

研究情報

Research Information

No.138 Nov 2020

樹木内部の炭素輸送

森林環境研究グループ 高梨 聡

* 森林と炭素循環

森林は二酸化炭素 (CO_2) を吸収し、地球温暖化の防止に貢献しています。こう一言で言ってしまうと簡単ですが、その中身はやや複雑です。植物は、葉に多く含まれる葉緑体という部分で、光をエネルギー源として、 CO_2 と水から糖などの光合成産物と酸素を作り出す光合成により CO_2 を吸収しています。しかしながら、森林においては、樹木を一次生産者としてさまざまな生物が生活し、生態系を形作っており、 CO_2 を吸収する仕組みはそう単純ではありません。生物間の複雑なプロセスを経て、正味の CO_2 の量の増減を見た結果、吸収されているのです。葉において CO_2 を吸収し作り出された光合成産物は水溶性の糖になり、主に篩管と呼ばれる管を通して、幹や根など離れた器官にまで輸送されます。輸送された糖は、植物自身の成長に使われるほか、植物が生きていくためのエネルギーとして呼吸によって消費され、再び CO_2 となり、大気中に放出されます。葉で作られた光合成産物を基に生産された植物の種や果実は動物の栄養源となり、落葉や落枝等は土壌微生物たちのエネルギー源となり、これらの従属栄養生物によって消費され、 CO_2 となり再び大気中に戻ります (図1)。このように、大気と森林との間では CO_2 がやり取りされ、炭素が循環しています。また、植物は気孔という葉面に存在する口を介して CO_2 を吸収していますが、気孔からは同時に蒸散作用によって水分が失われていきます。植物が蒸散作用による乾燥を防ぐために、気孔を閉じると、同時に CO_2 の取り込みも減少させてしまいます。一方で、蒸散作用は植物体内をめぐる水のポンプの働きをしており、葉面に光合成に必要な水を届けるほか、葉を作るのに必要な窒素などの栄養素を根から届ける働きをしています。したがって、光環境や水環境などさまざまな環境要因・植物の内的要因により、森林の CO_2 吸収量は変動します。

現在、渦相関法と呼ばれる手法により、森林における CO_2 の吸収量を直接測定できるようになっています¹⁾。渦相関法の原理は、至極簡単に言うと、風速 (乱流) と濃度の変動を高速かつ精密に測定することにより物質の輸送量を推定する手法です。風速は空気の移動量であるので、 CO_2 濃度を掛け合わせれば、 CO_2 の移動 (輸送) 量を計算することができます。実際には、森林内に観測タワーを建て、タワー上で、風速と CO_2 濃度を測定することにより、数百メートル四方程度の領域の30分間の大気—森林間の CO_2 輸送量を連続的に観測することができます。世界中の森林で行われている観測により、植生タイプや気候における森林の CO_2 吸収量が見積もられてきました。しかしながら、森林の内部の炭素循環については複雑であり、特に樹木内部の炭素輸送については未解明な部分が多いです。

