森林土壌呼吸 CO_2 の ^{14}C 同位体比変動モデル

河合 伸太郎，　森泉 純，　山澤 弘実，　飯田 孝夫

名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻
〒464-8603　名古屋市千種区不老町　Tel. 052-789-4677　Fax. 052-789-3782

1. 背景及び目的

森林は温室効果ガスである大気中 CO_2 の吸収源として重要性が認識されている。一方、森林は絶えず植物や土壌の呼吸により CO_2 を放出しているため、光合成がない夜間や冬季において森林は CO_2 の放出源となる。IPCC 報告書によると、森林からの CO_2 放出量は化石燃料起源 CO_2 の約 20 倍とされる。

森林の主な CO_2 放出源は土壌呼吸であり、土壌呼吸は、CO_2 生成過程の違いから、土壌表面のリター分解、土壌有機物分解及び根呼吸の 3 成分に分けられる。地球温暖化の将来予測及び対策のためには、土壌呼吸を CO_2 生成過程の異なる起源毎に定量評価するが必要がある。

森林内炭素循環過程での同位体分別効果により、リター、土壌有機物及び根はそれぞれ異なる炭素同位体比を持つ。既往研究では、土壌呼吸 CO_2 と起源毎の炭素同位体比を用いて、土壌呼吸に対する各起源成分の寄与割合をマスバランスにより評価した。しかし、土壌有機物の炭素同位体比が土壌深さによって大きく異なる事、CO_2 生成過程での同位体効果の可能性、土壌呼吸 CO_2 の炭素同位体比の時間変動のために、正確な起源別評価には課題が残り、土壌呼吸 CO_2 の起源別評価に対する炭素同位体比利用の有効性を検討する必要がある。

本研究では、(1)山地森林での土壌呼吸観測、(2)土壌有機物分解の測定及び評価、(3)数値モデルによる土壌呼吸の計算により、土壌呼吸 CO_2 の炭素同位体比の時間変動の解析を行ない、その変動要因を明らかにした。

2. 土壌呼吸 CO_2 の観測

土壌呼吸 CO_2 のフラックス及び炭素同位体比の観測を、2004 年 4 月から 2007 年 12 月まで愛知県豊田市稲武町(35°12'N, 137°24'E, 標高 1010m)の名大付属演習林内のカラマツ(*Larix leptolepis*)林で行なった。土壌呼吸の他に、土壌温度、土壌体積含水率、土壌有機物の炭素同位体比の測定を行なった。土壌呼吸 CO_2 は容積 144L のチャンバーによる蓄積法で採取した。CO_2 濃度は赤外線ガスアナライザ(LI-820, Li-Cor)により測定した。炭素同位体比分析には、名古屋大学年代測定総合研究センターのタンデトロン加速器質量分析計及び安定同位体質量分析計(Finnigan MAT252, Thermo Fisher Scientific)を用いた。

土壌呼吸 CO_2 フラックス測定の結果、土壌温度の上昇に伴う、フラックスの急激な増加が確認された。土壌呼吸 CO_2 の放射性炭素同位体比($\delta^{14}C$)は季節変動、日内変動を示し、夏季に高い値を示し、冬季に日変動幅が最大となった(**Fig. 1**)。

