

令和 4 年 8 月 26 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06156

研究課題名(和文) 樹木内部の水・炭素輸送と樹木成長の季節・環境応答特性の解明

研究課題名(英文) Water and carbon transport within trees and seasonal and environmental response characteristics of tree growth

研究代表者

高梨 聡 (Takanashi, Satoru)

国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等

研究者番号：90423011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：樹木の成長・衰退過程と樹木内部の炭素・水動態との関係を明らかにするために、様々な環境条件下における、いくつかの樹木について<sup>13</sup>C<sup>18</sup>O<sub>2</sub>パルスラベリング実験を行い、樹体内炭素輸送速度の季節変化および環境応答特性等を明らかにした。  
<sup>13</sup>C<sup>18</sup>O<sub>2</sub>パルスラベリング実験により、炭素輸送速度はおおむね針葉樹で遅く、広葉樹で速いという結果が得られ、研究事例の少ない萌芽更新時の炭素輸送・貯留特性が明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

<sup>13</sup>C<sup>18</sup>O<sub>2</sub>パルスラベリング実験により、炭素輸送速度はおおむね針葉樹で遅く、広葉樹で速いという結果が得られる一方で、樹木の成長段階や季節・環境条件により、様々なパターンの炭素輸送・貯留特性があることが明らかとなった。本研究により得られた炭素輸送特性を樹木成長モデルに組み込むことによって、森林炭素動態モデルの精緻化に寄与できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the relationship between the growth and decline processes of trees and the carbon and water dynamics within trees, <sup>13</sup>C<sup>18</sup>O<sub>2</sub> pulse labeling experiments were conducted on several trees to clarify the seasonal changes in the carbon transport rate within trees and their environmental response characteristics.  
The <sup>13</sup>C<sup>18</sup>O<sub>2</sub> pulse labeling experiments revealed that the carbon transport rate was generally slower in conifers and faster in hardwoods, and that the carbon transport and sequestration characteristics were clarified during regeneration, which have not been studied extensively.

研究分野：生物環境物理学

キーワード：炭素動態 パルスラベリング 樹液流 光合成 炭素貯留

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

将来の気候変動に対して、森林が持つ二酸化炭素吸収能や蒸発散作用による気候緩和機能が期待されている。世界規模の観測ネットワーク(FLUXNET, LTER 等)によって長期観測データが蓄積され、同じサイトでの複数手法による統合的炭素・水循環観測も進んできている。また一方で、個葉レベルでの光合成で炭素を取り込む過程についても、非常に多くの研究がある。しかしながら、光合成で取り込まれた後に展葉や発芽・発根、開花・結実、伸長・肥大成長等にもどのように利用され、どのようにストレスや攪乱に対応しているのかという樹体内炭素の動態に関しては不明な部分が多い。光合成後の炭素の追跡には、炭素安定同位体を用いた炭素アロケーション研究が有効であり、ポットサイズや枝レベルでの研究が過去数十年間で行われてきた。ここ数年で、野外実験が行われてきているが、森林炭素循環を考える上で炭素貯留プロセスが未知であり鍵となっている樹木成木を用いた実験は未だ少なく、光合成産物がどれだけ糖などとして蓄えられ、その後、木部の形成に使用され、呼吸のエネルギーとなっているのか？その季節変動や環境応答特性はどのようになっているのか？詳細な樹木内炭素動態の種間差や樹齢、個体サイズ、環境条件による影響を評価しきれていない。(Epron et al. 2012 Tree Phys.)

