

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：82105

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22681002

研究課題名(和文)炭素安定同位体比観測による可搬型生態系炭素動態評価システムの開発

研究課題名(英文)Development of portable carbon isotope observation system to evaluate carbon cycle in ecosystems

研究代表者

高梨 聡 (Takanashi, Satoru)

独立行政法人森林総合研究所・気象環境研究領域・主任研究員

研究者番号：90423011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円、(間接経費) 3,810,000円

研究成果の概要(和文)：二酸化炭素炭素安定同位体比を観測することにより炭素収支のみならず生態系の生理学的情報や環境応答に関する情報を得ることができる。大気二酸化炭素安定同位体比の連続測定を行うために、レーザー分析計を検証し、可搬型炭素安定同位体比測定システムを開発し、野外観測を行った。林内鉛直プロファイル観測からは二酸化炭素濃度上昇と共に炭素安定同位体比が減少する日変動を捉えることができた。一方で、土壌チャンバーによって測定した炭素安定同位体比のデータから、キーリングプロットによる土壌炭素ソースの同位体比推定は、特に、二酸化炭素フラックスの小さくなる冬季には非常に難しいことが分かった。

研究成果の概要(英文)：Fluxes and concentrations of carbon dioxide isotope compositions provide information about not only carbon balance but also ecosystem physiological processes and their response to environmental variation. For continuous measurement of carbon dioxide isotopic composition over various time-scales using a tunable diode laser spectrometer (TDLS), the performance of a TDLS was tested. Using this TDLS, we developed portable carbon isotope observation system, and continuously observed carbon isotopic composition of carbon dioxide in a field. The carbon isotopic composition of the atmospheric carbon dioxide was fluctuated according the changes of carbon dioxide concentration and fluctuations of the carbon isotope signal from soil respired carbon dioxide was not detected, although Keeling plots to estimate isotope signal from the soil were very sensitive and the results were very scattered especially in winter.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：物質循環 生態系モデル 炭素貯留 同位体 光合成 呼吸 レーザー分光 二酸化炭素

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 森林生態系は最も複雑な生態系であり、不確定性を減少させるには大気と生態系との炭素交換量を測定するだけでは不十分であり、炭素交換量と同時に、生態系内部の炭素動態を把握することによって、より正確な陸上生態系炭素交換量を算定することができる。二酸化炭素濃度のみならず、その安定同位体比を測定することによって、呼吸による放出起源の推定や水利用効率の推定など、通常の大気観測では得られない情報を得る試みがなされている。大型樹木において $^{13}\text{CO}_2$ によるラベリングを行い、炭素分配率を求める試みも欧州を中心にしておこなわれている。これまで、ガス態の安定同位体比の測定はフラスコを用いてガスサンプリングを行い、得られたガスから抽出・濃縮をし、質量分析計を用いて濃度分析をすることによって各種安定同位体比を求めてきた。分析には高価な質量分析計と手間や技術を必要としていた。しかしながら、近年、レーザー分析計の登場とその精度と安定性の進展により、分析に要する時間が飛躍的に改善し、分析に必要なサンプルの量も少なくなっている。これにより、これまで点での観測でしかできなかった安定同位体を用いて得られる情報を連続的に観測することによって、発生起源をトレースできる森林群落の炭素・水循環を観測によって描き出すことができるようになってきている。

(2) 森林における転流や炭素貯留に関するパラメータは、植物のガス交換プロセスと生長プロセスをつなぐ重要なパラメータであるが、これまで様々な森林における転流や炭素貯留期間を観測によって定量的に評価する有効な手段がなかったために、詳しい情報は得られておらず、その日変化や季節変化はほとんど知られていない。世界各地でのいくつかの研究によって、樹木内部の炭素動態(転流や炭素貯留期間)の季節変化が明らかにされつつあるが、まだ観測は始まったばかりであり、様々な生態系において観測し、一般則を導く必要がある。

## 2. 研究の目的

生態系における炭素循環過程を真に理解し、その環境変動に対する応答を予測するためには、炭素安定同位体比連続観測および統合モデルによって炭素循環過程を評価し、その手法を確立して、様々な生態系における測定を行う必要がある。

