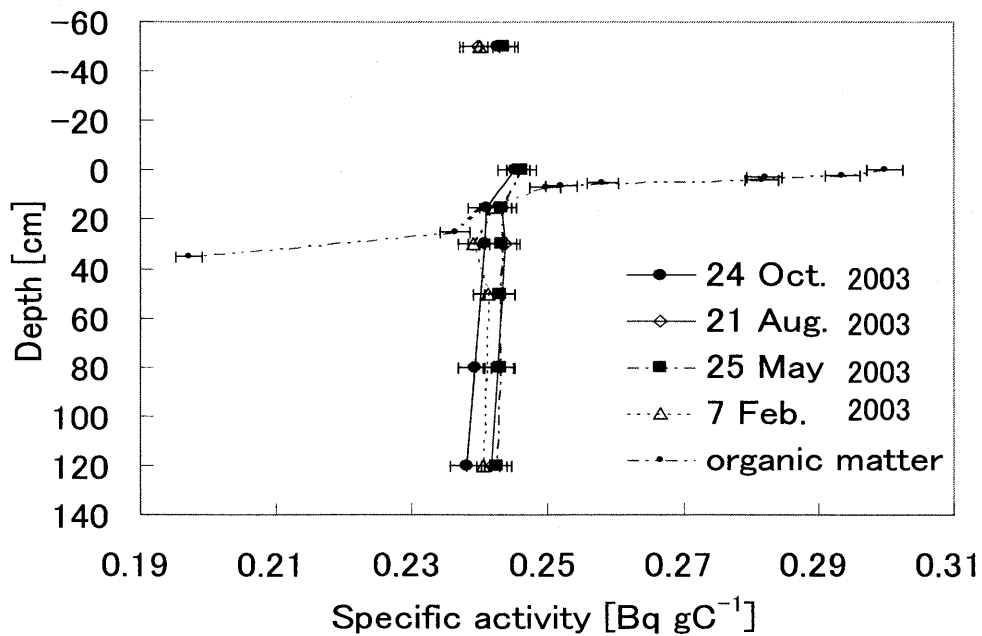


Fig. 3 Depth distributions of ¹⁴C specific activity in soil air and soil organic matter.

Table 1 Estimation of $^{14}\text{CO}_2$ fluxes and ^{14}C specific activities of CO_2 emitted by the ground surface.

Date	CO_2 flux [$\text{gC m}^{-2}\text{h}^{-1}$]	$^{14}\text{CO}_2$ flux [$\times 10^{-5} \text{Bq m}^{-2}\text{s}^{-1}$]	Specific activity in CO_2 flux [Bq gC^{-1}]	Specific activity in atmosphere [Bq gC^{-1}]
7 Feb.2003	0.133 \pm 0.010	0.90 \pm 0.07	0.244 \pm 0.018	0.240 \pm 0.003
25 May 2003	0.150 \pm 0.009	1.10 \pm 0.06	0.265 \pm 0.015	0.243 \pm 0.002
21 Aug.2003	0.270 \pm 0.016	1.89 \pm 0.11	0.252 \pm 0.015	0.246 \pm 0.002
22 Aug.2003	0.357 \pm 0.029	2.45 \pm 0.20	0.247 \pm 0.021	0.240 \pm 0.002
23 Aug.2003	0.307 \pm 0.024	2.11 \pm 0.16	0.247 \pm 0.019	0.240 \pm 0.002
24 Oct.2003	0.102 \pm 0.008	0.71 \pm 0.05	0.250 \pm 0.019	0.240 \pm 0.003
27 Oct.2003	0.154 \pm 0.011	1.12 \pm 0.08	0.261 \pm 0.019	0.243 \pm 0.003
31 Oct.2003	0.112 \pm 0.004	0.80 \pm 0.03	0.257 \pm 0.009	0.243 \pm 0.003
24 Oct.2003	0.085 \pm 0.005	0.61 \pm 0.03	0.260 \pm 0.014	0.240 \pm 0.003
27 Oct.2003	0.133 \pm 0.007	0.96 \pm 0.05	0.261 \pm 0.014	0.243 \pm 0.003
31 Oct.2003	0.109 \pm 0.004	0.80 \pm 0.03	0.263 \pm 0.009	0.243 \pm 0.003

