

開放系大気 CO<sub>2</sub>増加(FACE)施設で育成したシラカンバの細根動態

北海道大学大学院農学院  
北海道大学北方生物圏フィールド科学センター  
北海道大学大学院農学院  
北海道大学大学院農学研究院  
北海道大学大学院農学院  
北海道大学大学院農学研究院

伊藤 寛剛  
中路 達郎  
王 暁娜  
渡辺 誠  
原 悠子  
小池 孝良

## はじめに

近年、大気中 CO<sub>2</sub>濃度の上昇が続き、植物の生産環境が変化している。森林は陸上生態系における主要な炭素貯留源であるため、将来の陸域における炭素循環を評価・予測する上で、大気中 CO<sub>2</sub>濃度の上昇に対する森林樹木の応答解明が求められている。

森林生態系において、純一次生産の約3割は細根(一般に直径2mm以下の根)の生産に充てられる(5, 8)。生産された細根は枯死することで多量の炭素を土壌へ供給するため、炭素循環に大きく関与していると指摘されている(1)。高CO<sub>2</sub>環境下では、多くの場合、年間の細根生産量が増加するとの報告があるが(6)、地下部での細根動態を観測する手法が限られているため、細根の生産・枯死が、いつ・どれくらい行われているかという情報は少ない(9)。また、細根は土壌への有機物供給源となるだけでなく、樹木自身の養水分の吸収を担っている重要な植物器官であるため、地上部の生産にも関与している。したがって、高CO<sub>2</sub>環境下での樹木の細根生産・枯死の季節変化を把握することは、将来の炭素循環や森林樹木の生産性を評価・予測する上で重要である。

カバノキ属は冷温帯～亜寒帯に広く分布し、比較的高い炭素固定・貯留機能を持つ。中でもシラカンバ(*Betula platyphylla* var. *japonica*)は国内でも代表的な樹種であり、北海道の森林の主要構成樹種でもある。そこで本研究ではシラカンバを対象に、野外に近い環境でCO<sub>2</sub>暴露を行える開放系大気CO<sub>2</sub>増加(FACE; Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment)施設において、高CO<sub>2</sub>環境下で育成したシラカンバの細根動態の季節変化を追跡した。

## 材料と方法

本研究は、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター札幌研究林実験苗畑に設置されたFACE施設を用いて行った。2010年5月末にシラカンバの2年生苗を50～55cm間隔で植栽した。なお、植栽土壌は褐色森林土である。ガス処理として対照区(CO<sub>2</sub>無付加, 380-390 ppm)と高CO<sub>2</sub>区(500 ppm, 2040年頃を想定)の処理区をそれぞれ3プロット設け、2010年6月から2012年4月までの2成長期間にCO<sub>2</sub>暴露を行った。

細根長を測定するために、本研究ではミニライゾトロン法を採用した。本手法の利点は、根圏を非破壊で継続観測できることである。2010年5月の植栽と同時に、各サイト2本ずつアクリル製の透明な根圏観察用のチューブをシラカンバ群落内に埋設した。チューブは地表面に対して45°に挿入し、地表面から深さ30cm地点まで到達させた。また、

地上部分には遮光処理を施し、測定時以外は塩ビ管キャップを被せることで雨水の流入を防いだ。設置後、土壌を安定させるために1年間静置し、翌年の2011年4月から2012年4月まで3週間毎に根圏観察用カメラ(CI-600, CID Inc.)を用いて根圏を撮影した。得られた画像は画像解析ソフト(WinRHIZOTRON, Regent Instruments Inc.)を用いて直径2mm以下の根を対象に観察画面あたりの細根長を測定した。なお、遮光処理や雑草などの障害物を避けるため、解析には地表から深さ15～30cm地点の画像を採用した。得られたデータより細根の現存量、生産量、枯死量を求めた。また着葉期(5～11月)は、月1回の頻度で樹高を測定した。

統計解析として、説明変数を固定効果がガス処理、変量効果がサイトの反復、応答変数を各測定項目とした一般化線形混合モデルを作成し、尤度比検定によってCO<sub>2</sub>暴露の影響を検定した。グラフ内のエラーバーと表の括弧内は標準誤差を示す。なお、有意水準が $p < 0.1$ で有意差があったとした。