本研究では、森林の「いつ」吸収された炭素が「どの部分に」「どれだけ」蓄えられているかについての知見を加えた炭素動態を、炭素安定同位体比を用いて明らかにする手法を確立し、微気象学的手法と生態学的手法(微分値観測と積分値観測)による炭素動態研究に新たな融合的知見をもたらす、様々な気候帯・生態系における炭素動態研究を大き

く前進させることを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) レーザー分析計の検証

従来の質量分析計では行えなかった野外での大気 $^{13}\text{CO}_2$ 測定を行うために、CRDS(キャビティリングダウン方式)レーザー分析計(G2101-i, Picarro Inc.)の森林での観測可能性を検証した。まず、二酸化炭素が充填されたシリンダーを検証用に準備し、シリンダーのガスをフラスコにて採取した。フラスコ内のガスから、真空冷却トラップにて二酸化炭素のみを抽出し、安定同位体質量分析計(MAT252, Thermo Scientific)を用いて、デュアルインレット法により炭素安定同位体比を測定した。このシリンダーのガスを用いて、レーザー分析計の精度検証を行った。また、この分析精度をもとに、クローズドチャンバー法の測定結果からキーリングプロットによって放出される $\text{CO}_2$ の同位体比を決定する際の誤差検証を行った。

### (2) 可搬型観測システムの開発

さまざまな生態系で観測を行えるように(1)で検証を行ったレーザー分析計を用いた観測システムを開発し、森林生態系にて実地観測を行い、野外での長期連続観測を試行した。

### (3) 微気象炭素安定同位体モデルの検証

炭素安定同位体の森林内動態について調べるために、微気象群落多層モデルを用いた。このモデルは、大気拡散モデル、放射伝達モデル、エネルギー収支モデル、蒸散・光合成モデル、雨水の遮断・蒸発モデル、幹呼吸モデル、土壌呼吸モデルのサブモデルによって素過程をモデル化しており、樹冠上の微気象環境から林内と樹冠上の微気象環境およびフラックスを再現計算できる。光合成による炭素安定同位体分別は葉内二酸化炭素濃度と大気二酸化炭素濃度との比とを関連付けた Farquhar らの線形モデルから計算した。葉の呼吸によって放出される炭素安定同位体比はその層にある葉が前日の光合成によって固定した炭素安定同位体比から計算し、土壌からの炭素安定同位体比については群落全体の光合成によって固定された炭素安定同位体比から計算した。森林生態系での観測結果を用いて、このモデルの検証を行った。

### (4) 観測システムの応用

本研究の観測システムを応用し、アカマツ樹体内の炭素動態を明らかにするために、炭素安定同位体を用いたラベリング実験を行った。樹高20mのアカマツ成木の樹冠部を覆うようにラベリングチャンバーをかぶせて $^{13}\text{CO}_2$ ラベリングを行い、測定には、幹部に閉鎖循環式呼吸量測定チャンバーを設置して、放出される二酸化炭素の炭素安定同位体比をモニタリングした。ラベリング実験は秋季、

冬季、夏季に行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) CRDS レーザー分析計の検証

シリンダーの CO<sub>2</sub> ガスを 24 時間程度測定し、積算時間ごとに測定誤差を算出し、アラン分散を求めた(図 1)。その結果、15~20 分程度の積算時間で最も精度がよく、その精度は 1000 秒積算で 0.08‰(715ppm) ~ 0.18‰(389ppm) 程度であった。この分析精度をもとに、モンテカルロ法により模擬データを生成し、キーリングプロット切片的の 95%信頼区間を求めたところ、CO<sub>2</sub> の濃度上昇量によって異なり、CO<sub>2</sub> 濃度上昇が 0.1ppm/sec の時(15分積算)に約 5‰、0.5ppm/sec の時に約 1‰であった。