Closed

Flow-through

3. 炭素循環の評価

3.1 有機物分解と根呼吸による CO₂ の生成比の評価

土壌空気の CO₂ 濃度は数日間でほとんど変動がなかった。つまり土壌で生成する CO₂ 量と土壌から除去される CO₂ 量とが平衡に達している。土壌で生成する CO₂ は有機物分解と根呼吸のみとし、土壌から除去される CO₂ は土壌-大気 CO₂ フラックスのみと仮定して有機物分解と根呼吸による CO₂ の生成比の評価を行った。土壌中での水の動きは大変遅く、雨が降ったとしても土壌空気の CO₂ 濃度はほとんど変動しないため水に溶けて輸送される CO₂ 量は無視した。土壌-大気 CO₂ フラックスの ¹⁴C 比放射能と有機物分解と根呼吸の CO₂ 生成割合の間には次の式が成り立つ。

$$A_f = A_o \cdot \alpha + A_r \cdot (1 - \alpha) \quad (1)$$

ここで有機物分解の生成割合を α 、 A_f は土壌-大気 CO₂ フラックスの ¹⁴C 比放射能 [Bq gC⁻¹]、 A_o は土壌有機物の平均的な ¹⁴C 比放射能 [Bq gC⁻¹]、 A_r は根呼吸由来の CO₂ の ¹⁴C 比放射能 [Bq gC⁻¹] である。

有機物分解で生成した CO₂ の ¹⁴C 比放射能は実験により有機物のもつ ¹⁴C 比放射能と等しいことを確認した。よって Fig. 1 から土壌有機物の平均的な ¹⁴C 比放射能を見積り A_o (268~280 mBq gC⁻¹) とした。根呼吸で生成した CO₂ の同位体比は植物体を構成する同位体比と同じ(下田, 2003)であるので、観測地点の葉の ¹⁴C 比放射能 (236 mBq gC⁻¹) を用いた。式(a)より求めた有機物分解の CO₂ 生成割合 α を Table 2 に示す。

Table 2 Ratio of degradation of organic matter by microorganisms in CO₂ flux.

Ratio of degradation of organic matter		
Type of chamber	Closed chamber	Flow-through chamber
7 Feb.2003	0.20	
25 May 2003	0.66	
21 Aug.2003	0.50	
22 Aug.2003	0.36	
23 Aug.2003	0.36	
24 Oct.2003	0.34	0.56
27 Oct.2003	0.59	0.58
31 Oct.2003	0.50	0.63

3.2 有機物の分解速度

3.1 で求めた CO₂ の生成割合 α を各季節の代表値として有機物の分解速度を算出した。年間の平均有機物分解量を推定するため、CO₂ フラックスの値を平均した。ただし、降雨によりフラックスの値は大きく変動するため、降雨 3 日間のフラックスの値は除いた。CO₂ フラックス中の有機物分解による CO₂ の生成量の年間の平均値を F_{OA} [kgCO₂ m⁻²h⁻¹]、土壌中の有機物の量を W_o [kgC m⁻²] とすると有機物の分解速度 K_B [kgCO₂ kgC⁻¹h⁻¹] は、式(b)で表される。

$$K_B = F_{OA} / W_o \quad (2)$$

本研究で見積もった通年の有機物の分解速度は $(8.7 \pm 3.8) \times 10^{-6}$ [kgCO₂ kgC⁻¹h⁻¹] であった。有

機物の分解速度の逆数をとることでその有機物の回転時間が求まる。その値は 48 ± 21 年であった。鉱物層土壌の有機物の回転時間は 10~90 年と言われている (Qingqiang, 2002)。本研究でも同等の値が得られた。

4. まとめ

土壌空気中の $\text{CO}_2 \cdot ^{14}\text{CO}_2$ 濃度、土壌-大気 $\text{CO}_2 \cdot ^{14}\text{CO}_2$ フラックス、土壌有機物の ^{14}C 比放射能の測定を行った。その結果から土壌有機物と根呼吸による CO_2 の生成比を求めた。得られた生成比から土壌有機物の分解速度および回転速度を評価した。

土壌有機物分解と根呼吸による CO_2 の生成比は、 $0.20 \sim 0.66$ となり、季節により割合が変動した。有機物分解による CO_2 の生成量と根呼吸による CO_2 の生成量が異なった季節変化をしたため、生成比が季節ごとに異なった。8月は気温が高く、光合成など植物の活動がとても活発であったことや2月は地温が低いため植物および有機物分解による CO_2 の生成量、特に有機物分解による CO_2 の生成量が少なかった。算出した CO_2 の生成比から有機物の分解速度を求め、その分解速度は $(8.7 \pm 3.8) \times 10^{-6} [\text{kgCO}_2 \text{ kg-C}^{-1}\text{h}^{-1}]$ と見積もられ、有機物の回転時間は 48 ± 21 年と評価した。最も分解されやすい枯葉を取り除いて観測を行ったため、この回転時間は鉱物土壌の有機物の平均的な回転時間に一致した。