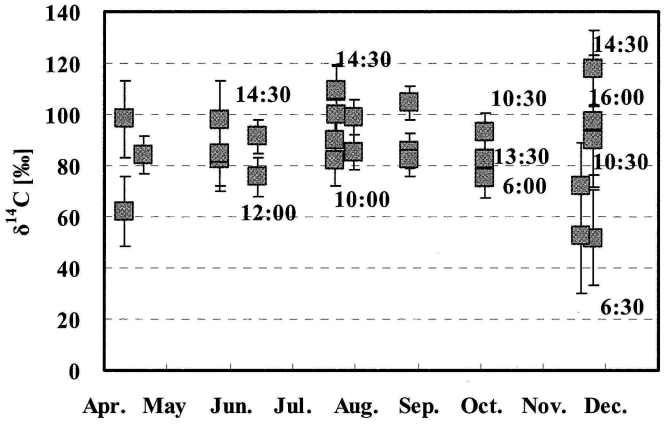

Fig. 1　土壌呼吸 CO_2 の $\delta^{14}C$ の時間変動の観測結果(2005~2006 年)。

1960 年初頭に行われた大規模な大気圏内核実験によって、土壌有機物の $\delta^{14}C$ は土壌表面で最大になる分布を持つ。土壌表面が高温になる夏季は、$\delta^{14}C$ の高い土壌表面での有機物分解が活発になる事、土壌深部の温度が比較的高い冬季は、土壌表面での有機物分解が抑制される事が、土壌呼吸 CO_2 の $\delta^{14}C$ 時間変動要因であると考えられる。土壌呼吸 CO_2 の炭素同位体比変動には、土壌有機物分解の変動の寄与が大きいと考えられたため、土壌有機物分解の CO_2 生成量を室内実験にて測定し、数値モデル計算を用いて土壌呼吸 CO_2 変動の解析を行なった。

3. 土壌有機物分解の測定及び評価

土壌有機物分解による CO_2 生成率(単位時間、乾燥土壌質量当たりの CO_2 放出量)の測定を行なった。容積 0.5 L 及び 7L のチャンバーに観測地土壌を封入し、容器内 CO_2 濃度増加率から CO_2 生成率を算出した。CO_2 生成率の土壌温度、CO_2 濃度、土壌深さ、土壌水分量への依存性が確かめられた。各依存性を以下の関数を用いてモデル化した。

CO_2 生成率は、土壌温度の上昇に伴い急激に増加した。土壌温度依存性は Arrhenius 式から導かれる土壌温度の指数関数によって良好に表された。

CO_2 濃度上昇に伴い CO_2 生成率が低下する結果が得られた。CO_2 濃度 3000ppmv での CO_2 生成率は、400ppmv 時の 2/3 程度であった。土壌微生物は、呼吸作用による CO_2 放出過程と炭素源としての CO_2 吸収過程を持つ事が知られている。土壌有機物分解の CO_2 濃度依存性には、これら 2 つの生物過程による影響が現れたものと考えられる。そこで、土壌有機物分解の CO_2 濃度依存性を、酵素反応論で用いられる Michaelis-Menten 式を用いて近似した。

土壌深さに対して CO_2 生成率が急激に減少する結果が得られた。土壌に含まれる有機物量が、土壌深さに対して急激に減少した結果から、土壌有機物含有量が CO_2 生成率に影響した事が考えられる。しかし、単位土壌有機物量当たりの CO_2 放出率が土壌深さに対して減少したため、有機物の化学形態毎に CO_2 生成率が異なると考えられる。実験結果から、土壌有機物分解の土壌深さ依存性を、土壌深さの指数関数で近似した。

低含水率では CO_2 生成率の低下が確認された。土壌含水率依存性のモデル化に当たり、本測定結果を良好に再現した *Bunnell et al.*(1977)の土壌呼吸 CO_2 フラックスの含水率依存性モデル式を引用した[1]。

土壌有機物分解の各環境因子依存性と土壌深さ分布から、土壌温度 23°C、CO_2 濃度 400ppmv、土壌含水率 50%を基準状態として、土壌有機物分解による CO_2 生成率をモデル化した(**Fig. 2**)。