* 樹木内部の炭素輸送測定法

そこで、私達の研究グループでは安定同位体を追跡子 (トレーサー) として利用することで、

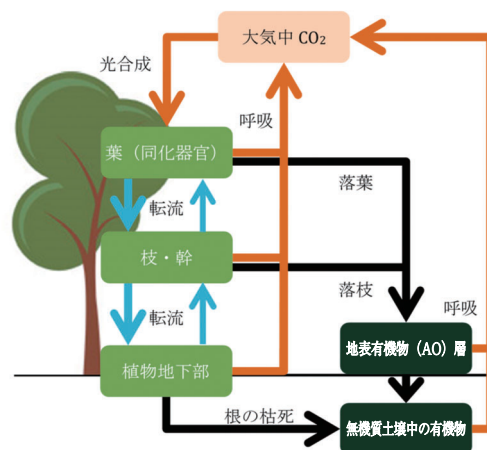


図1 森林の炭素循環



国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所関西支所

Kansai Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute

樹木内部の炭素輸送を測定し、その輸送速度や貯留量を推定しました。安定同位体とは物質の陽子数が同じで、中性子の数が異なる物質のうち、自然界にも安定的に存在する同位体のことです。炭素の安定同位体は ^{12}C と ^{13}C があります。 CO_2 の同位体の存在比は大きく異なり（炭素同位体である $^{12}\text{CO}_2$ と $^{13}\text{CO}_2$ では約100倍存在比が違う）、測定は一般に濃度測定よりも難しいです。従来からおこなわれてきた同位体比を測定する手法は、 $^{12}\text{CO}_2$ と $^{13}\text{CO}_2$ との非常に小さな重さの違いを利用し、質量分析計によって測定する方法です。しかしながら、質量分析計そのものは非常に大きく、重たく、高真空を取り扱う必要があるため、野外での測定には向きません。 CO_2 濃度の測定には非分散型赤外分光法とよばれる手法が近年では盛んに用いられています。 CO_2 などの気体分子は、分子構造により特定の波長の光を吸収しています。 CO_2 による赤外光の吸収量を測定することにより、 CO_2 濃度を連続的に測定できるようになりました（前述の渦相関法もこの測定法を用いることにより高速に濃度測定を行っています）。近年の技術革新により、さまざまな波長のレーザー光を発振できるようになってきています。 $^{12}\text{CO}_2$ と $^{13}\text{CO}_2$ では、わずかに重さの違う炭素原子が結合しているため、光の吸収波長も少し異なります。この微妙な波長ごとの吸収量の違いをレーザーによって検出することにより、 $^{12}\text{CO}_2$ と $^{13}\text{CO}_2$ の濃度を連続的に測定することが可能となりました。人為的に $^{13}\text{CO}_2$ を合成し、それを植物に光合成により固定させ（ラベリング）、その後 ^{13}C の濃度を各部で測定することにより、吸収した炭素が、いつ、どこへ、どのくらい移動したのかを追跡することができます。従来、各部の ^{13}C 濃度は適宜大気や葉・幹・根などをサンプリングし、質量分析計を用いて測定していたため、草本や小さな樹木など、解体が容易で、測定しやすいものが対象になっていました。しかし、連続的に $^{13}\text{CO}_2$ を測定できるレーザー同位体分析計と組み合わせ、各部での $^{13}\text{CO}_2$ の放出量を測定することによって、野外において非破壊かつ連続的に成木樹体内の炭素を追跡できるようになりました。

*アカマツ成木の炭素輸送特性

私達の研究グループが、秋季（2012年9月）、冬季（12月）、夏季（2013年7月）に山梨県富士吉田試験地にてアカマツ成木（推定樹齢約100年、樹高20.5m）を対象におこなった $^{13}\text{CO}_2$ ラベリング実験例を紹介します²⁾。図2に示すようにチャンバー（密閉袋）を樹冠にかぶせ、2～3時間の光合成により $^{13}\text{CO}_2$ を固定させ、その後、幹に設置したチャンバー内部の $^{13}\text{CO}_2$ 濃度を、レーザー同位体分析計により検出しました。ラベリングの後、高い $^{13}\text{CO}_2$ 濃度が初めて検出されるまでの時間を炭素到達時間とすると、秋季・夏季で速く、冬季の下部で遅いという結果が得られました（図3）。取り込まれた炭素の放出パターンは季節によって異なり、秋季・夏季ではすみやかに下方に流れ、呼吸

によって消費されていましたが、冬季においては多くは樹冠にとどまり、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ていることが観測されました。冬季に光合成産物の多くが樹冠にとどまっている理由は、まだはっきりとは分かりませんが、糖の濃度を高めることにより葉を凍らせないようにしている、寒さのため蒸散による水のポンプ作用が働かず下方に流せない、等の理由が考えられました。

*おわりに

今後、このようなラベリング手法を用いて樹木内部の炭素輸送を測定すると、さまざまな環境条件下における樹木の資源配分戦略が理解できるようになると考えられます。たとえば極度の乾燥条件に陥った際に、根への投資を増やすのか？あるいは気孔を閉じて、蒸散を防いで体内の水を保持し、やり過ごすのか？はたまた、個体としての生存は諦め、種子などを生産し子孫へと託すのか？などの疑問に対して、どのように樹木が対応し、炭素のやりくりしているのかを観測によって確かめられるようになります。この炭素輸送プロセスを理解できるようになると、樹木が風害や虫害などの被害を受けた際に、どこまでの損傷ならば、樹体内の資源を使って機能を回復でき、樹木個体として生きていけるのかなどの強靱性（レジリエンス）を評価できるようになると考えられます。こうした樹木の戦略を植生動態モデルなどに組み込むことによって、高精度な陸域生態系の炭素吸収能の評価および予測が可能になると期待できます。

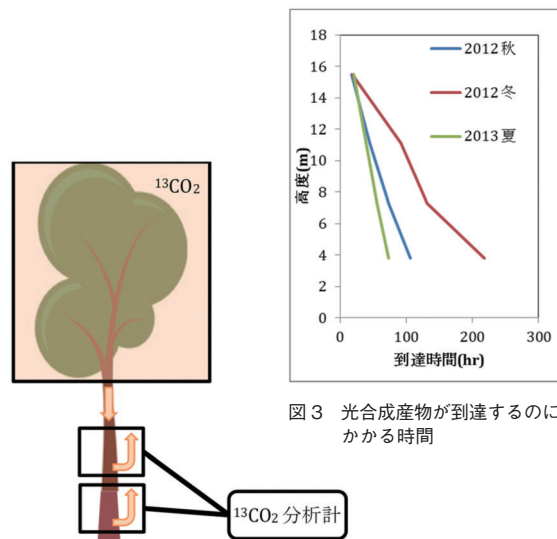


図3 光合成産物が到達するのにかかる時間

図2 $^{13}\text{CO}_2$ ラベリング実験

参考文献

- 1) 森林総合研究所フラックス観測ネットワーク
<https://www2.ffpri.go.jp/labs/flux/index.html>
- 2) 高梨聡 (2017) 安定同位体を用いた森林における炭素循環－木の中の見えない炭素の流れを探る．生物の科学遺産 71:55-62

