

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 6 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24310017

研究課題名(和文) 酸素安定同位体連続観測と群落多層モデルを用いた森林生態系の呼吸・光合成の分離評価

研究課題名(英文) Separation of respiration and photosynthesis rates in forest ecosystems using continuous measurements of stable oxygen isotopic ratio and a multilayer canopy-micrometeorological model.

研究代表者

村山 昌平 (Murayama, Shohei)

独立行政法人産業技術総合研究所・環境管理技術研究部門・研究グループ長

研究者番号：30222433

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：赤外分光法によるCO₂安定同位体比連続観測システムの開発を行った。同位体測定に適した装置の基本構成を構築することができたが、長期高精度測定のためには、レーザ光源の改良が必要であることが示唆された。岐阜県高山市の冷温帯落葉広葉樹林において、¹⁸O観測に基づき、生長季の夜間の生態系呼吸に対する土壌呼吸の割合の季節変化を評価した。同位体過程を含む、群落多層モデルを開発し、大気中CO₂濃度分布に関して、データ同化を行い、林内の鉛直混合のパラメータの最適化を行った結果、¹⁸Oの分布について再現性を向上させることができた。データ同化により、呼吸と光合成の分離をより高度化できることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Development of a precise continuous measuring system of stable isotopic ratios of CO₂ has been made using an infrared spectroscopic technique. Although the fundamental structure of the system has been developed, it has been suggested that further improvement of the mid-infrared laser for the light source is necessary for the in-situ measurement. Using the ¹⁸O measurements at Takayama site, seasonal variation in the ratio of soil respiration to ecosystem respiration during the growing season was estimated. A multilayer canopy-micrometeorological model has been upgraded to include isotopic processes that determine the vertical profile of C¹⁸O in a forest canopy. By using observed CO₂ data to optimize a model parameter, we confirmed that the vertical profiles of ¹⁸O-CO₂ in the forest were reproduced well. Thus the multilayer canopy model with the assimilation of CO₂ data is a promising tool to quantify vertical profiles of photosynthesis and respiration rates in forest ecosystems.

研究分野：炭素循環、大気環境、気象学

キーワード：炭素循環 安定同位体 森林生態系 群落多層モデル レーザ分光

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化に対する陸上生物圏の応答の理解は不足しており、全球規模の陸上生物圏における炭素収支に関するモデル間の相互比較実験では、今世紀末に正味のCO₂吸収が増大するものから放出に転じるものまであり、不確実性が大きい状況にある (Heimann & Reichstein, 2008, Nature 451, 289)。この不確実性が、喫緊の課題であるCO₂濃度の将来予測の高精度化や植林等による効果的なCO₂削減技術の策定の障害となっている。各種陸域生態系における正味のCO₂吸収量が環境要因の変動に対してどのように応答するかをより正確に評価するには、植物の光合成によるCO₂吸収と土壌を含む呼吸によるCO₂放出は環境依存性が異なるため、正味の吸収量だけでなく、光合成、呼吸(土壌呼吸、地上部呼吸)それぞれについて環境要因との関係を明らかにする必要がある。各素過程のCO₂フローの定量的評価は、様々な手法で行われているが、現状では誤差が大きい状況である。

一方、これまでに呼吸と光合成、土壌呼吸と葉呼吸の各過程におけるC¹⁸O¹⁶Oの同位体分別の違いを利用した陸域生態系の炭素循環の各素過程の分離評価に関する研究が行われてきている。しかし、大気中CO₂の酸素同位体比($\delta^{18}O$)の変動には炭素循環と水循環が複雑に関係しており、降水イベント等の気象条件の短時間スケールの変動に伴って各過程の¹⁸Oの同位体分別も変化するため、高頻度の観測が必要である。近年、レーザ分光法による連続測定が可能になりつつあるが、観測現場において長期にわたり安定的に高精度測定が可能な装置を開発し、森林生態系において同位体連続観測を行い、群落多層モデルを用いた解析を行えば、生態系の炭素循環の各素過程の分離評価の精度が飛躍的に向上することが期待される。

