ISSN 0917-1908

森林科学

［特 集］

広葉樹二次林の炭素循環研究の最前線

シリーズ

森めぐり

トドマツ人工林の保持林業実証実験区

現場の要請を受けての研究

周辺環境に配慮した森林作業道の研究

うごく森

動物がタネをまいて森をうごかす
―特に地球温暖化が進むなかで果たす役割に注目して―



No. 85
February 2019

森林科学 85
contents 2019.2

特集 広葉樹二次林の炭素循環研究の最前線

西日本の広葉樹林の炭素収支、その解明の現状と問題点 1
小南　裕志

炭素収支における分解系の寄与解明の現状と展望 7
安宅　未央子

炭素収支における ^{13}C パルスラベリング手法の適用と展望 13
檀浦　正子

炭素収支における光合成―呼吸応答研究の現状と展望 19
吉村　謙一

森林科学　No.85
2019 年 2 月 1 日発行

頒　価　1,000 円（送料込み）
年間購読割引価格
2,500 円（送料込み）
編集人　森林科学編集委員会
発行人　一般社団法人　日本森林学会
102-0085 東京都千代田区六番町 7
日本森林技術協会館内
郵便振替口座：00140-5-300443
電話 /FAX　03-3261-2766
印刷所　創文印刷工業株式会社
東京都荒川区西尾久 7-12-16

表紙写真：京都府木津川市・山城試験地の気象観測タワー（小南裕志撮影、平成 27 年 10 月）

コラム　森の休憩室Ⅱ　樹とともに
樹が動く進化を想像してみる 25
二階堂　太郎

シリーズ　森めぐり
トドマツ人工林の保持林業実証実験区 26
山中　聡

シリーズ　林業遺産紀行
旧帝室林野局木曽支局庁舎および収蔵資料群 28
奥　敬一

シリーズ　現場の要請を受けての研究
周辺環境に配慮した森林作業道の研究 30
臼田　寿生

シリーズ　うごく森
34 動物がタネをまいて森をうごかす
―特に地球温暖化が進むなかで果たす役割に注目して―
直江　将司

シリーズ　森をはかる
38 森林の遮断蒸発をはかる
飯田　真一

記録
40 海外における森林療法の現況（1）
ーアジア諸国編ー
上原　巌

45 Information
ブックス
北から南から

広葉樹二次林の炭素循環研究の最前線

西日本の広葉樹林の炭素収支、その解明の現状と問題点

小南　裕志（こみなみ　ゆうじ、森林総合研究所）

はじめに

2016年10月、世界気象機関（WMO）は世界の大気CO_2平均濃度が「危険水準濃度」とされる400 ppmに達したことを発表した。この濃度は産業革命以前と比較すると44%もの上昇率となっており、人類活動が地球規模での環境に影響を与えている決定的な証拠となっている。最新の全球温暖化研究報告IPCC AR5（Stoker *et al*. 2014）においては人間活動に関連する全球CO_2放出量は約8.9 GtC y^{-1}で、これに対し陸域、海域生態系の吸収量がそれぞれ2.6、2.3 GtC y^{-1}であり、その差の約4 GtC y^{-1}のCO_2の増加が現在の大気CO_2濃度の上昇を作っていると考えられている。一般に温暖化緩和策と呼ばれる、温暖化ガス濃度上昇の低減への工夫はこの収支の中で、放出を少なくする、または吸収を多くすることを意味する。海洋と比較すると管理可能性が高い陸域生態系の中で、主なCO_2吸収源である森林のCO_2吸収能の把握および機能高度化を目標とした森林炭素収支研究が1990年代後半以降世界中で増加した。現在、気象観測タワーを用いたCO_2フラックスモニタリングを主軸とした森林の炭素収支研究サイトは500を越え、21世紀に入ってから飛躍的な知見の増加を見ている。一方、上述の陸域生態系の2.6 GtC y^{-1}吸収推定はこれらのサイト情報を用いた平均値等が採用されたわけではなく、大気濃度、人為起源放出、海洋吸収の差分や人工衛星による気柱CO_2濃度変動の空間分布（Inverse Model）によって間接的に推定されている。この理由は前回のIPCC報告（AR4;Solomon *et al*. 2007）の中で明瞭に述べられており、「森林のCO_2吸収量は、その測定点と比較して場所によるばらつきが非常に高く、そのばらつきの原因も多岐にわたるためにグラウンドデータから森林の吸収量を算出することは困難である」とされ、現在でも基本的にはこの状況が変わっていない。本原稿では森林総合研究所が持つ全国5つのCO_2タワーフラックスサイトのうち京都府木津川市にあるコナラを優占樹種とした落葉－常緑広葉樹林に設置された山城試験地（写真-1）において測定されたCO_2吸収量の評価結果およびその群落内部動態研究を通して、森林のCO_2吸収量評価の困難性、およびその把握のための工夫、さらに今後の展望に関して考察を加える。