### 2. 研究の目的

森林の炭素循環過程は様々な気候帯で調べられて来ているものの、土地利用改変や攪乱からの回復過程については、メカニズムに基づいた定量的な理解が進んでいるとは言い難い。本研究では、森林における炭素循環過程のうち、未解明の部分の多い樹木内部の炭素・水動態について明らかにするとともに、樹体内炭素・水動態モデルを新規開発し、季節変動および不意の枝葉脱落、ギャップの形成など急激な周辺環境の変化等に対して、どのように樹木が拡大成長・回復するのかメカニズムに基づく定量的な解明を目指す。上記目的を達成するために、レーザー分光二酸化炭素安定同位体分析計と呼吸量測定チャンバーを組み合わせた  $^{13}\text{CO}_2$  ラベリング解析システムを開発する。このシステムを用いて、様々な樹木・環境変動下において、野外高頻度パルスラベリング実験を行い、詳細な樹体内炭素動態(移動速度・滞留時間)および水動態データを取得し、新規モデルの検証材料とする。

### 3. 研究の方法

樹木の成長・衰退過程と樹木内部の炭素・水動態との関係を明らかにするために、様々な環境下に置かれたいくつかの樹木について  $^{13}\text{CO}_2$  パルスラベリング実験を行い、樹体内炭素輸送速度の季節変化および環境応答特性を明らかにする。

ラベリング実験では、透明なチャンバーによって、樹冠を覆い、その中に  $^{13}\text{CO}_2$  を注入することによって、自然界より高濃度の  $^{13}\text{C}$  を植物体内に取り込ませる。その後、取り込まれた炭素は師液流となり、幹内を通過し、根等に配分される。配分された炭素は呼吸作用によってふたたび  $\text{CO}_2$  となり、大気に放出されるため、この放出される  $^{13}\text{CO}_2$  を観測すれば、炭素到達時間が分かり、その移動距離で除する事によって炭素輸送速度を求めることができる。 $^{13}\text{CO}_2$  濃度についてはレーザー分光二酸化炭素安定同位体分析計(G2101i, Picarro Inc.)を用いることにより、連続的に測定できるため、これと樹体各所に取り付けた呼吸量を測定できるチャンバーと電磁弁を用いた自動切り替え装置等によりチャンバー内の  $^{13}\text{CO}_2$  濃度を順次測定し、炭素輸送速度などを求める。

### 4. 研究成果

#### (1) 群落 $\text{CO}_2$ フラックスとコナラの肥大成長特性

樹木の成長・衰退過程と樹木内部の炭素・水動態との関係を明らかにするために、微気象条件等の環境条件を観測し、二酸化炭素吸収量や蒸散量の観測を行い炭素・水動態を把握するとともに、樹木の葉や幹・根などの各部成長量を定量化する必要がある。幹の肥大成長量に関しては、細胞数の増加と水分の多寡による膨張・収縮とで構成されるため、幹への炭素・水の貯留を考える際にはこれらを分離しなければならない。そこで、観測タワーを用いて、山城水文試験地(京都府木津川市)において微気象・フラックス観測を行うとともに、センサー等を用いて樹木フェノロジーの連続観測を行い、幹肥大量の日変動、季節変動特性を定量的に観測したほか、森林群落レベルでの炭素吸収特性の季節変動を抽出した。樹木の形態的季節変化を捉えるために透過光量子量を観測することによって森林全体の葉面積指数の季節変動特性を観測した。観測の結果、群落飽和光合成量は、葉量増加の開始とともに徐々に増加し、夏場の高温期に減少するもの

の9月ごろに回復し、その後、落葉期に向けて徐々に減少していた。また、自記式のデンドロメータによって、コナラの肥大成長観測を行い、幹部の周囲長や直径を連続測定し、幹内の水分量の変動に応じた幹周囲長の日内変動および成長量に応じた季節変動を捉えることができた(図1)。地下部の成長量に関しては、イメージスキャナーを用いた計測を試みたところ、1日に数ミリメートル程度伸長する様子や木化していく様子をとらえることができた。