## 結果

植栽直後の2010年6月の平均樹高には処理間に差は見られなかった(対照区45.8cm, 高CO<sub>2</sub>区44.6cm)が、CO<sub>2</sub>暴露開始から1年経過した2011年5月では、高CO<sub>2</sub>区で平均樹高が有意に増加した(対照区109.7cm, 高CO<sub>2</sub>区157.4cm,  $p < 0.01$ )。さらに、2成長期目の終盤である2011年11月では、高CO<sub>2</sub>区で平均樹高が有意に増加した(対照区224.3cm, 高CO<sub>2</sub>区291.7cm,  $p < 0.05$ )。

2011年4月から2012年4月までの1年間の細根の総生産量は、高CO<sub>2</sub>区で有意に増加した(図1)。同様に、細根の総枯死量も、高CO<sub>2</sub>区で有意に増加した。細根の現存量は一年を通して高CO<sub>2</sub>区で多かった( $p < 0.05$ , 図2)。さらに、高CO<sub>2</sub>区では現存量が最大となる時期が対照区よりも遅かった。対照区における細根の生産は4月～5月に最も活発となったが、高CO<sub>2</sub>区では4月～7月と、より遅い時期においても細根の生産が活発であった(図3)。なお、対照区・高CO<sub>2</sub>区ともに8月以降は細根の生産はほとんど観察されなかった。この結果、高CO<sub>2</sub>区では細根生産期間が約2ヶ月延びていた。細根の枯死は対照区・高CO<sub>2</sub>区ともに7月までほとんど見られなかった(図4)。また、対照区では8月を境に細根の枯死速度が徐々に減少していったが、高CO<sub>2</sub>区では10月まで高く維持された。

## 考察

CO<sub>2</sub>暴露2年目において、高CO<sub>2</sub>区でシラカンバ群落の樹高成長や細根の総生産量・総枯死量・現存量は増加してい

Hiroataka ITO, Xiaona WANG, Yuko HARA (Graduate school of Agriculture, Hokkaido Univ., Sapporo 060-8589), Tatsuro NAKAJI (FSC, Hokkaido Univ., Tomakomai 053-0035), Makoto WATANABE, Takayoshi KOIKE (Research Faculty of Agriculture, Hokkaido Univ., Sapporo 060-8589)

Fine root dynamics of White birch grown under a Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment system

た。本研究と同時期に、同じ実験系で行われたシラカンバの個葉の光合成能力(10)やシラカンバ群落の樹冠の葉量(3)に関する報告では、CO<sub>2</sub> 暴露による光合成能力の増加は認められなかったものの、LAI(葉面積指数)の増加が認められた。樹高成長が増加していることも合わせると、CO<sub>2</sub> 暴露によって個体全体の生産性は増加していると考えられる。これら同化量の増加の結果、同化産物の根系への供給量も増加し、シラカンバの地上部・地下部ともに成長量が増加したと考えられる。過去のFACE研究においても、CO<sub>2</sub> 暴露によってシラカンバの地上部の成長量増加(2)やポプラ・カンバ林における細根現存量の増加(7)、落葉広葉樹のモミジバフウで年間の細根生産量の増加(4)などが報告され、本研究と同様の結果を示している。

細根生産は春から初夏にかけて最も活発であった。これは夏に根の生産のピークを観測した佐藤(9)による根箱実験と異なる結果である。この原因は、観測対象が細根であり、その多くが直径0.2mm前後を示す本研究と、直径を問わず全ての根の成長を観測した佐藤との、観測対象の違いによるものと推測する。4~5月および8月以降における細根の生産速度にCO<sub>2</sub> 暴露による影響は見られなかった。しかしながら、高CO<sub>2</sub> 区では6~7月も細根生産が継続され、細根生産期間が約2ヶ月延びていた。細根の総生産量の増加は、この初夏における細根の生産量増加によるものと考えられる。先述のシラカンバ群落の樹冠の葉量に関する報告(3)では、高CO<sub>2</sub> 区において2011年の初夏のLAIも増加することが確認されている。すなわち、高CO<sub>2</sub> 区では同化量が増加した結果、初夏に地上部・地下部ともに生産が活発に行われていたと推察される。

細根が枯死する期間にはCO<sub>2</sub> 暴露の影響は見られなかったものの、高CO<sub>2</sub> 区で秋の細根の枯死速度は増加していた。これは初夏に生産された多量の細根が秋に枯死したためであると考えられる。また、細根の現存量が増加した時期に、CO<sub>2</sub> 暴露による細根の枯死速度への影響は見られなかった。このことから、春から初夏にかけての細根の現存量の増加および現存量が最大となる時期の遅れは、CO<sub>2</sub> 暴露による細根生産速度と生産期間の変化に起因し、細根の枯死は関与していないと推察される。

