

第4章 閉鎖型生態系実験施設における炭素移行に関する調査研究

4.1 炭素移行モデル作成試験

4.1.1 作物炭素移行モデルの作成

A Model for Carbon Transfer from the Atmosphere to Crops

谷 享, 新井 竜司, 多胡 靖宏, 中村 裕二

環境シミュレーション研究部

Takashi TANI, Ryuji ARAI, Yasuhiro TAKO and Yuji NAKAMURA

Department of Environmental Simulation

Abstract

Estimation of activity concentration of ^{14}C in edible parts of crops is necessary to assess the local radiological impact of ^{14}C released from the spent nuclear fuel reprocessing plant in Rokkasho, Japan. In this study, carbon transfer in rice plant was described in a three-compartment model consisting of ear, and the mobile and immobile carbon pools of shoot. Photosynthetically fixed carbon moves into the ear and mobile carbon pool, and these two compartments release a part of the carbon into the atmosphere by respiration. Carbon accumulated in the mobile carbon pool is redistributed to the ear. Carbon transferred into the immobile carbon pool from the mobile one is accumulated there until harvest. Transfer coefficients of carbon going into and coming from these compartments were estimated by fitting the model to observed ratios of carbon fixed at each growth stage to the total carbon in the edible part at harvest ($R_p(t)$). The model was validated by measurement of $\delta^{13}\text{C}$ in the ear of rice plant exposed to atmospheric CO_2 with temporally changing ^{13}C concentration. The estimate of $\delta^{13}\text{C}$ value in the ear by the model was closer to the observed one, compared to that calculated by the specific activity method. This result implies that the newly developed model is applicable to estimate properly radiation dose to the neighboring population of nuclear facilities due to dynamic release of ^{14}C from the facilities.

1. 目的

大型再処理施設から大気中に排出される ^{14}C の一部は、光合成によって作物に固定される。したがって、経口摂取による ^{14}C の被ばく線量を評価するためには、作物の可食部の ^{14}C 量を推定する必要がある。

これまでの被ばく線量評価における ^{14}C 濃度の評価には比放射能法が用いられているが、大気中の ^{14}C 濃度が時間的に変動する場合には動的な評価法が必要となる。そこで、主要作物であるイネでの炭素移行をコンパートメントモデルで表現することを試み

た。これまで作物への $^{13}\text{CO}_2$ ばく露実験で、収穫日のイネの穂（可食部）に含まれる炭素全量に対する各生育時期に固定された炭素の寄与率（ $R_p(t)$ ）のデータを取得してきた。この $R_p(t)$ の実測値にコンパートメントモデルをフィッティングすることで、大気－作物間および作物部位間の炭素の移行速度定数の値を決定した。そして、大気 $^{13}\text{CO}_2$ 濃度を時期的に変動させた条件でイネを栽培し、収穫時の穂中 ^{13}C 濃度の実測値、比放射能法による推定値、新たに構築したモデルによる推定値を比較し、モデルの妥当性を検証することを目的とした。

2. 方法

イネの穂の成長は、穂の成長時に光合成で大気から取込まれた炭素と、茎葉に蓄積した炭素の両方に依存する (Cock and Yoshida, 1972; Okawa *et al.*, 2002)。茎葉に蓄積した炭素のうち、細胞壁を構成する炭素は穂に転流されない (Murayama *et al.*, 1957; Hirano *et al.*, 1999)。このようなことから、穂の ^{14}C 量 (Bq) を推定するモデルとして、穂と茎葉の転流可能な物質および転流不可能な物質の 3 コンパートメントで構成されるモデルを仮定した (Fig. 1)。各コンパートメント内の炭素量の時間変化は、

$$\frac{dM_E}{dt} = P_E(t) + k_{ME}(t)M_M(t) - k_{EA}M_E(t) \quad (1)$$

$$\frac{dM_M}{dt} = P_S(t) - k_{ME}(t)M_M(t) - k_{MI}M_M(t) - k_{MA}M_M(t) \quad (2)$$

$$\frac{dM_I}{dt} = k_{MI}M_M(t) \quad (3)$$

と表される。ここで、 $M_E(t)$ 、 $M_M(t)$ 、 $M_I(t)$ はそれぞれ穂、茎葉の転流可能な物質、転流不可能な物質の炭素量 (gC)、 $P_E(t)$ と $P_S(t)$ は大気から穂および茎葉の転流可能な物質への炭素移行速度 (gC d⁻¹)、 $k_{ME}(t)$ は茎葉の転流可能な物質から穂への炭素移行速度定数 (d⁻¹)、 k_{EA} と k_{MA} は穂および茎葉の転流可能な物質から大気への炭素移行速度定数 (d⁻¹)、 $k_{MI}(t)$ は茎葉の転流可能な物質から転流不可能な物質への炭素移行速度定数 (d⁻¹) である。穂および茎葉コンパートメント内の ^{14}C 量 (Bq) の時間変化は、(1)式および(2)式の右边各項に炭素供給源となる大気または各コンパートメントの ^{14}C 濃度 (Bq gC⁻¹) を乗じることで計算される。