2. 研究の目的

本研究では、酸素安定同位体の同位体分別が光合成と呼吸、土壌呼吸と葉呼吸で異なることを利用して、正味の大気-生態系間CO₂交換量(NEE)を光合成と生態系呼吸に、生態系呼吸を土壌呼吸と地上部呼吸に高精度に分離評価する手法を確立することを目的とする。短い時間スケールで変動する同位体分別を捉えることが従来の手法では困難なため、新たにCO₂同位体連続観測システムを開発し、森林生態系で観測を行う。観測結果と群落多層モデルの計算結果を比較して、モデルの各パラメータを最適化し、森林生態系の各CO₂フローの分離評価の高精度化をめざす。

3. 研究の方法

(1) CO₂同位体連続観測システムの開発

本研究では、レーザ分光法により、CO₂の同位体毎に吸収線波長が異なることを利用して同位体比を測定する装置の開発を進めた。市販の装置は近赤外の波長を利用しているもの

が多いが、当装置では高感度の測定が可能で、他の吸収線の干渉を受けにくいように、光源として中赤外分布帰還型(DFB)レーザを用いる。レーザ光の波長は光源部の温度や駆動電流を変えることにより、一定の範囲で変更可能である。レーザ光源から射出した光の一部は、光源強度の変動を監視するために参照検出器に入射する。残りの光は、多重反射セル内に入射し、セル内の試料ガス中のCO₂の各同位体により吸収され、減衰した中赤外光の光量を試料検出器により測定し、各同位体成分濃度を算出し、同位体比を求める。セル内の圧力及び温度を高精度に制御して、高精度化を図る。

(2) 高山森林サイトにおける現場観測

大気中CO₂の $\delta^{18}O$ は炭素循環、水循環が複雑に関係して決定される。一般に土壌呼吸により大気中CO₂の $\delta^{18}O$ は下げられ、光合成が活発な時には上昇する。また、一般に葉から呼吸で放出されるCO₂の $\delta^{18}O$ は土壌から放出されるものより高い値を示す。このように呼吸と光合成、土壌呼吸と葉呼吸でC¹⁸O¹⁶Oの同位体分別効果が異なるため、 $\delta^{18}O$ 測定を利用して分離が可能となる。本研究では、岐阜県高山市の冷温帯落葉広葉樹林観測サイト(高山森林サイト)において、森林上におけるフラックス観測、森林内外のCO₂濃度、気象要素の連続観測を実施するとともに、複雑な系の¹⁸Oの収支を捉えるために、大気・土壌空気中CO₂、土壌水、水蒸気等の $\delta^{18}O$ の観測を行う。なお、CO₂同位体連続観測システムについて、十分な測定精度が得られなかったため、本報告では、フラスコサンプリング法等で得られた試料を質量分析計により、分析した結果を解析に用いた。

(3) 群落多層モデルを用いたシミュレーション

群落多層モデルMINCER (Watanabe et al., 2004, Global Change Biol., 10, 963)に、同位体分別過程を組み込み、大気-森林間のCO₂、C¹⁸O¹⁶Oフラックスや森林各層の大気中のCO₂濃度及び $\delta^{18}O$ の高度-時間変動のシミュレーションを行う。当モデルでは、森林内外の各層における物理・生物過程が考慮されて各層の熱、水フラックス及び光合成によるCO₂吸収や呼吸によるCO₂放出が計算され、気象要素やCO₂濃度及び $\delta^{18}O$ 等の鉛直分布が求められる。

ここで、大気中の水蒸気同位体比については、現地で観測された平均的な値を時間や高度によらず一定として与える。その上で、森林各層における葉内蒸散サイトにおける液体水の $\delta^{18}O$ を、多層モデル内で求められる蒸散速度とクレイグ・ゴードンの式に基づいて、時間・高度別(さらに樹種及び陽葉・陰葉別)に計算する。

一方、CO₂の同位体分別についてはより詳細に取り扱う。まず、葉面における分別過程に対しては、葉内水とそれに溶存する液相のCO₂が常に同位体平衡の状態にあるとし、細胞表面での気相-液相間の相変化に伴う平衡分別