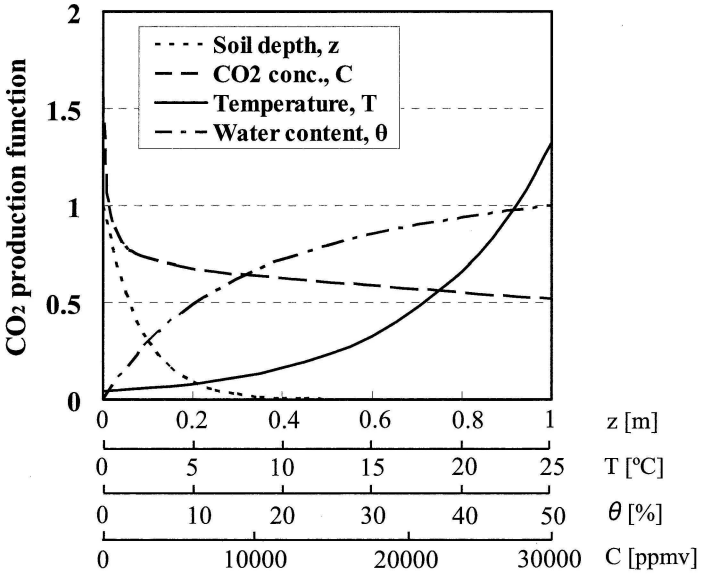

Fig. 2　土壌有機物分解の環境因子依存性。

4. 数値モデル計算による森林土壌呼吸の解析

土壌呼吸 CO_2 炭素同位体比の時間変動要因の解析を目的に、1 次元土壌中 CO_2 輸送モデルを作成した。土壌中での CO_2 輸送は拡散によるものとし、CO_2 生成項は、土壌有機物分解及び根呼吸とした。土壌有機物分解の CO_2 生成項には本研究で提案したモデル式を用い、根呼吸の CO_2 生成項には *Karizumi*(1979)の研究報告[2]を参考にして、根の土壌深さ分布と根呼吸の温度依存性から決定した。土壌温度分布の変動は、熱伝導方程式の解析解により与えた。

数値モデルにより、夏季に高く、冬季に低い土壌呼吸 CO_2 の $\delta^{14}C$ 変動傾向が再現された(**Fig. 3**)。全土壌有機物分解 CO_2 への土壌深さ 0-10cm の寄与率は、1 月に 65-80%、8 月に 75-85%の日変動を示した。^{14}C に富む土壌表面での有機物分解が夏季に活発である事、冬季の寄与率の日変動幅が夏季の約 1.5 倍になる事が、土壌呼吸 CO_2 の $\delta^{14}C$ 変動の一因である事が分かった。さらに、根呼吸は夏季に最大で 13‰程度、土壌呼吸 CO_2 の $\delta^{14}C$ の日変動幅を小さくする働きを示した。

土壌呼吸 CO_2 の $\delta^{13}C$ の計算結果は、観測結果の変動傾向とは一致したものの、全体的に 0.5‰程度過小計算された。土壌有機物分解または根呼吸の $\delta^{13}C$ と放出される CO_2 の $\delta^{13}C$ が異なる可能性が考えられる。

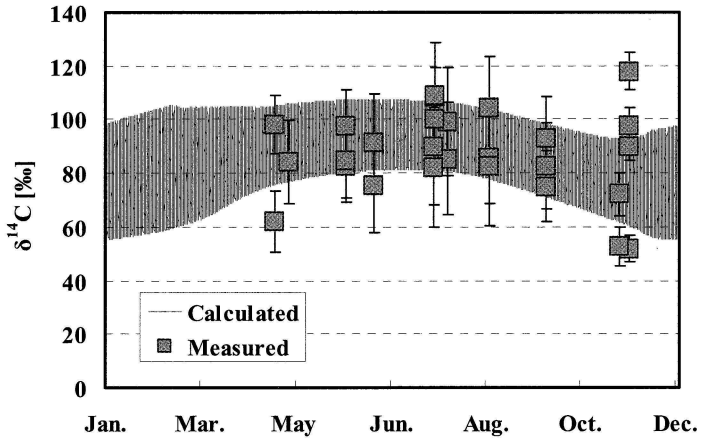

Fig. 3　土壌呼吸 CO_2 の $\delta^{14}C$ の変動。

5. 結論及び今後の課題

土壌呼吸 CO_2 の炭素同位体比変動要因を明らかにした。土壌呼吸起源評価に用いる土壌有機物の $\delta^{14}C$ 値には、夏季に 100‰、冬季に 80‰、かつ日変動幅が最大 45‰の変動を考慮する必要がある。今後の課題として、炭素同位体比を用いた土壌呼吸起源評価法の改良、土壌有機物の生成及び分解過程での同位体効果の評価が挙げられる。

謝辞

名古屋大学年代測定総合研究センターの中村 俊夫教授、小田 寛貴助教、池田 晃子技官、太田 友子氏には試料のグラファイト化の指導、またタンデトロン 2 号機での測定など様々なご指導をしていただきました。ここに心よりお礼を申し上げます。

名古屋大学生命農学研究科演習林の柴田 叡弐教授、今泉 保次技官、山口 法雄技官には演習林での観測にご助力いただきました。ここに深く感謝いたします。

引用文献

[1] Bunnell et al, Microbial respiration and substrate weight loss. 1. A general model of influence of abiotic variables, *Soil Biology and Biochemistry. Volume9. Pages 33-40, (1977).*