(1)式の $P_E(t)$ と $K_{ME}(t)M_M(t)$ および(2)式の $P_S(t)$ は、 $P_E(t) = \{1 - f\}\{N_E(t) + k_{EA}M_E(t)\}$ (4)
 $k_{ME}(t)M_M(t) = f\{N_E(t) + k_{EA}M_E(t)\}$ (5)
 $P_S(t) = N_S(t) + k_{MA}M_M(t) + f\{N_E(t) + k_{EA}M_E(t)\}$ (6)
で表した。ここで、 f は穂への総炭素移行速度 ($N_E(t) + k_{EA}M_E(t)$) に対する茎葉の転流可能な物質から穂への炭素移行速度 ($K_{ME}(t)M_M(t)$) の比率、 $N_E(t)$ と $N_S(t)$ は成長曲線の微分によって得られる穂および茎葉における炭素増加速度 (gC d⁻¹) である。 f 、 k_{EA} 、 k_{MA} 、 $k_{MI}(t)$ の値は、 $^{13}\text{CO}_2$ ばく露実験で得られた穂および

茎葉の $R_p(t)$ の測定値にモデルをフィッティングすることで決定した。 $k_{MI}(t)$ については時間変化を考慮に入れた。これは $k_{MI}(t)$ が茎葉の細胞壁の増加に関与する移行パラメータであり、茎葉の成長が停止する乳熟初期以降は 0 になると考えられるためである。

作成したモデルの妥当性を検証するために、大気中 ^{13}C 濃度が時期的に変動する条件で作物を栽培し (Fig. 2)、収穫時の作物部位中 ^{13}C 濃度のモデル推定値を実測値と比較した。

3. 成果の概要

イネでは穂、茎葉の転流可能な物質および転流不可能な物質からなる 3 コンパートメントモデルを仮定することにより、穂と茎葉の $R_p(t)$ を推定できることが示唆された (Fig. 3)。 $R_p(t)$ が推定可能となれば、大気中 ^{14}C 濃度の時期的変動を考慮に入れて収穫時の作物部位中 ^{14}C 濃度 ($^{14}\text{C}_P$, Bq gC⁻¹) を求めることができる。

$$^{14}\text{C}_P = \int_0^{t_H} R_p(t) ^{14}\text{C}_A(t) dt \quad (7)$$

ここで、 t_H は収穫時の播種後日数、 $^{14}\text{C}_A(t)$ は大気中 ^{14}C 濃度 (Bq gC⁻¹) である。

大気中 ^{13}C 濃度が時期的に変動する条件で栽培したイネの穂中 ^{13}C 濃度を、 $R_p(t)$ のモデル推定値を用いて求めたところ、比放射能法による穂中 ^{13}C 濃度の推定値よりも実測値に近くなった (Fig. 4)。 $R_p(t)$ を一定とする比放射能法では、実際の作物で $R_p(t)$ が低い時期に大気中 ^{13}C 濃度が上昇する場合には (Fig. 4、栽培群 3rd) 作物中 ^{13}C 濃度が高く評価され、 $R_p(t)$ が高い時期に大気中 ^{13}C 濃度が上昇する場合には (Fig. 4、栽培群 1st、2nd) 実際よりも低く評価されるという結果が得られた。これは本試験で作成した動的炭素移行モデルが、現行の比放射能法では十分には取り扱い得ない“大気中 ^{14}C 濃度が時期的に変動する場合”でも、作物中の ^{14}C 濃度を適切に評価できるという優位性を示すものである。

引用文献

- Cock, J.H. *et al.* (1972) *Proc. Crop Sci. Soci. Japan*, **41**, 226-234.
Hirano, M. *et al.* (1999) *Jpn. J. Crop Sci.*, **68**, 99-104.

Murayama, N. *et al.* (1957) *J. Sci. Soi. Manure, Japan*, **28**, 361-364.