写真-1　紅葉の山城試験地

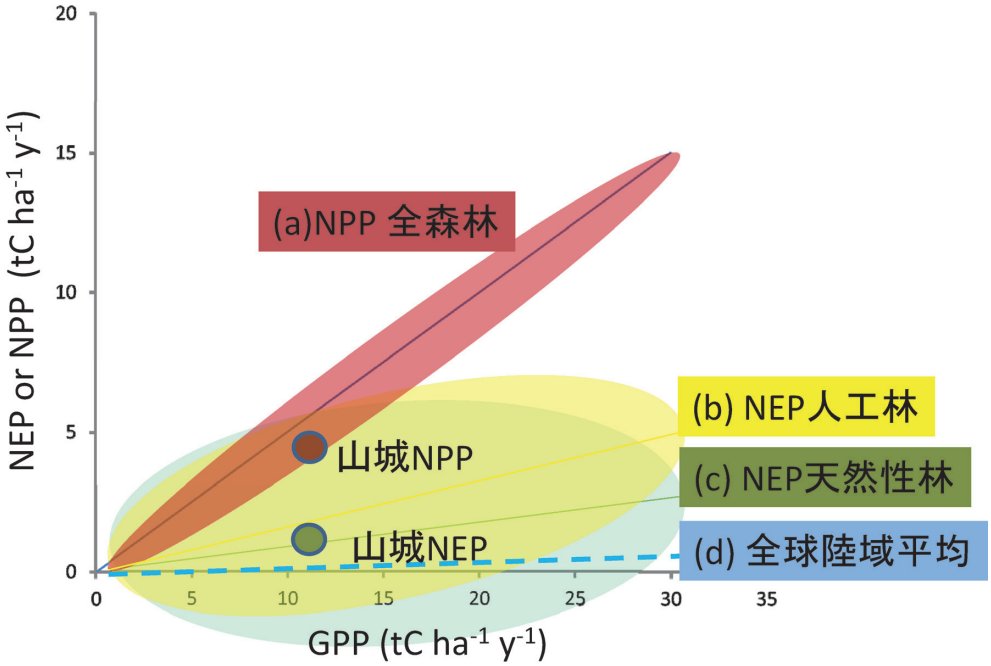
日本の広葉樹炭素収支の背景－天然性林であるがゆえの難しさ－

地球温暖化などで評価対象となる森林のCO_2吸収量は通常、「正味のCO_2吸収量」と呼ばれる。これは一定期間の間に森林群落全体が大気に対して吸収した（放出の場合もある）CO_2の量のことである。正味のCO_2吸収量（NEP）は光合成によるCO_2吸収量（GPP）と植物体自体を含めた生態系内のほぼ全ての生物による呼吸によるCO_2の放出量（生態系呼吸量：Re）との差として求めることができる（1式）。

$$NEP=GPP-R_e \qquad (1)$$

ここでR_eは森林内の植物の呼吸（R_a）と森林内に存在する落葉・落枝などの有機物の分解に伴い発生するCO_2放出量（R_h）の和である。

森林の植物が有機物の形でいったん樹体内に蓄えた炭素総量である森林の純一次生産量（NPP）はGPPから森林バイオマスや森林バイオマスの一部である葉の量と関係を持つ植物呼吸量（R_a）を引いた値で表される（2



図−1　世界の森林の GPP と（a）NPP（DeLucia *et al.* 2007）、（b）天然性林 NEP、（c）人工林 NEP（Luyssaert *et al.* 2010）および（d）全球 NBP（Stocker *et al.* 2014）の関係および山城試験地での結果

式）。そのため NPP は常に正の値を持ちつつ GPP と比較的高い相関が存在し、GPP に対する NPP の比は 47 ～ 52% 程度と報告されており、ほとんどの森林では全光合成量の約半分はいったん樹体内に貯蔵される（図−1（a））。

$$NPP=GPP-R_a \qquad (2)$$

しかし NEP は NPP から R_h を引いた値であり（3 式）、R_h は生きている植物の量とは即時的には関係を持たない過去の有機物蓄積によって規定される現在の枯死有機物量と環境の相互作用によって発生する。

$$NEP=GPP-(R_a+R_h)=NPP-R_h \qquad (3)$$

そのため、NEP と GPP の関係は相関が低く、また人工林と比較すると天然性林は GPP に対する NEP 値が小さい傾向がある。また大規模な撹乱などの影響で群落内に枯死木が多く存在するなどの理由で R_h が高い場合には NEP はマイナス値をとる場合があり、天然性林においては、その傾向が高く見られる（図−1（b）（c））。全球レベルでの超広域では NPP と R_h はさらに拮抗すると考えられ、IPCC AR5 報告では全球 GPP に対する NEP の比は 1.6% 程度と考えられている（図−1（d））。