謝辞

中村俊夫教授、丹生越子博士にはタンデトロロン2号機による ^{14}C 測定をして頂き、池田晃子氏には試料のグラファイト化の調製をご指導頂きました。この場を借りて深くお礼を申し上げます。

参考文献

- IPCC 地球温暖化第二次レポート (1996), 気候変動に関する政府間パネル編
- Jun Koarashi, Hikaru Amano, mariko Andoh, Takao iida, Jun Moriizumi (2002), Estimation of $^{14}\text{CO}_2$ flux at soil-atmosphere interface and distribution of ^{14}C in forest ecosystem. Journal of environmental radioactivity, 60, 249-261.
- Kitagawa H., et al. (1993), A batch preparation method for graphite targets with low background for AMS ^{14}C measurements, *Radiocarbon*, 35, 295-300.
- Suzuki, A., Nakamori, T., Kayanne H. (1995), The mechanism of production enhancement in coral reef carbonate systems: model and empirical results, *Sediment. Geol.*, 99 259-280.
- Swiler, W. and R. Conrad (1984), Methane emission from rice paddies. *J. Atmos. Chem.*, 1, 171-186.
- Yagi, K. and K. Minami (1990), Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil sci. Plant Nutr.*, 36, 599-610.
- 後藤 晃彦, 森泉 純, 飯田 孝夫 (2000), 大気中 ^{14}C 測定手法の検討(II), 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書(XI), 名古屋大学年代測定資料研究センター, 164-169.
- 下田星児, 莫文紅, 村山昌平, 高村近子, 及川武久 (2003), 草原生態系の炭素安定同位体比の季節変化, 農業環境工学関連4学会 2003年度合同大会講演要旨, 204.
- 中村 俊夫・中井 信之(1988), 放射性炭素年代測定法の基礎 - 加速器質量分析法に重点をおいて - 名古屋大学アイソトープ総合センター, 地質学論集, 第 29 号, 83-106.

The evaluation in decomposition rate of organic matter and turn over time in the forested soil.

Takamori SUZUKI, Jun MORIIZUMI, Hiromi YAMAZAWA, and Takao IIDA

Department of Nuclear Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603, Japan
Tel. +81-52-789-4676 Fax. +81-52-789-3782

ABSTRACT

The soil in the forest is involved with many important carbon reservoirs. Decomposition rate and turn over time of the soil organic matter, which are important factors for carbon cycle in the biosphere, have been evaluated by an analysis of the carbon isotopic ratio in the soil. The following observation were carried out in the forest in the Nagoya University: Vertical profiles of organic matter contents in soil and carbon dioxide (CO₂) concentrations in soil air and CO₂ flux from the soil and their ¹⁴C specific activities of the CO₂ flux from the soil. Carbon-14 specific activities of soil organic matter at 0-10 cm depth were 10-60 mBq gC⁻¹ higher than that of atmospheric CO₂. The enrichment of ¹⁴C would be attributed nuclear testings. Contrastingly, ¹⁴C specific activities of CO₂ of soil air were almost to that of the atmospheric CO₂, and their depth distributions to 120cm were almost uniform. Carbon-14 specific activities of CO₂ of the surface soil air and of CO₂ fluxes from soil to the atmosphere were 246 mBq gC⁻¹ and 244-265 mBq gC⁻¹, respectively. Soil organic matter and CO₂ flux with ¹⁴C specific activity were higher than that of atmospheric CO₂.

Using the difference of ¹⁴C specific activities between CO₂ produced by root respiration and CO₂ from organic matter decomposition, the decomposition rate of soil organic matter is calculated with $8.7 \times 10^{-6} \text{ kgCO}_2 \text{ kgC}^{-1}\text{h}^{-1}$, the turn over time is estimated with 48 years.

学会発表

鈴木 孝守, 山外 功太郎, 森泉 純, 山澤 弘実, 飯田孝夫 (2003 年 7 月) 地表面近傍における $^{14}\text{CO}_2$ のフラックスに関する評価, 第 40 回理工学における同位元素・放射線研究発表会.

鈴木 孝守, 森泉 純, 山澤 弘実, 飯田孝夫 (2003 年 12 月) 森林土壌内における $^{14}\text{CO}_2$ の移行特性, 第 35 回日本原子力学会中部支部・研究発表会 要旨集 p. 44.