Okawa, S. *et al.* (2002) *Soil Sci. Plant Nutrit.*, **48**, 237-242.

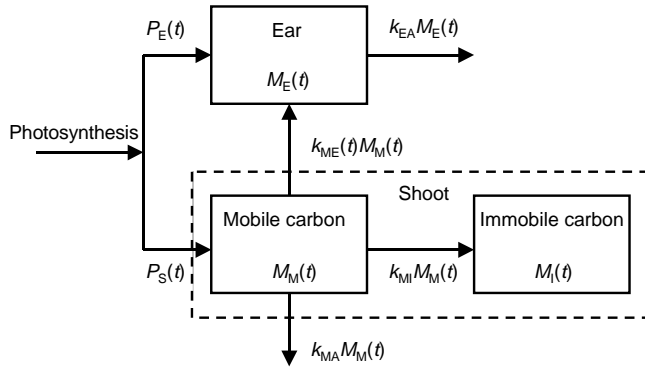


Fig. 1 Conceptual diagram of the dynamic compartment model. The dotted lines enclose the shoot part of rice plant.

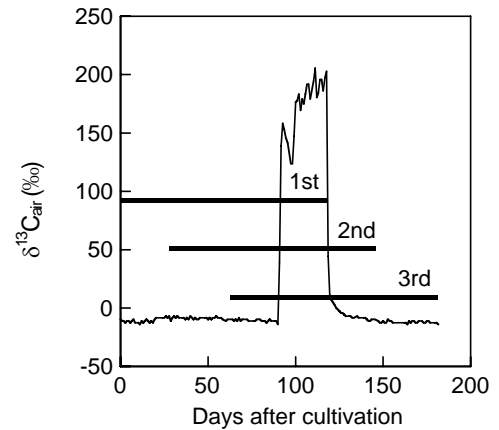


Fig. 2 Temporal changes in $\delta^{13}\text{C}$ in the air during cultivation of rice plant. Plants in this study were cultivated during three different periods (1st, 2nd, 3rd). The horizontal lines indicate the cultivation period from seeding to harvest for each of the three groups.

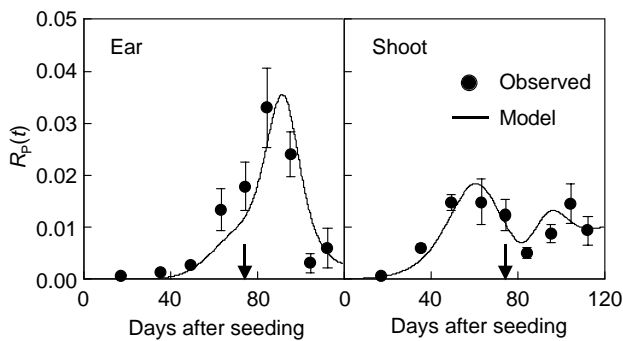


Fig. 3 The observed ratio and model estimate of carbon fixed at different times after seeding to the total carbon at the time of harvest ($R_P(t)$) in ear or shoot. Each point indicates the observed value (mean \pm SD, $n = 4$). The solid lines indicate the model estimate calculated by the dynamic compartment model (Fig. 1). The arrows in the graph indicate the time of heading (74 days after seeding).

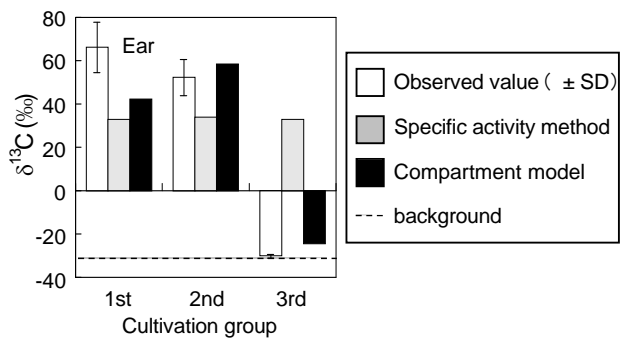


Fig. 4 The observed $\delta^{13}\text{C}$ and model estimates in ear of rice plant exposed to atmospheric CO_2 with changing ^{13}C concentration. The three groups correspond to those in Fig. 2. Each open column indicates the observed value (mean \pm SD, $n = 10$). In every stage (1st, 2nd, 3rd), the estimates by the compartment model (black column) are closer to the observed values than the predictions by the specific activity method (gray column).