直径分布の表現方法

森林資源管理研究グループ 田中 邦宏

ある林にどのような大きさの木がどの程度あるかということ、すなわち直径分布は間伐を行ったり立木を販売したりする上で重要な情報です。また、その林がどのような成長過程をたどってきたのかを調べたり、将来どのような林になるのかを予測したりする上でも非常に重要です。小さな木も大きな木も均等にあるのか、小さな木が多いのか、大きな木が多いのか、小さな木が非常に多いのか、などといった分布に関する情報です。これを視覚化する方法としてヒストグラムがよく用いられます。また、分布を表現する統計量としては平均値、中央値、四分位数などが用いられます。

ところで、直径分布の形状を定量的に比較・評価する別の手段としてワイブル分布という関数（詳細は省略）を用いる方法があり、様々な研究が行われてきました。この関数は、 a, b, c の3つのパラメータを持っており、そのうちのパラメータ c を変化させることで様々な形態の分布を表すことができます（図1）。具体的には、 $c=3.6$ で正規分布を、 $1 < c < 3.6$ で左に偏った分布を、 $c > 3.6$ で右に偏った分布を表すことができます。また、 $c=1.0$ では指数分布を、 $c < 1$ ではL字型分布を表すことができます。

実際に固定試験地での毎木調査データにワイブル分布を当てはめてみました（図2、3）。あるスギ人工林の15年生時と99年生時の直径分布と、あるヒノキ人工林の38年生時と122年生時の直径分布を示しました。ヒノキ林ではパラメータ c は2.85から2.5へと減少し、スギ林では2.35から1.55へと減少しています。したがって、ヒノキ林はやや左に偏った分布であり大きな変化が無い一方で、スギ林ではヒノキ林よりもやや左に偏った分布が大きく左に偏ったことが分かります。ヒノキは成長が遅いため大きな変化が生じない一方、スギは成長が速いため競争で優勢となった個体がより大きくなり、分布の偏りが大きくなったと考えられます。

このようにワイブル分布を用いることで、一つのパラメータ c によって直径分布の形状を比較・評価できるようになります。こうした手法によって林の構造や動態に関する研究が行われてきており、その成果は間伐・主伐計画を立てたり、その収穫量を予測したりするための「システム収穫表」などにも応用されています。