と、気孔空隙内と葉面境界層における拡散に伴う動的分別を考慮する。また、土壌呼吸については、土壌水と同位体的に平衡となったCO₂が、地上へ到達するまでの土壌空隙内での拡散による分別を受けるとしてモデル化する。樹木の地上非同化部による呼吸にも土壌呼吸と同様なモデルを適用する。こうした各層別の分別過程に加え、群落大気内の乱流による上下方向への輸送過程（鉛直混合）を多層モデルで再現することにより、大気CO₂のδ¹⁸Oの高度分布を計算する。

高山サイトへの多層モデルの適用に際しては、現地の森林構造、光合成特性、土壌の呼吸特性などの重要なモデルパラメータはチューニングせず、できる限り現地での実測に基づく値や経験式及びそれらの季節変化を与え、実測値がないパラメータについてはモデル内であらかじめ設定してある値（落葉広葉樹に対するデフォルト値）を用いる。具体的には、森林構造は Ohtsuka et al. (2005, Agric. For. Met., 134, 27) 及び Nasahara et al. (2008, Agric. For. Met., 148, 1136) を、個葉の光合成特性は Muraoka (2010, J. Plant. Res., 123, 563) を、土壌呼吸は Mo et al. (2005, Agric. For. Met., 134, 81) をそれぞれ参照してパラメータを同定する。同サイトのフラックス観測タワーにおいて観測された森林上の気象要素の1時間平均値を境界条件として多層モデルに入力し、2003~2009年の7年間のシミュレーションを実施する。このとき、大気中のδ¹⁸O-CO₂の実測値がある期間は、それらを1時間毎に内挿した値を用い、実測が行われていない期間はモデル上端でδ¹⁸O = 0 ‰ (VPDB-CO₂) とする。

4. 研究成果

(1) CO₂同位体連続観測システムの開発

当初、使用したレーザー光源について、駆動電流変化に対して耐久性が低いことが明らかになったため、耐久性が改良された中赤外DFBレーザーに交換し、レーザーの仕様に合わせて光学系の改造を行った。改造した装置を用いて、同位体組成が異なるCO₂標準ガスを装置に導入して、レーザー光源の温度と駆動電流を変えることにより波長を変更し、CO₂の各同位体の吸収スペクトルのデータを取得することができた。図1にその結果を示す。吸収線に関するHITRANデータベースと比較し、各吸収線の同定を行い、同位体測定に適した吸収線の候補を挙げることができた。また、同位体比の定量化のために、濃度の異なる標準ガスを導入し、吸収による減衰の程度を調べた。これらにより、同位体測定に適した装置の基本構成を構築することができたが、使用した光源の出力が弱く、高精度の測定のために必要な感度を得るためには、さらに高出力のレーザー光源が必要であることが明らかになった。また、測定に必要とする波長を得るためにレーザーの使用温度を40~50℃に設定する必要がある、高速に各同位体の吸収線波長に変更して

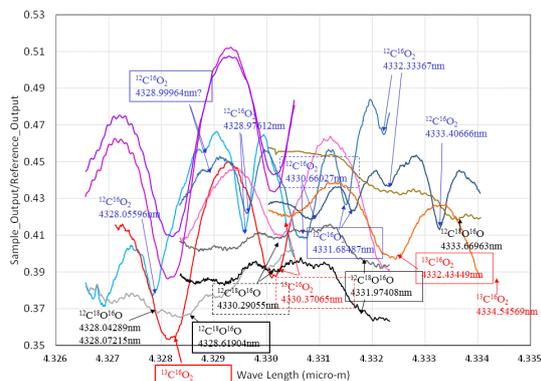


図1. 本研究で開発した装置で得られたCO₂の吸収線スペクトルの分布。同種の四角（太線、破線、実線）で囲んだ吸収線は、測定に適した波長組み合わせの候補を示す。

データを得ようとする、レーザー光源の長期的な耐久性を維持するのが困難であることが示唆された。以上から、高精度の同位体連続観測のためには、中赤外DFBレーザーのさらなる改良が必要であることが分かった。