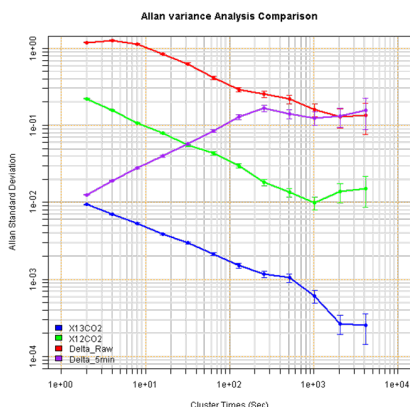


図 1 CO<sub>2</sub> 濃度 389ppm でのアラン分散

##### (2) 可搬型観測システムの開発

大気サンプリング装置や呼吸量測定チャンバーなどのシステム開発を行った。レーザー分析計および電磁弁制御部をコンパクトなケースにおさめ、内部には温度制御装置を組み込んだ。呼吸量測定用の幹チャンバーおよび土壌チャンバーをあわせても数人により一日程度でシステムを組み上げられるよう、可搬型観測システムを完成させた。また、携帯電話回線を使用することにより、データを遠隔地からでもモニタリングできるシステムを構築した。これにより、野外環境にて二酸化炭素安定同位体比の長期連続観測が可能となった。

富士吉田アカマツ林サイトにおいて、<sup>13</sup>CO<sub>2</sub> 鉛直プロファイル観測、自動開閉チャンバーを用いた土壌および葉からの <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> フラックス観測を 2011 年 7 月から 12 月まで行った。2011 年 11 月 1 日から光合成による分別を測定するために、枝チャンバーを取り付けた。林内鉛直プロファイル観測からは CO<sub>2</sub> の濃度上昇と共に <sup>13</sup>C が減少する日変動を捉えることができた。土壌チャンバーによって測定した <sup>13</sup>C のデータから、キーリングプロットによる土壌炭素ソースの同位体比推定を行った。クローズドチャンバーによるキーリングプロットによる解析は、(そもそも前提が成り立たない面もあり) 精度的に難しく、特に、CO<sub>2</sub> フラックスの小さくなる冬季には非常に

分散が大きくなることが分かった(図 2)。

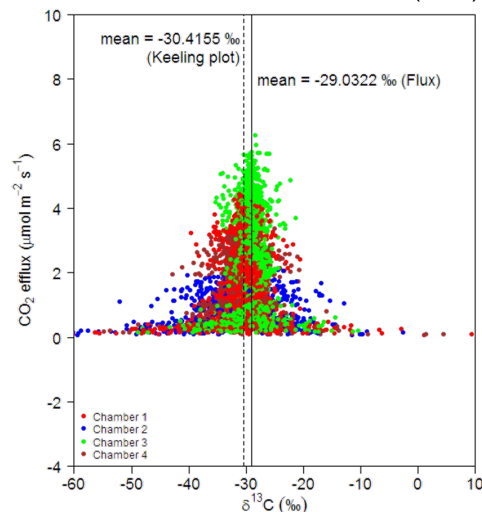


図 2 土壌 CO<sub>2</sub> フラックスとその炭素安定同位体比の関係

##### (3) 微気象同位体モデルの検証

富士吉田試験地において、名古屋大学や JAMSTEC の研究者らと共同し、名古屋大学の所有するレーザー二酸化炭素安定同位体比測定装置を利用して炭素・酸素・安定同位体連続観測を行った。その結果、樹冠上では日中には同位体比が高く、夜間に低い様子が観測され、樹冠内では林床に近づくにつれ同位体比が低い様子が観測された。微気象群落多層モデルによって、森林内の大気二酸化炭素安定同位体比を計算することができ、その再現計算結果は観測値とも一致していた(図 3)。

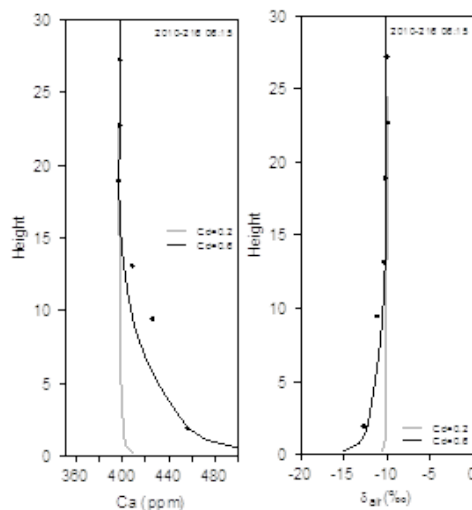


図 3 林内 CO<sub>2</sub> 濃度と <sup>13</sup>C 鉛直分布の再現計算結果

##### (4) 観測システムの応用

冬季のアカマツラベリング実験によって、冬季(12月)に固定された炭素は樹冠上部で蓄えられ、春先、気温が上昇し、光合成・蒸散活動が活発になるにつれて、急激に下方に流下し、呼吸基質として使われることが観測された。この現象はアカマツ新芽の伸長・展葉