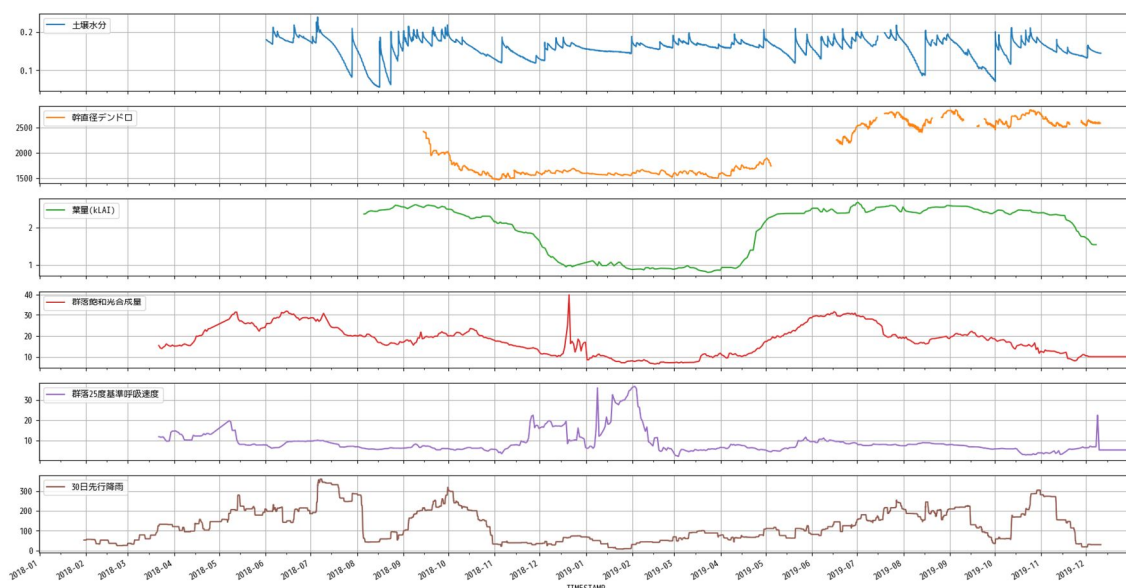


図1 山城水文試験地における土壌水分、コナラの直径変動、葉量、群落飽和光合成量、群落25度基準呼吸速度、30日先行降雨

## (2) ヒノキ成木での短い周期でのパルスラベリング実験

樹木内部の炭素移動速度の変化を非破壊的に測定するために、京都大学桐生水文試験地において、樹木(ヒノキ)を対象に9月下旬より7日間隔で $^{13}\text{CO}_2$ パルスラベリング実験を試みた。パルスラベリング実験では、ビニール製チャンバーを作製し、樹冠全体を覆い、そこに $^{13}\text{CO}_2$ (99%)ガスを注入し、2時間前後光合成行わせることで、 $^{13}\text{C}$ により標識した。光合成により取り込まれたパルスラベリング後の $^{13}\text{C}$ は、主に篩液として樹冠部から幹に達し、呼吸作用により $^{13}\text{CO}_2$ となるため、これをレーザー分光二酸化炭素安定同位体分析計で検出することにより、到達時間を算出することができる。また、この炭素到達時間を樹幹部からの距離で除することにより、移動速度を算出することができる。幹の複数個所に取り付けたチャンバーにより、吸収された $^{13}\text{CO}_2$ が幹上部から順に放出される様子が観測され、上部であるほど早い移動速度が算出された(図2)。また、降雨後には流下速度が上昇する傾向がみられた(晴天時:約0.033m/hr、雨天時:約0.19m/hr)。このパルスラベリングを複数回行うことにより、様々な環境条件における樹体内炭素移動速度の変化を知ることができると考えられる。しかしながら、幹下部ではその放出パターンがパルス状ではなく、比較的一様に放出されていた。これらのことから、樹木のスケールに対して、7日の間隔では短すぎて、前回の実験において貯留された炭素とその次の実験で吸収された炭素との分離は難しいと考えられた。