(2) 高山森林サイトにおける現場観測

本研究では、土壌呼吸(R_s)、葉呼吸(R_l)、生態系呼吸(R_e)のCO₂のδ¹⁸O(それぞれ、δ_s、δ_l、δ_e)が異なることを利用して、CO₂とδ¹⁸O-CO₂の収支を解き、Bowling et al. (2003, Global Biogeochem. Cycles, 17, 1124) に従い、

$$R_s/R_e = (\delta_l - \delta_e)/(\delta_l - \delta_s), \quad (1)$$

から、着葉期間における夜間のR_s/R_eの季節的変動を推定した。但し、ここでは、R_s、R_l以外のR_eに占める割合は、十分小さいものと仮定した。δ_s、δ_l、δ_eを推定するために、現場の観測データを用いた。δ_sについては、観測された地中10cm空気のδ¹⁸O-CO₂に、拡散による分別の影響を付加して求めた。なお、地中各深度のCO₂は、同深度の水と同位体平衡になっていることが観測で確かめられた。δ_lについては、葉内水と平衡になったCO₂が気孔-大気間の拡散による分別の影響を受けるものとして求めた。葉内水のδ¹⁸Oは、土壌水、水蒸気のδ¹⁸O、および相対湿度の観測値をクレイグ・ゴードンの式に代入して推定した。夜間に葉を採取して葉内水を抽出し、そのδ¹⁸Oを実測したが、クレイグ・ゴードン式による

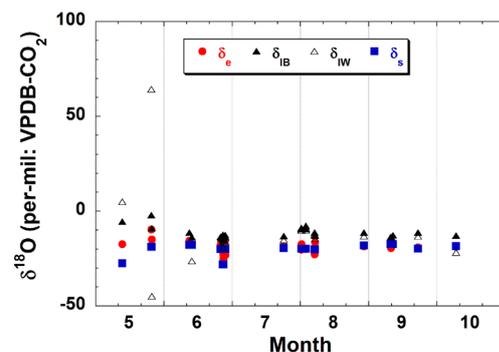


図2. 観測から推定された着葉期の夜間の生態系呼吸(δ_e)、葉呼吸(Bowling et al. による手法(δ_{lB})、Wingate et al. による手法(δ_{lW})および土壌呼吸(δ_s)のδ¹⁸O-CO₂の変動。

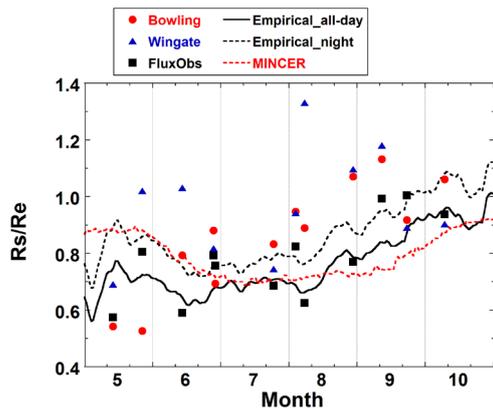


図3. $\delta^{18}\text{O}$ 観測から推定された着葉期の夜間の R_s/R_n の変動。図2に示された2つの手法で推定された δ_1 に基づく結果がそれぞれ示されている。また、直近のフラックス観測、経験式および MINCER のシミュレーションに基づく推定結果(本文参照)も比較のために示されている。

推定値と概ね一致しているのを確認した。気孔-大気間の拡散による分別については、Bowling et al. による、気孔から大気への一方方向の拡散分別のみ考慮した手法と、Wingate et al. (2010, *Global Change Biol.*, 16, 3048) による気孔内外の分圧差を考慮した手法で見積もった。 δ_e は、夜間の大気中の CO_2 濃度および $\delta^{18}\text{O}-\text{CO}_2$ の変動は、 R_e のみにより決定されていると仮定し、大気中 CO_2 濃度および $\delta^{18}\text{O}-\text{CO}_2$ の観測データを用いて、Keeling Plot (Keeling, 1958, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 13, 299) により推定した。このようにして得られた結果を、図2に示す。Wingate et al. の手法に基づく δ_1 のばらつきがやや大きいのが、概ね、 $\delta_5 < \delta_e < \delta_1$ の順になっており、夏の後半以降は、 δ_e は δ_5 に近づいている。