前に起こっており、生長に先立ち転流が行われることが示唆された。炭素到達時間から求めた炭素移動速度は 0.11m/h から 0.23m/h であり、上部でやや速く、下部で遅い結果が得られた。冬季における実験では  $^{13}\text{C}$  の放出パターンは大きく異なっていたが、炭素到達時間は上部ではそれほど大きな差異はないものの、下部に行くほど遅くなっていた。

本研究で導入されたレーザー分光二酸化炭素安定同位体測定装置を二酸化炭素のモニタリングに用いることによって、ラベリングされた炭素が光合成によって取り込まれ、再び呼吸として大気に戻っていく様子を連続的に捉えることが可能となった。これらの観測により、大気と生態系との炭素交換量だけではなく、同時に、生態系内部の炭素動態を把握することにでき、より正確な陸上生態系炭素交換量を算定することができるであろう。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 11 件)

高梨 聡、檀浦 正子、小南 裕志、中野 隆志、安間 光、中井 裕一郎、アカマツの樹体内炭素移動と光合成・呼吸速度、日本生態学会第 61 回全国大会、広島国際会議場(広島県広島市) 2014.03.15

牧田 直樹、小杉 緑子、高梨 聡、光合成で獲得した炭素はいつ根呼吸として消費されるのか?  $^{13}\text{C}$  パルスラベリング同位体法を用いての解明、第 124 回日本森林学会大会、岩手大学(岩手県盛岡市) 2013.03.27

高梨 聡、檀浦 正子、小南 裕志、中野 隆志、安間 光、中井 裕一郎、アカマツに吸収された二酸化炭素はいつ、どれだけ呼吸として放出されるのか?、日本生態学会第 60 回全国大会、静岡県コンベンションアーツセンター(静岡県静岡市) 2013.03.07

和田 龍一、竹村 匡弘、大内麻衣、中山 智喜、松見 豊、高梨 聡、中井 裕一郎、北村 兼三、栗田直幸、藤吉 康志、村本 健一郎、井上 元、児玉 直美、中野 隆志、檜山 哲哉、レーザー分光同位体計測装置を使用した森林内二酸化炭素および水蒸気同位体比のリアルタイム計測、Japan GeoScience Union Meeting 2012、幕張メッセ(千葉県千葉市) 2012.05.23

Takanashi, S., Nakai, Y., Kitamura, K., Kominami, Y., Dannoura, M., Takahashi, K., Nakano, T., Automated continuous measurements of  $^{13}\text{C}$  concentration and flux from soils in a cool-temperate coniferous forest using a tunable diode laser spectrometer, The 5th EAFES International Congress、龍谷大学瀬田キャンパス(滋賀県大津市) 2012.03.20  
TAKANASHI, S., NAKAI, Y., KITAMURA, K., WADA, R., TAKEMURA, M., OUCHI, M.,

NAKAYAMA, T., MATSUMI, Y., KURITA, N., FUJIYOSHI, Y., MURAMOTO, K., HIYAMA, T., INOUE, G., KODAMA, N., NAKANO, T., Temporal and spatial distribution of  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  isotopic compositions in a red-pine forest, Symposium on the use of new techniques to understand gas exchange and carbon dynamics in the forest ecosystem、京都大学(京都府京都市) 2010.11.01

WADA, R., TAKEMURA, M., OUCHI, M., NAKAYAMA, T., MATSUMI, Y., TAKANASHI, S., NAKAI, Y., KITAMURA, K., KURITA, N., FUJIYOSHI, Y., MURAMOTO, K., HIYAMA, T., INOUE, G., KODAMA, N., NAKANO, T., Real-time, continuous measurements of  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  isotopic compositions in the forest site at the foot of Mt. Fuji using laser absorption spectrometers, International Symposium on Environmental Monitoring in East Asia、金沢大学(石川県金沢市) 2010.09.28

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高梨 聡 (TAKANASHI, Satoru)

独) 森林総合研究所・気象環境研究領域・主任研究員

研究者番号: 90423011