[2] Karizumi, Illustrations of tree roots, *(1979).*

Model of Variation in Carbon Isotopic Ratio of CO_2 from Forest Floor

Shintaro KAWAI, Jun MORIIZUMI, Hiromi YAMAZAWA, Takao IIDA

Department of Energy Engineering and Science, Graduated School of Engineering
Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603, Japan
Tel. 052-789-4677 Fax. 052-789-3782

ABSTRACT

Forest is a large reservoir of carbon, and is both the CO_2 release source and absorption sink. The forest in high latitude areas in the northern hemisphere is thought to be an important release source and absorption sink of CO_2 that contributes to the earth's carbon cycle. It has been therefore required to quantitatively estimate the ability of a forest of releasing or absorbing CO_2. Moreover, it is necessary to evaluate carbon cycle in the environment for the radiological dose evaluation from ^{14}C released from nuclear reactors and fuel reprocessing plants.

In the present study, the soil CO_2 efflux and its carbon isotopic ratio were measured in a forest. Soil temperature and the depth profile of the soil organic matter contents were also measured. The transportation of CO_2 in soil layer was calculated with measured CO_2 production rates to analyze the variation in carbon isotopic ratio in CO_2 emitted from the forest floor.

We selected a pine forest as an observation site (Inabu, Toyota, Aichi Pref., 35° 12'N, 137° 24'E) where the altitude is 1010 m above sea level, simulating a boreal forest. Mean tree height was 23 m, and mean tree age was about 40 y. The observation was performed from May 2004 to November 2006.

The soil CO_2 flux, defined as the mass of CO_2 released from unit area of soil surface per unit time, was measured at ten spots with a closed-chamber method. Non-dispersive infrared ray absorption gas analyzer (LI-820, Li-Cor) was used for CO_2 concentration analysis. Soil respired CO_2 was collected with a chamber of 144 L volume, then its carbon isotopic ratio was analyzed with Tandetron AMS and an isotopic ratio mass spectrometer (Finnigan MAT 252, Thermo Electron).

Soil cores (0~30cm) were sampled and depth profile of CO_2 production rates were measured in laboratory. The soil temperature, soil water and CO_2 concentration dependency of the CO_2 production rate were measured and modeled as a function of soil temperature, soil water and CO_2 concentration. The numerical analysis using one-dimensional soil CO_2 transport model was carried out for each carbon isotopic CO_2. The modeled CO_2 production rate was adapted to the numerical analysis to calculate forest floor CO_2 efflux and its carbon isotopic ratio.

The soil CO_2 flux increased with increasing soil temperature. The radiocarbon isotopic ratio ($\delta^{14}C$) of the soil respired CO_2 showed seasonal and diurnal variations, that it tends to have large values in high-temperature periods. It is well known that soil organic matter (SOM) has large $\delta^{14}C$ value at the top soil layer, which was affected by atomic-bomb test in 1950s and early 60s. Thus change in the depth profile of CO_2 production rate, which was caused by the change in the soil temperature, is thought as a cause of $\delta^{14}C$ variation in soil-respired CO_2.

The results of numerical analysis suggested that $\delta^{14}C$ in soil respired CO_2 increased in the high-temperature period, of which tendency was generally agreed with the measurement result. Therefore, it can be concluded that the change in the depth profile of CO_2 production rate causes the change in the carbon isotopic ratio in soil respired CO_2.

学会への発表

１．河合伸太郎、2007、炭素同位体比を用いた森林土壌からの CO2 放出能の定量評価、日本地球惑星科学連合大会、
２．河合伸太郎、2007、森林土壌呼吸 CO2 炭素同位体比変動の解析、日本保健物理学会
３．河合伸太郎、2007、Analysis of Variation in Carbon Isotopic Ratio of CO2 from Floor、3rd International Symposium on Isotope Science and Engineering from Basics to Applications
４．伊藤恒太、2007、安定炭素同位体比を用いた森林中炭素循環の定量評価、日本地球惑星科学連合大会
５．伊藤恒太、2007、Estimation of CO_2Transport in Forest Atmosphere Using Stable Carbon Isotope Ratio、3rd International Symposium on Isotope Science and Engineering from Basics to Applications