図3に、図2の結果を式(1)に代入して求めた、夜間の R_s/R_n の季節変動を示す。図には、直近に観測された渦相関法による夜間の NEE 値から得られた R_e と土壌チャンパー観測による R_s の比較から求めた両者の比 (FluxObs)、鉛直混合が活発に起こっていると考えられる夜間の NEE データと気温との関係から推定される R_e の経験式と土壌チャンパー観測から得られた R_s と地中 10cm 温度との関係から推定される R_s の経験式から求められる両者の比 (Empirical: 全日平均と夜間平均)、および MINCER のシミュレーション結果から得られた夜間の R_s/R_n の変動の推定結果も示している。 $\delta^{18}\text{O}$ の観測に基づく R_s/R_n の推定値は、ばらつきが大きく、1を超える場合も見られるが、全般的には各手法で、春から秋にかけて R_s/R_n が増加していく傾向が見られる。5~6月に値が低いのは、この時期が展葉期にあたり、葉の構成呼吸が活発であるため、相対的に R_s/R_n が低くなっていると推察される。その後の R_s/R_n の増加は、地温の最高出現期が気温よりも遅く、初秋においても土壌呼吸が活発であることを示唆している。Wingate et al. の手法による推定が特にばらつきが大きいのは、 δ_1 の推定値が、気孔内外の CO_2 濃度差が小さい時に発散するためであり、今後、推定方法

の改良が必要である。また、 δ_e の推定において、短時間スケールの変動を十分に捉えられていない、あるいは、森林外の影響を受けたデータが解析に含まれている等の可能性があり、今後早急に同位体連続観測システムを高精度化し、現場観測に適用することにより、これらの問題が解決することが期待される。

(3) 多層モデルの高山サイトへの適用結果

① 群落-大気間のフラックス

モデルによって計算された、森林群落-大気間の CO_2 フラックスの日平均値 (NEE) を、渦相関法による実測値と合わせて図4に示す。モデルは実測値の季節変化を概ね再現できている。図には2006年、2007年の例だけを示したが、他の年についても同等な結果が得られることを確認している。ただし、図に示した両年とも、春季に NEE の実測値が正の大きな値を示す期間 (DOY=120~150) があるが、モデル

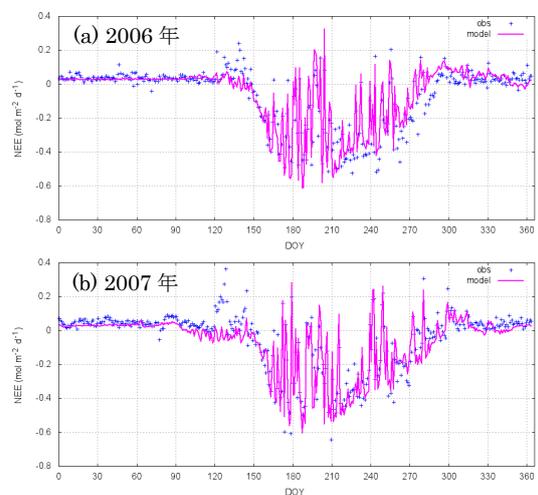


図4. 群落-大気間における CO_2 フラックス日平均値

(NEE) の年変化。(点: 実測値、線: モデル計算値)

はそれを再現していない。この期間は、森林の樹冠を構成する樹木が展葉する期間に対応することから、実測された NEE には樹木が葉を展開するために行う構成呼吸が大きな寄与を持つものと考えられる (例えば Ito et al, 2005, *Agric. For. Met.*, 134, 122)。しかし、本研究のモデルには、現時点では構成呼吸は考慮されていないため、図のような差異が生じる。また、2006年の生長期の後半部 (図4aの DOY>200) において、モデルによる NEE の大きさが実測より早く減少してしまう。これは、光合成特性や葉面積の季節進行が、モデルの中で実際よりも早く進んでしまったことによるものである。2007年 (図4b) にはそのような問題は生じなかった。以上より、展葉・落葉や光合成パラメータの季節変化などの生物季節とそれに伴う構成呼吸を適切にモデルで再現するか、または外から適切に与えることができれば、本モデルによって CO_2 フラックスの季節変化はほぼ再現されると言える。