森林が吸収した CO_2 は有機物の形で群落内の植物か土壌に蓄積するため、群落バイオマス（W）の変化量（ΔW）と土壌炭素蓄積量の変動（ΔS）によっても NEP の推定は可能となる。

$$NEP=\Delta W + \Delta S \qquad (4)$$

植林などで植生発生時がわかっており、過去の大規模な撹乱の影響を仮定する必要のない人工林の場合には、長期的に枯死有機物の収支がバランスしているという仮定に基づき、4 式において ΔS=0 とおくことができ、現植生バイオマスを群落の齢で除した値が森林の平均 NEP に近似する。これが人工林のバイオマスで多く行われる CO_2 吸収量の算定手法である。

一方、天然性林においては植生発生年代が不明かつ非一様で、さらに過去の枯死木などの現在のバイオマスとは直接の関係がない枯死有機物が存在する場合が多い（写真 −2）。そのため、場所によって樹木の成長段階が異なり、また枯死有機物の収支がバランスしているという仮定も適応できない。このため、二次林などの天然性林において ΔW を推定する場合には長期にわたる広域バイオマス量の測定を行い、期間内のバイオマス変動量を ΔW とし、これと並行して枯死木や葉リターなどの有機物の発生量、現存量の推定、および有機物現存量から推定した分解呼吸量を用いて有機物分解収支を推定する必要がある。日本の森林（約 2400 万 ha）のうち、天然性広葉樹林の面積は 1010 万 ha（約 42%）を占めている。これらの森林の CO_2 吸収量評価は人工林と比



写真 –2　山城試験地で見られる 1980 年代に発生したと考えられるアカマツ枯死木

較して推定が困難であり、個々の森林の CO_2 吸収は固有の履歴に依存する可能性が高い。

タワーフラックスの有効性とその限界

バイオマス測定ベースでの NEP 推定は群落の成り立ちによって推定に要する労力に偏りがあり、また樹木調査によって測定される胸高直径や樹高などを用いて樹木のバイオマスを推定するためのアロメトリ関数などの固有かつ長期的な把握が困難な変数が必要となる。このため、気象観測タワーを用いて NEP の値を乱流変動法によって直接的に求める手法が現在世界 500 カ所以上の森林で行われている。しかし乱流変動法を用いた手法は原理的には数 km 以上の一様かつ完全に平坦な森林（鉛直一次元仮定）においてのみ森林－大気間の CO_2 交換量（NEE）が NEP と等しいと考えることができ、地形が複雑、森林が一様でない、森林面積が十分でないなどの場合には測定値が妥当ではない可能性が指摘されてきた。山城試験地は 1.6 ha の試験地内の中心に谷があり、比高 30 m 程度の尾根に挟まれる典型的な複雑地形に位置しているため、尾根と谷の二カ所に観測タワーを設置して測定位置による CO_2 フラックス観測を行った。二つのタワーフラックスの比較では両者の相関は高く（24 時間平均値で標準誤差約 25%）、複雑地形においても乱流変動法の適用が可能であることが明らかとなった。一方、風の弱い夜間には乱流変動法によるフラックスは常に過小に測定されていた（Kominami *et al.* 2003；図 –2）。夜間に地表面付近の空気密度が放射冷却で高くなる（大気安定状態）と群落－大気間の乱流交換があまりおこなわれなくなり、群落内に大気は滞留する。しかし平坦ではない地形においては重くなった空気は重力で斜面の下方に動いて行ってしまうために夜間の呼吸によって発生した CO_2 量に相当するフラックスの多くはタワー測定では観測できないことになる（水平移流問題）。この現象は斜面に位置する世界中の試験地において見られ、補完手法として風が強くて乱流輸送が十分にある場合の呼吸量と地温などの環境因子との関係を関数化しておいて、風がないときには環境因子から呼吸量を推定するという方法が一般的に用いられるようになった。山城試験地において夜間の呼吸測定に適していると考えられる期間は夜全体の 20% 程度に過ぎず、2 割のデータで残りの 80% を推定している。度合いの違いこそあれ、このような安定大気時の夜間呼吸量のデータ補完はどの試験地においても行われている。本来的にタワーフラックスは日中の測定は得意だが、夜間の呼吸量の測定は苦手であり、また夜間呼吸の推定値は呼吸量推定関数に依存性がある。また GPP や R_e の推定においては夜間の呼吸量推定関数を用いて日中も同様の環境応答を行っていると仮定して日中の呼吸量推定を行い、R_e は夜間呼吸と日中呼吸の和、GPP は日中の NEE と R_e の和によってそれぞれを算出しているため、乱流輸送の卓越する夜間呼吸の情報が全ての値に高い影響を与えていることも認識しておく必要がある。山城試験地における平均的な GPP、NPP、NEP 値はそれぞれ 11.3、5.1、1.3 tC ha^{-1} y^{-1} 程度であり世界のフラックスサイトの中で、GPP はやや小さいがこれに対する NPP、NEP の比は