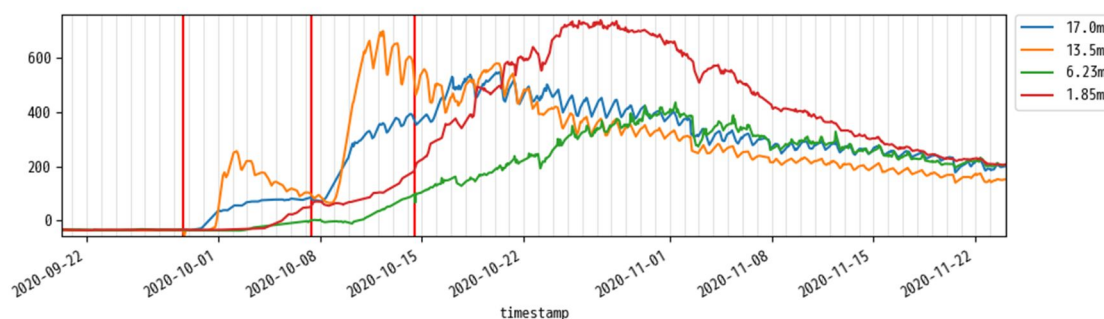


図2 幹チャンバー(4高度)から放出された $^{13}\text{CO}_2$ 濃度(%)の時間変化:赤縦線の時刻(3回)にラベリングを行っており、 $^{13}\text{C}$ で標識された $\text{CO}_2$ がタイムラグを生じつつ幹上部から順に放出されていることが

観測された。

### (3) コナラの萌芽枝による炭素輸送特性

森林の炭素循環過程は様々な気候帯で調べられて来ているものの、土地利用改変や攪乱からの回復過程については、メカニズムに基づいた定量的な理解が進んでいるとは言い難い。そこで、コナラとヒノキに対して幹切断の強度攪乱実験を行い、その炭素輸送特性の変化について解析を行った。

実験対象のコナラは直径約 0.1m、樹高約 10m であり、3月に高さ 1m の位置で切断し、萌芽後の展葉・落葉パターン等について調査した。コナラは4月中旬に萌芽し始め、約 30本の枝が伸長した。11月初旬から葉は色づき始め、12月初旬には葉は完全に枯れた。その後、一か月ほどで落葉し、翌年4月初旬には展葉・伸長し始めた。この展葉・落葉は切断していない成木とほぼ同様のパターンであった。2年目の枝は、萌芽枝頂部から発生し、どの個体でも1年目の萌芽枝に比べてやや大きく伸長した(図3)。

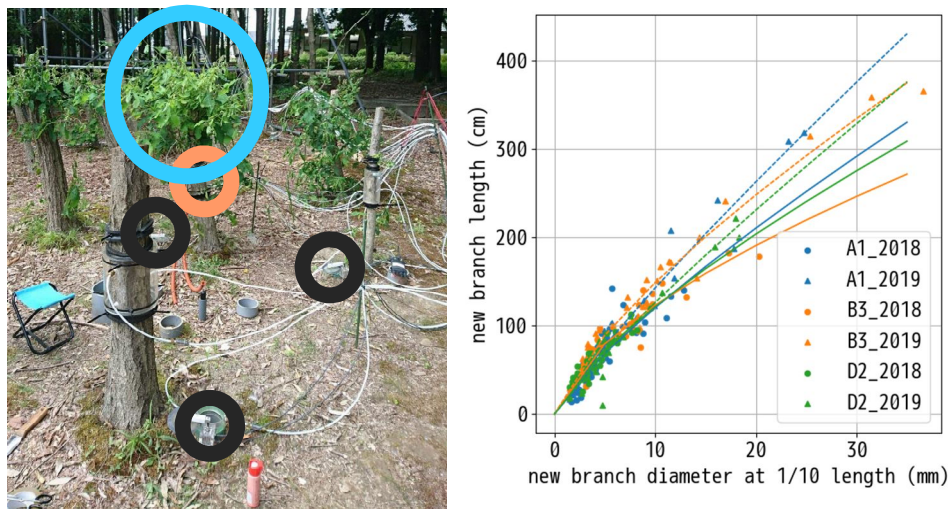


図3 対象となる萌芽更新したコナラ(水色円)および萌芽枝の肥大伸長特性

幹切断年の11月に $^{13}\text{CO}_2$ を用いたラベリング実験を行った。萌芽枝で吸収した炭素は速やかに幹に到達していた(ラベリング中に $^{13}\text{C}$ は幹には到達していたため、到達速度の測定は不可であった)。この秋季に獲得した炭素を翌年の1月ごろまでは幹において呼吸として消費するものの、冬季にはほとんど消費せず、4月初旬ごろから再び呼吸として消費していることなどを観測した。根からもラベリングされた炭素放出が観測されており(根への到達速度: 約 0.1m/hr)、萌芽1年目においても、根への炭素供給能力を十分に持っていると考えられた(図4)。