一方、群落の熱収支を構成する顕熱や潜熱のフラックスについては、実測値の方に渦相関法に起因する「熱収支不均衡」の問題がある (図は省略)。モデルは常に熱収支を満たす

フラックスを算出するが、実測値は多くの場合においてモデル値より絶対値が小さい。にもかかわらず、同じ手法で測定されている CO_2 フラックスについては、上述の通りモデルと実測の結果がほぼ一致する。同様なことは、これまでに本モデルを適用した経験のある他のサイトにおいても起きているため、高山サイト特有の傾向とは考えにくい。顕熱・潜熱フラックスが正確に測定できない手法で CO_2 フラックスは正確に測定できているのだろうか？何故そのような傾向が生じるのか？こうした、渦相関法によるフラックス実測値の不確かさを低減するための研究を今後も継続して進めることが必要である。

② CO_2 濃度と $\delta^{18}\text{O}-\text{CO}_2$ の時間・高度変化

以下では、同位体比の実測値がある期間を対象として、実測された CO_2 濃度や同位体比の時間・高度分布とモデルによる計算結果との対応について述べる。

図5は、モデルに何ら手を加えることなく、良好な対応が見られた日の例である。 CO_2 濃度は、常に群落下層で高く群落上で低い状態を保ちながら日変化している。また、 $\delta^{18}\text{O}-\text{CO}_2$ は、夜間に低く日中に高くなる日変化を示すと同時に、夜間には群落上から群落下層に向かって単調に低下するのに対し、日中には群落上層で一旦増加した後には低下するという、高度分布形の日変動も示す。モデルはこうした時間・高度変化を概ね再現している。 $\delta^{18}\text{O}-\text{CO}_2$ の高度分布形が日変動を示すのは、日中には、蒸散にともない葉内水分の同位体濃縮が生じるため、光合成によって葉に吸収される CO_2 フラックスの同位体比が相対的に低下し、樹冠付近の大気に $\delta^{18}\text{O}$ の高い CO_2 が残されるためである。したがって、 CO_2 濃度だけでなくその同位体比の高度分布もモデルで良好に再現されている図5のような場合には、モデル内で計算されている光合成や呼吸の時間・高度変化も現実と整合的に再現されていると考えられる。

一方、図6は実測とモデルの対応が良くない典型的な例である。日変化の変動パターンは、モデル上端に与える境界条件で規定されるため、実測から大きくかけ離れることはないが、高度方向への変化幅が夜間に大き過ぎ、日中に小さ過ぎる傾向が、 CO_2 濃度と同位体比の両方に見られる。高度分布の違いをより明瞭に示すため、3時間毎の CO_2 濃度の高度分布を図示したものが図7である。特に夜間の高度分布において、群落下層の CO_2 濃度のモデル計算値が非常に高くなっており、実測との間に大きなズレが生じていることがわかる。

その原因として最も有力な要因は、多層モデルで用いている鉛直混合パラメタリゼーションの不適正さである。乱流による鉛直混合のパラメタリゼーションは、現行では勾配-拡散型の渦拡散モデルによっているが、このモデルは、群落内の乱流による輸送現象を表現するには最適ではないことが指摘されている (Shaw, 1977, J. Appl. Met., 16, 514)。群