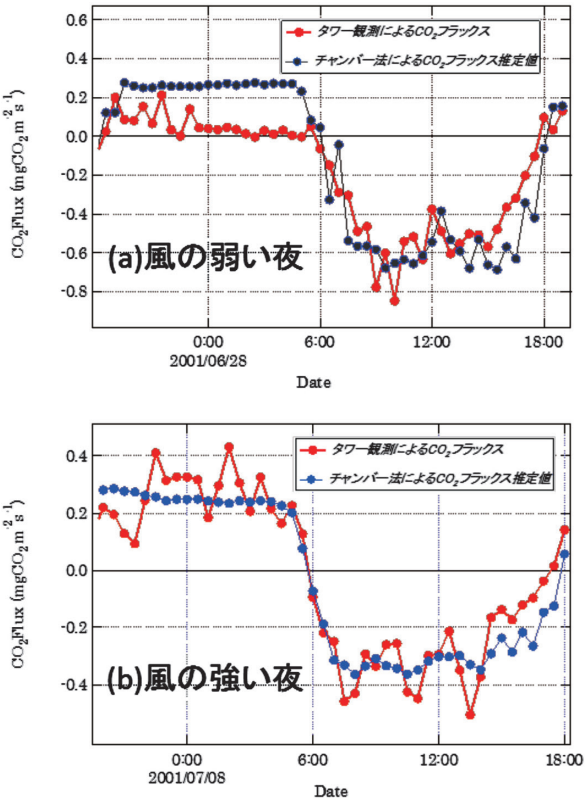


図 –2　タワー観測による夜間呼吸の過小評価、プラスが放出を表す。(a) において夜間 0 時から 6 時までの間タワー観測値がほぼ 0 になっている。

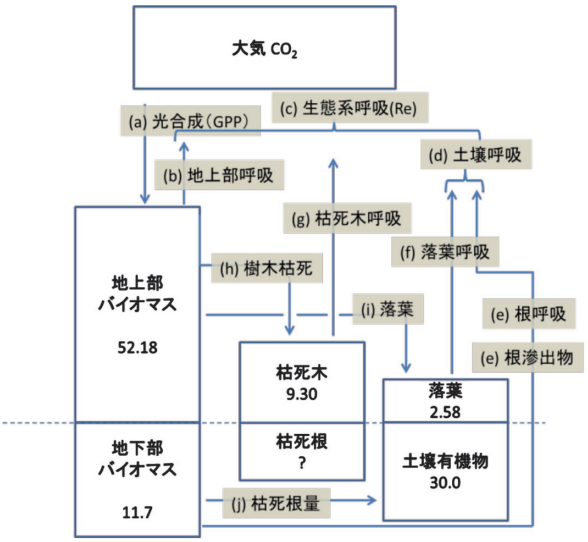


図 –3（a）　山城試験地におけるコンパートメントごとの炭素蓄積量 (tC ha^{-1})

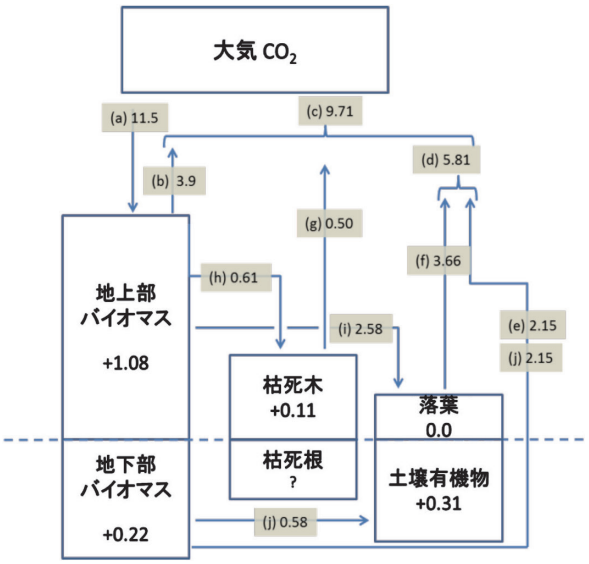


図 –3（b）　山城試験地におけるコンパートメント間の炭素フラックス（tC ha^{-1} y^{-1}）

一般的な値を示した。

群落炭素循環の理解とその必要性

タワーフラックスを用いた手法によって森林の CO_2 吸収能を規定する GPP、NPP、NEP といった大まかな値は決定することが可能であるが、天然林における NEP 値に大きな影響を与える R_a、R_h の分離はできない。また毎木調査によって W の変化を求めても枯死木を含めたリター発生量と R_h の収支を算出することができない。そのため本試験地においては 2000 年代の前半より、主にチャンバー法を用いて葉、枝、幹、根などの植物体や土壌、枯死木、枯死根、落葉などの枯死有機物における CO_2 吸収－放出や細根からの滲出物発生などの測定手法の開発を行い、群落内の様々なコンパートメントにおける炭素動態評価を試みてきた（本誌、吉村、安宅の項を参照）。また各コンパートメントへの炭素投入から消費に至る時間応答に関しても ^{13}C パルスラベリング法を用いることによって炭素到達－消費過程の定量化を試みてきた（本誌、檀浦の項を参照）。図 –3（a）は 2005 年時点を想定した試験地のフラックスの発生源となるコンパートメントの量、図 –3（b）はコンパートメントでの流入－放出フラックスである（Kominami *et al*. 2008）。