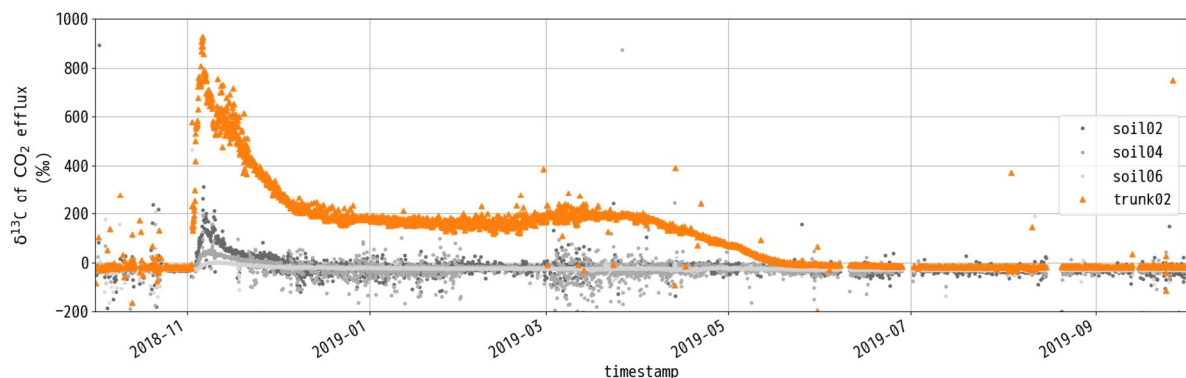


図3 萌芽更新したコナラの $^{13}\text{CO}_2$ ラベリング実験後に幹および根から放出された $^{13}\text{CO}_2$ 濃度

11月に樹幹部を覆って $^{13}\text{CO}_2$ 標識した後、幹チャンバー(橙色)および土壌面チャンバー(灰色)により測定された $^{13}\text{CO}_2$ 濃度を示す。秋季に固定された炭素は、翌年春まで持ち越されるものの、初夏までには消費され、夏季には、ほぼ呼吸基質として残存していない。また、標識された炭素は速やかに地下部にも到達しており、1年目の萌芽枝においても地下部への光合成産物供給能力を持っていた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tsuji Chiaki, Dannoura Masako, Desalme Dorine, Angeli Nicolas, Takanashi Satoru, Kominami Yuji, Epron Daniel	4. 巻 42
2. 論文標題 Drought affects the fate of non-structural carbohydrates in hinoki cypress	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Tree Physiology	6. 最初と最後の頁 784 ~ 796
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/treephys/tpab135	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高梨聡、安宅未央子、檀浦正子、Schaefer, Holger
2. 発表標題 コナラの炭素輸送と成長特性
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wang, S., Kobayashi, K., Dannoura, M., Takanashi, S., Kitayama, K., Onoda, Y., Kominami, Y.
2. 発表標題 Seasonal dynamics of carbon allocation between different organs in Phyllostachys edulis (Moso bamboo) forests
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会講演要旨集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高梨聡、安宅未央子、檀浦正子
2. 発表標題 コナラの萌芽更新時における炭素動態
3. 学会等名 第131回日本森林学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林慧人、檀浦正子、高梨聡、小南裕志、北山兼弘、小野田雄介
2. 発表標題 13Cパルスラベリング手法を用いたモウソウチクの炭素輸送過程の追跡
3. 学会等名 第131回日本森林学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 檀浦正子、高梨聡、小杉緑子、Epron, Daniel、田邊智子、Wang, Shitephen、藤井黎
2. 発表標題 13Cパルスラベリングを用いたヒノキの師部輸送の日変動
3. 学会等名 第133回日本森林学会大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	安宅 未央子  (Ataka Mioko)		
研究協力者	檀浦 正子  (Dannoura Masako)  (90444570)	京都大学・農学研究科・准教授   (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------