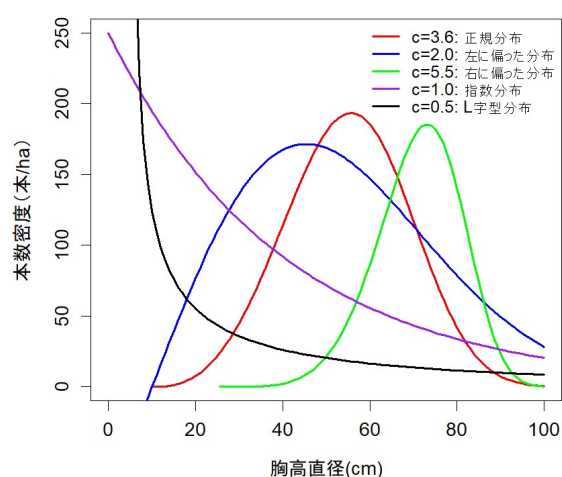


図1 Weibull 分布による様々な分布曲線の表現

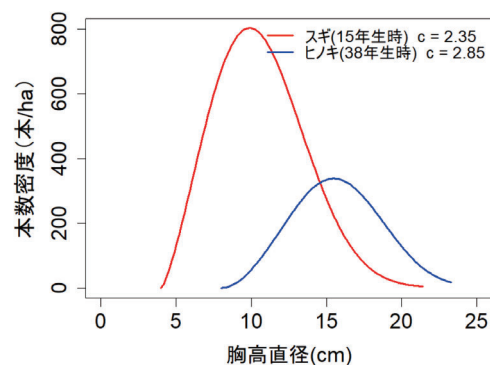


図2 スギ林とヒノキ林における直径分布の比較（若齢時）

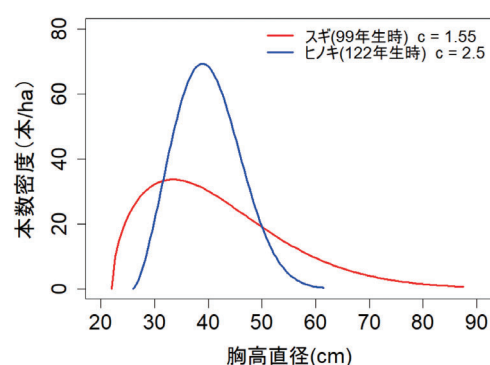


図3 スギ林とヒノキ林における直径分布の比較（高齢時）

—山地の崩れやすい危険地形の基礎知識その3—

山地でみられる断層地形 鞍部

森林環境研究グループ 多田 泰之

山地の崩れやすい危険地形の基礎知識 第3回は、山地でみられる断層地形について解説します。山地でよく見られる谷地形の様子を写真に示しました。谷の形状はV字型（写真1白破線）で稜線が凹んでいます（写真1赤破線）。この凹んだ稜線部は鞍の形に似ることから「鞍部（あんぶ）」と呼ばれます。鞍部は山地であればどこにでも見られる地形ですが、実は断層運動によって作られた地形の1つです。山地で見られる断層地形の模式を図1に示しました。山地の3つの稜線には稜線が凹んだ鞍部（写真1、図1赤破線）があり、線状に連続して並んでいます。実は、これらの連続した鞍部を結ぶ位置（図1青破線）には断層が存在しています。第1回でも述べたように、断層運動によって地盤がズレて断層面で岩盤が擦り合わされると、岩盤が砕けて細粒化し、断層（図1青線）の外側には破碎帯（図1赤帯）が形成されます。山地の稜線でも同様に、図2に示すように断層（青線）の外側に破碎帯（赤帯）が形成されます。破碎帯は元の岩盤に比べ相対的に強度が低いため、侵食が早く進みます。その結果、尾根に挟まれた鞍部という凹地形が形成されます。このように、鞍部（写真1、図2）は断層運動によって作られた地形の1つであり、連続する鞍部（図1）はそれらを結ぶ位置に断層が存在することを示しています。

山地でしばしば見られる断層地形周辺は、土層が厚く水分も多いため、人工林の成長が非常に良く、林業をする場所としては魅力的です。しかし地盤の強度が低く、地表水や地下水が集まりやすいため、皆伐や作業道を開設すると非常に崩れやすい性質があります。「人工林の成長が良い林地」≡「崩れやすい林地」となる場合が多いため、地形図で施業地が断層周辺でないかを確認し、断層であれば崩壊リスクに応じた施業方法を選択する「適地適業」を行う必要があります。その一例として、次回は「適地適業」に必要な立木の曲がりや崩壊リスクとの関係を解説します。

巻頭帯写真について：京都府保津峡（JR山陰線保津峡駅付近）

本誌を含む関西支所刊行物は
こちらからご覧になれます。



写真1 山地の稜線にみられる鞍部の例

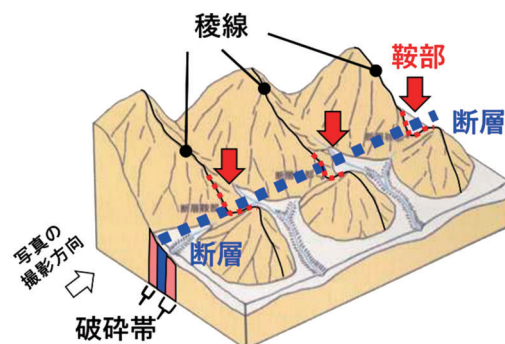


図1 山地における断層地形の例
(兵庫県立人と自然の博物館 (1996)：兵庫県南部地震を考える、p.13-18 に加筆)

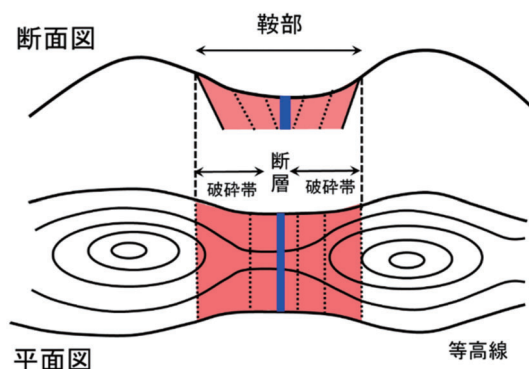


図2 鞍部と破碎帯の位置

研究情報 第138号

令和2年11月30日発行

国立研究開発法人 森林研究・整備機構

森林総合研究所関西支所

京都市伏見区桃山町永井久太郎 68 番地

〒612-0855 Tel. 075 (611) 1201 (代表)

Fax. 075 (611) 1207

ホームページ <https://www.ffpri.affrc.go.jp/fsm/>