森林内の炭素収支は内部コンパートメントでの炭素流入出およびプール量の時間変動によって形成されているため、非常に複雑な炭素プール－流入出の相互作用が存在し、その把握は多大な労力を要する。これら値を 1 式の光合成で固定した有機物が生態系呼吸として各コンパートメントで消費されていく過程を応答時間順に示したものが図 –4 である。

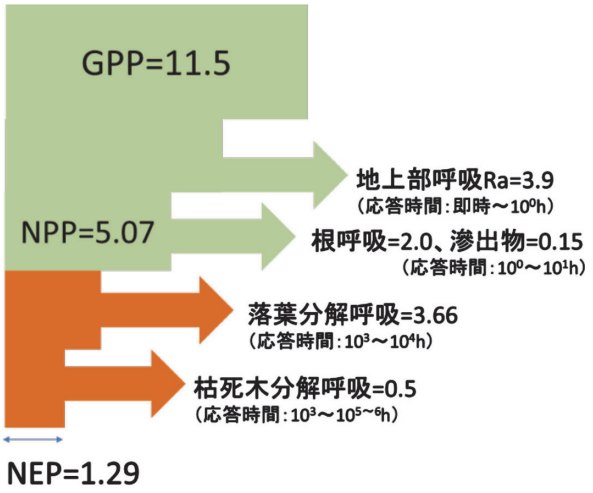


図 –4　GPP による生産からの応答時間でみた炭素消費

森林で安定して発生する R_a やファインリター呼吸（落葉や枯死細根分解呼吸）は 3 コンパートメントとも値としては大きく変わらないが応答時間は即時から数年までの幅を持つ。

また枯死木に関しては本試験地においては枯死木プール量 9.3 tC ha^{-1} に対して呼吸量が 0.5 tC ha-1 y-1 程度であったが、この値は過去から現在にかけての枯死木の発生量に依存するために、植物バイオマス量から、いつどれだけ枯死木プールへ移行するかによって大きく変化する余地がある。群落内の 5 m メッシュ（全 640 グリッド）において測定された ΔW とリター発生量から推定した ΔS を用いて群落内 NEP の空間分布を推定した結果（図 –5）を見てみると、群落内の炭素蓄積速度には大きな空間的ばらつきがあることがわかる。

これは群落内の樹木齢や樹種などが一定ではないため

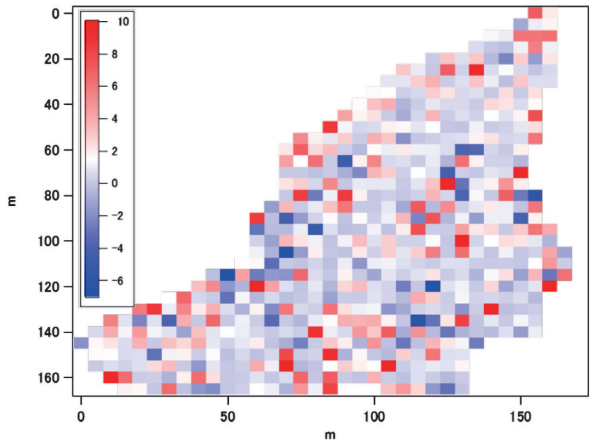


図 –5　山城試験地内の 5 m メッシュ NEP 分布（tC ha^{-1} y^{-1}）

成長が良い場所と枯死有機物が多く発生して分解が卓越している場所が混在していることが要因となっている。人工林とは異なり天然性林においては群落内において、成長－枯死の変遷を繰り返しており、その総体として結果的に平均 NEP が存在する。このような R_h の関与が人工林と比較した天然性林の NEP の低さを発生させていると考えられる。

一方、本試験地の群落炭素蓄積量の年次変動を日本の天然性広葉樹林の齢級ごとのバイオマス量およびバイオマス量変動から算出した ΔW と比較した値を図 –6（a）（b）に示す。1999 年から 2014 年までのバイオマス量は全国値と比較すると一致する値を持っているものの増加量はかなり高い。一つのサイトの結果ではあるものの日本の広葉樹二次林の CO_2 吸収能が蓄積量調査から推定される値よりも大きくなり得ることが理解され、またその値はタワーフラックスで直接観測された吸収量と合致していることからも広葉樹二次林の CO_2 吸収能が高い機能をもつ可能性がある。