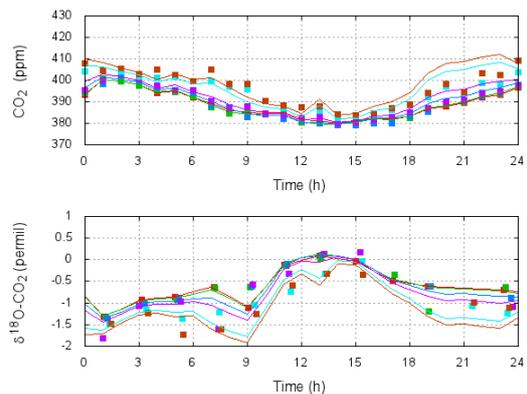


図5. 群落内外の6高度における CO_2 濃度 (上) と $\delta^{18}\text{O}-\text{CO}_2$ (下) の日変化。モデルと実測の整合性が比較的良好な日 (2006/06/27) の例。点：実測値、線：モデル計算値、色：高度 (■：27m、■：18m、■：8.8m、■：5.8m、■：2m、■：1.3m)

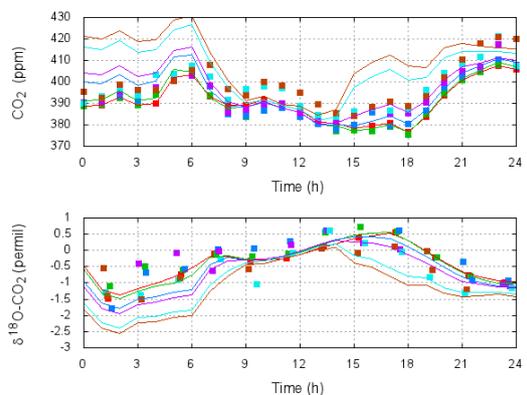


図6. 図5と同様。ただし、モデルの再現性がよくなかった日 (2006/08/06) の例。

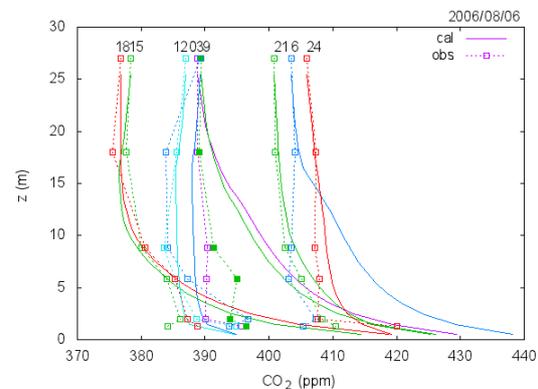


図7. 図6と同日の3時間毎の CO_2 濃度の高度分布。(点：実測値、線：モデル計算値、数字：時刻)

落内における熱的成層の影響についても適切な表現が難しい。また、その他の要因として、高山サイトの地形の複雑さに起因する水平移流の効果が考えられる。特に夜間には、群落高以下の範囲で冷気流が生じ、土壌呼吸などによって群落内に放出される CO_2 がサイト外へ流下している可能性がある。(ただし、いずれの要因が実際に卓越しているかについては、客観的に判断する材料を欠くため議論できない。)

鉛直混合のより高度なパラメタリゼーションとして、例えば、平均気温や平均濃度等の1次統計量の他に各種フラックスに対応する2次相関量の診断方程式を合わせて解く方法

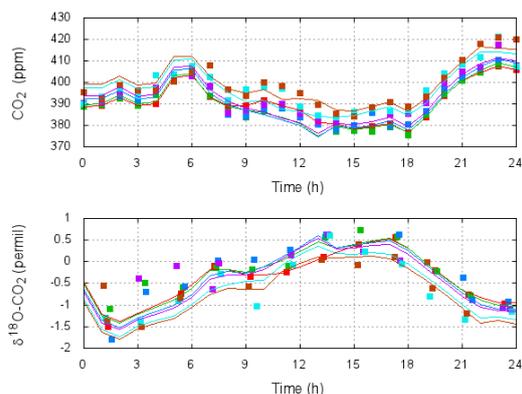


図8. 群落内のCO₂濃度が実測と合うように渦拡散係数を調整して得られた、CO₂濃度とδ¹⁸O-CO₂の日変化。図6と同じ日(2006/08/06)の例。点:実測値、線:モデル計算値、色:高度(図5と同様)