**まとめ**

高CO<sub>2</sub> 環境下で2成長期間育成したシラカンバにおいて、樹高成長および細根の総生産量・総枯死量・現存量の増加が認められた。初夏の細根の現存量の増加および現存量が最大となる時期の遅れは、初夏の細根生産期間の長期化により細根生産が維持されたことに由来し、細根の枯死は関与していないことが示唆された。また、初夏の細根生産量が増加した結果、細根の総生産量および総枯死量が増加した。

**謝辞**

本研究は、日本学術振興会・科学研究費新学術領域研(21114008)および若手研究(B-24710027)の一部支援を得た。記して感謝する。

**引用文献**

(1) De Kroon H., & Visser, E.J.W. (2003) Root Ecology. Springer-Verlag, New York. 394pp.  
 (2) 江口則和 (2008) 大気中CO<sub>2</sub> 濃度増加に伴う冷温帯落葉広葉樹木の炭素固定能力の変化に関する研究. 北海道大学大学院農学研究所 博士論文.  
 (3) 原悠子, 伊藤寛剛, 毛巧芝, 渡辺誠, 星加康智, 高木健太郎, 齊藤秀之, 渋谷正人, 小池孝良 (2012) 開放系大気CO<sub>2</sub> 増加

施設で育成したカンバ類3種のシュート動態 - CO<sub>2</sub>付加2年目の効果 - . 北森研 60: 39-40.

(4) Iversen, C.M., Ledford, J., Norby, R.J. (2008) CO<sub>2</sub> enrichment increases carbon and nitrogen input from fine roots in a deciduous forest. New Phytologist 179: 837-847.  
 (5) Jackson, R.B., Mooney, H.A. & Schulze, E.-D. (1997) A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. Proceedings of the National Academy of Sciences 94:7362-7366.  
 (6) Karnosky, D.F. (2003) Impacts of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on forest trees and forest ecosystem: knowledge gaps. Environment International 29: 161-169  
 (7) King, J.S., Pregitzer, K.S., Zak, D.R., Sober, J., Isebrands, J.G., Hendrey, G.R., Karnosky, D.F. (2001) Fine-root biomass and fluxes of soil carbon in young stands of paper birch and trembling aspen as affected by elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and tropospheric O<sub>3</sub>. Oecologia 128: 237-250  
 (8) Nadelhoffer, K.J. & Raich, J.W. (1992) Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. Ecology 73: 1139-1147.  
 (9) 佐藤孝夫 (1995) 樹木の根系の成長に関する基礎的研究. 北海道林業試験場研究報告 32:1-54.  
 (10) 渡辺誠, 上田龍四郎, 高木健太郎, 笹賀一郎, 小池孝良 (2012) 開放系大気CO<sub>2</sub> 増加による2成長期間の高CO<sub>2</sub> 処理がカンバ類3種の光合成に与える影響. 北森研 60: 41-42.

各グラフのエラーバーはSEを示す。  
 \*\*\*; p < 0.01, \*\*; p < 0.05, \*; p < 0.1

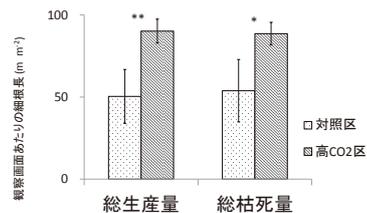


図-1 細根の総生産量および総枯死

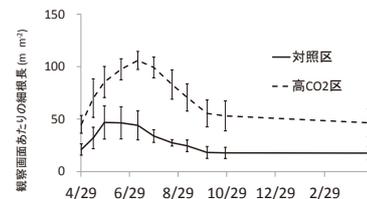


図-2 細根現存量の季節変化

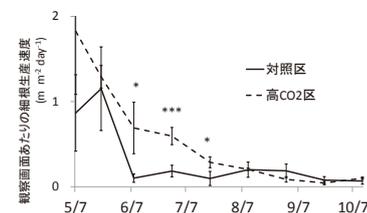


図-3 細根生産の季節変化

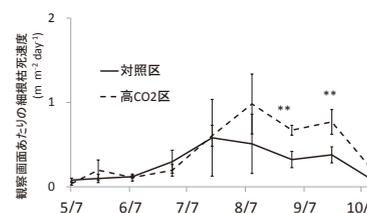


図-4 細根枯死の季節変化