IPCC AR5 報告においても北米およびヨーロッパ大陸の未利用森林で高い CO_2 吸収能が同じ様に報告されている。一方、これらの未利用林は日本の広葉樹林ではナラ枯れ、ヨーロッパ針葉樹ではマツ枯れなどの樹病拡大が懸念されており、またアジア域においては台風などの影響も常にあり得る。本試験地においては 2014 年よりナラ枯れ枯死が本格化し 2019 年に予定されているバイオマス調査では 20 tC ha^{-1} 程度の枯死木発生が見込まれている。攪乱が起きる前に森林を利用することによって NEP の増加が見込まれる、という一見すると相反するメカニズムへの理解が重要であると考えられる。

今後の展望

以上のように、森林の CO_2 吸収機能を推定する場合

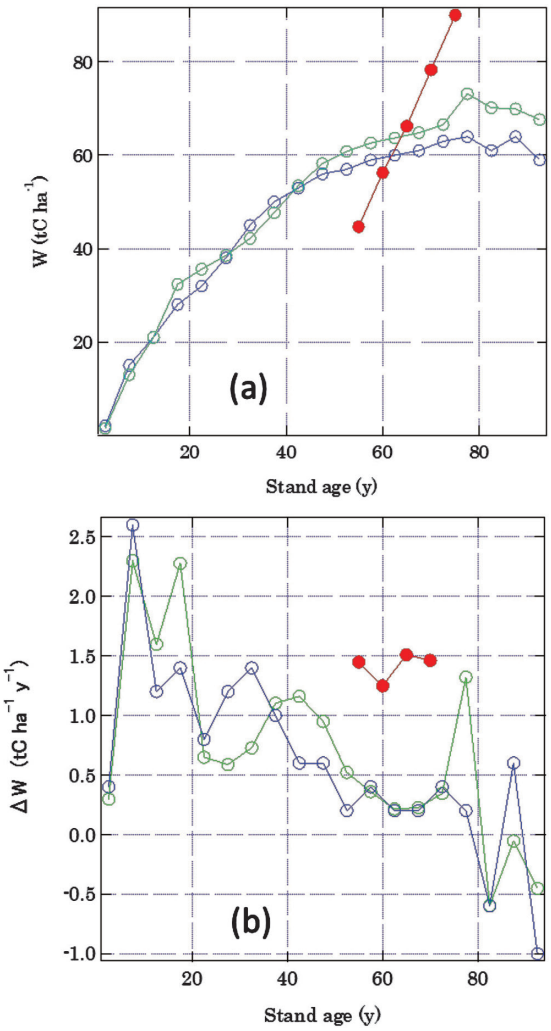


図 –6　林野庁資源量調査（●）と森林総合研究所温暖化拠点（●）による天然性広葉樹林の林齢ごとのバイオマス（a）と推定 ΔW（b）および山城試験地（●）におけるバイオマスおよび ΔW

には GPP に対する R_a、R_h の CO_2 放出過程の定量化が重要である。タワーフラックス観測を用いると直接的に NEP を観測することが可能であるが夜間呼吸量推定の不確実性や R_a、R_h の分離ができないなどの問題がある。バイオマスおよび土壌炭素の変化量を用いた方法では枯死有機物発生量と有機物分解量の収支推定が必要となるが、多大な労力が必要となり、特に地下部枯死根の分解動態の把握が困難である。チャンバー法を用いた各コンパートメントでの CO_2 交換測定では測定場の代表性を上げるための多点測定の困難さや、長期測定を行うとチャンバー内が周辺とは異なった環境になってしまうなどの問題がある。これら各種法には一長一短が存在し克服することは簡単ではないが、測定方法の簡素化や測定システムの低コスト化などにより長期的に安定した森林の炭素動態測定を行い、これを理解する必要がある。超

長期で森林生態系の炭素収支を考えると動的平衡状態に近い可能性が高いが、時間スケールが短くなるに従って動的な部分が際立ち、現在の値の持つ意味や時間代表性を理解することは困難になる。図–3に示した炭素フローが時間変化とともにどのように変動するのか？を実測ベースで可能にする戦略が重要だと考える。

引　用　文　献

DeLucia E, Drake E, Thomas R., Gonzalez-meler M. (2007) Forest carbon use efficiency: is respiration a constant fraction of gross primary production?. Global Change Biology 13(6): 1157-1167

Kominami Y, Jomura M, Dannoura M, Goto Y, Tamai K, Miyama T, Kanazawa Y, Kaneko S, Okumura M, Misawa N, Hamada S, Sasaki T, Kimura H, Ohtani Y (2008) Biometric and eddy-covariance-based estimates of carbon balance for a warm-temperate mixed forest in Japan. Agric. For. Meteorol. 148: 723-737

Kominami Y, Miyama T, Tamai K, Nobuhiro T, Goto Y (2003) Characteristics of CO_2 flux over a forest on complex topography. Tellus B 55(2): 313-321