(2次クロージャモデル)を用いることがある。本研究でも、実際にその計算コードを開発し、従来の勾配-拡散モデルとの比較を行った。その結果、2次クロージャモデルによって再現されるスカラー量(CO₂濃度など)の高度分布は、従来モデルに比べて鉛直方向の勾配が小さくなり、地表付近にのみ大きな高度変化が集中する形になった(図省略)。したがって、2次クロージャモデルを用いれば、図7に示したモデル計算値は実測の高度分布の形に近づくことが考えられる。

しかし、実際に観測が行われている高山サイトは、周囲の地形が複雑であり、水平一様性の仮定に立脚したモデルには限界があると思われる。そこで、本研究では、水平移流を含むすべての誤差要因を鉛直混合パラメータの不確かさの中に吸収させることで、再現性の向上を試みた。具体的には、各時刻においてモデル内で計算される渦拡散係数を0.1倍から3倍の範囲で変化させ、計算されるCO₂濃度と実測値との差が最も小さくなるように調整した。いわば試行錯誤的なデータ同化によるパラメータの最適化を行ったことになる。その結果を図8に示す。CO₂濃度が実測と整合するように渦拡散係数を調整することで、同位体比の再現性が(少なくとも未明から早朝までの時間帯を除けば)向上したことがわかる。つまり、図6においてモデルと実測との間にズレを生じさせていた原因は特定することができない場合でも、群落内におけるCO₂濃度の時間・高度分布の実測値があれば、それらとモデルの計算値を合わせるようにモデルのパラメータをチューニングすることにより、現実の群落内の大気状態をある程度まで再現することができる。

したがって、今後の研究展開として、群落内外におけるCO₂濃度の実測データをモデルに同化することにより、同位体比の高度分布を再現する方法が有望である。さらに、同位体比の再現性が良くない場合については、同位体比の実測データをもモデルに同化することにより、土壌及び群落各層における呼吸と光合成の分離をより高度化することが可能であると示唆される。

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計5件)

- ① Ishidoya, S., S. Murayama, H. Kondo 他3名, 1番目, Observation of O₂:CO₂ exchange ratio for net turbulent fluxes and its application to forest carbon cycles, 査読有, Ecological Research, (2015) 30, 225-234, 10.1007/s11284-014-1241-3.
- ② Mizoguchi, Y., T. Watanabe 他4名, 4番目, A practical model to estimate photosynthetically active radiation using general meteorological elements in a temperate humid area and comparison among models, 査読有, Theoretical and Applied Climatology, (2014) 115, 583-589, 10.1007/s00704-013-0912-2.

〔学会発表〕(計19件)

- ① 村山昌平, 酸素同位体観測により推定された飛騨高山冷温帯落葉広葉樹林サイトにおける夜間の生態系呼吸に対する土壌呼吸の割合の季節変動, 日本地球惑星科学連合2015年大会, 幕張メッセ(千葉市), 2015/5/25.
- ② Watanabe, T., A process-based multilayer ecosystem model for comprehensive understanding of ecosystem function and its feedback to climate, Synthesis Workshop on the Carbon Budget and Forest Ecosystem in the Asian Monitoring Network, 飛騨・世界生活文化センター(高山市), 2013/10/24.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村山 昌平 (MURAYAMA, Shohei)
独立行政法人産業技術総合研究所・環境管理技術研究部門・研究グループ長
研究者番号: 30222433

(2) 研究分担者

松枝 秀和 (MATSUEDA, Hidekazu)
気象研究所・海洋・地球化学研究部・室長
研究者番号: 60354552
渡辺 力 (WATANABE, Tsutomu)
北海道大学・低温科学研究所・教授
研究者番号: 60353918
坪井 一寛 (TSUBOI, Kazuhiro)
気象研究所・海洋・地球化学研究部・主任研究官
研究者番号: 10553167
石戸谷 重之 (ISHIDOYA, Shigeyuki)
独立行政法人産業技術総合研究所・環境管理技術研究部門・主任研究員
研究者番号: 70374907

(3) 連携研究者

近藤 裕昭 (KONDO, Hiroaki)
独立行政法人産業技術総合研究所・環境管理技術研究部門・副研究部門長
研究者番号: 60357051