Luyssaert S, Ciais P, Piao SL, Schulze ED, Jung M, Zaehle S, Schelhaas MJ, Reichstein M, Churkina G, Papale D, Abril G, Beer C, Grace J, Loustau D, Matteucci G, Magnani F, Nabuurs GJ, Verbeeck H, Sulkava M, Van Der Werf GR, Janssens IA, members of the CARBOEUROPE - IP SYNTHESIS TEAM (2010) The European carbon balance. Part 3: forests. Global Change Biology 16(5): 1429-1450

Solomon S, Qin D, Manining M (2007) Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC (Vol. 4): Cambridge University Press

Stocker T, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P (2014) Climate change 2013: The physical science basis: Cambridge University Press Cambridge, UK, and New York

炭素収支における分解系の寄与解明の現状と展望

安宅　未央子（あたか　みおこ、京都大学農学研究科）

はじめに

樹木は、光合成によって吸収した炭素を体に貯めこみ成長する一方で、役目を終えた樹体の一部は枯死し、林床面へと脱落する。ときには、虫害や台風などによる大規模な攪乱が発生することで、大型の樹体が立枯れていたり、林床面に横たわったりしている。そのため、森林の林床面に目を向けると、多様な枯死有機物（落葉・枯死木・枯死枝など）が、一面に広がっている。また直接目視することはできないが、土壌中では枯死根や菌糸などの枯死有機物に加え、根圏滲出物としての有機物が供給される。森林土壌に供給された多様な有機物は、微生物などの分解者のエネルギー源であり、その分解過程で二酸化炭素が放出され（分解呼吸もしくは従属栄養呼吸）、のこりは土壌に蓄積される。このように森林では、樹木の生長・枯死・分解が繰り返され、非常に長い年月をかけて土壌が発達する（図 –1）。

分解に供される多様な有機物は、枯死・脱落するタイミングが異なるうえ、それぞれに様々な特性（化学性・物理性）をもっている。それゆえ、枯死木のように分解に数十年以上を要するものや、根滲出物のように速やかに消費されるものなど、有機物によって分解に要する時間スケールが異なる。また、微生物を主体とする分解呼吸は、有機物の物理性や存在位置などの固有の環境によってそのパターンが異なる。

以上より、森林生態系の土壌炭素蓄積量は、土壌への炭素の供給量と放出量のバランスによって求められるが、炭素蓄積量の正確な把握には多様な有機物ごとに異なる供給・分解プロセスを個別に定量し、理解することが必要である。本稿では、山城試験地で測定された結果を基に、特に分解呼吸プロセスについて詳しく述べる。

多様な枯死有機物の分解呼吸の測定

森林には、直径数 cm 以下の小型の枯死根から直径 20 cm 以上の大型の枯死木まで、様々な大きさの枯死有

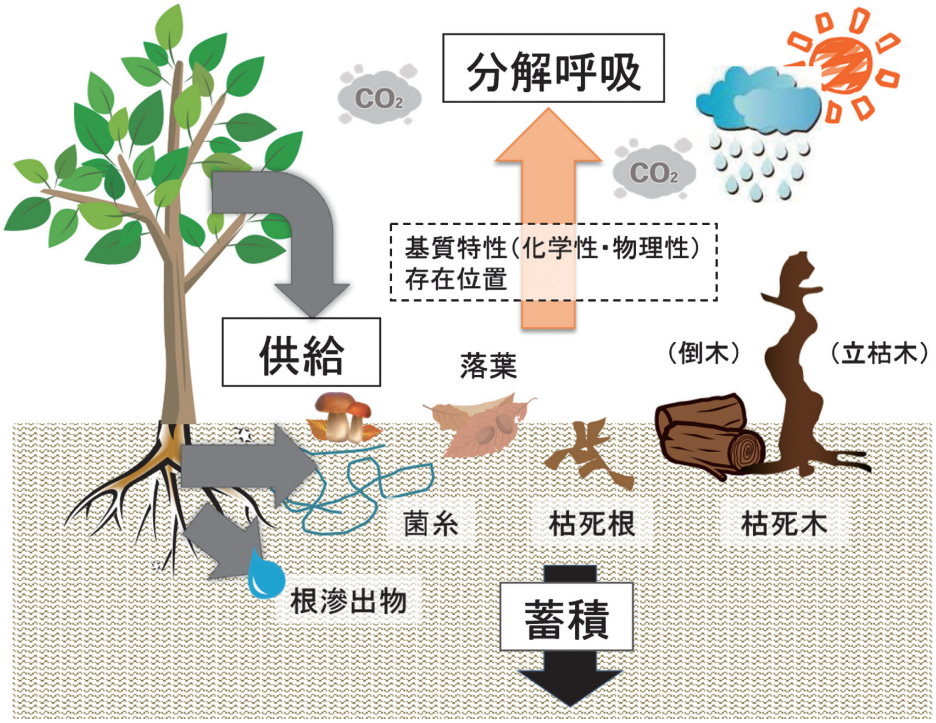


図 –1　森林土壌圏に供給される多様な有機物

機物が存在する。これらの分解呼吸速度を測定するために、各々の大きさに対応したチャンバー（測定容器）を用いる（図 –2）。チャンバー内に測定対象物を置き、密閉し、赤外線ガスアナライザーを用いてチャンバー内の CO_2 濃度を測定する。その値はデータロガーに記録され、10 分程度測定した CO_2 濃度増加率から、分解呼吸速度を算出する。分解呼吸は、その場の環境に強く依存しているため、原位置ですばやく測定することが望ましい。図 –2 で示したシステムは、バッテリーでの稼動が可能なので、電源のない現場でも測定することができる。図 –2A は、6 つの小型チャンバーの中に様々な樹種の落葉を 1 枚ずついれて、同時に分解呼吸速度を測定している光景である。このような手動での測定では、大量のサンプルの呼吸速度を測定できるので樹種間比較や空間分布評価をするのに適している。一方で、時々刻々と変化する環境要因に対してどのように変化するのかを調べることは容易ではない。

そこで用いられるのが自動チャンバーである（図 3–A,B）。チャンバーのフタが自動で開閉することで、対象物の CO_2 放出速度を連続的に測定することができる。このシステムでは、チャンバーと赤外線ガスアナライザーがチューブで接続されており、チューブ内のガスをポンプで循環させる。多数のチャンバーを連動させる場合は、電磁弁でガスラインを切り替える（図 –3D）。フタの開閉や電磁弁の動作は、リレーやタイマーを兼ね備えた装置で制御している。6 つの自動チャンバーを制御するための全ての制御システムは小型の物置に収納されている（図 –3C）。これにより、数十分～ 1 時間ごとの分解呼吸速度を測定することができる。測定時以外はフタが開いているので、降雨応答性や日変化といった時々刻々に変化するフィールドの環境状態を反映した分解呼吸速度の時間変動を調べることができる。

多様な有機物の分解呼吸の環境応答性

分解呼吸は、主に温度や水分の変化に応じて変動する。一般に、分解呼吸と環境要因の関係を評価する場合、地温や土壌含水率データが用いられる場合が多い。一方で、多様な枯死有機物の環境要因（特に水分）は、それぞれの物理特性と供給された場所の環境場に影響をうけて変動する。以下に、落葉と枯死木の事例を紹介する。

例えば、土壌表層に位置する落葉層は、土壌層と比べて薄い上に、日射や降雨の影響を直接うけるため、降雨後の水分状態が変化しやすい。暖温帯林においては、落葉層は降雨後数日で乾燥する（図 –4B）。落葉層の分解呼吸速度は、この速い湿潤－乾燥サイクルに追従して、降雨後にピークに達し、その後の乾燥にしたがって数日

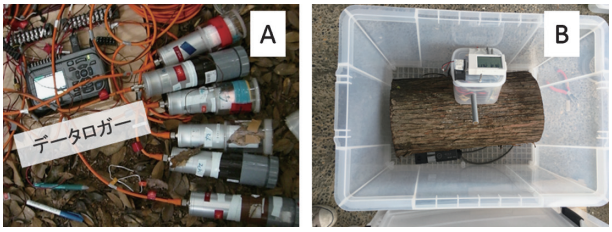


図 –2　有機物の大きさに応じたチャンバーを用いた分解呼吸速度の測定
静的閉鎖式チャンバー法による分解呼吸速度の測定風景である。赤外線アナライザーとロガーは、小型バッテリー（12V）で作動しているので、野外での観測が可能である。図 A のチャンバー（体積：約 270 cm^3）には落葉 1 枚、図 B のチャンバー（体積:約 96,000 cm^3 ）には枯死木が入っている。

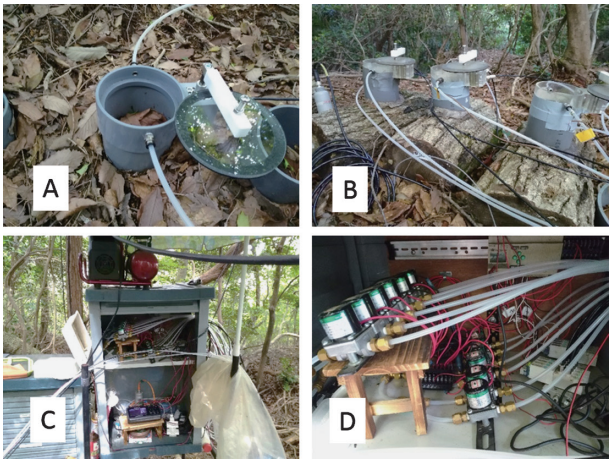


図 –3　自動チャンバー（A. B）とその制御システム（C. D）による分解呼吸速度の連続測定風景
（A）落葉のみの分解呼吸速度を連続測定するために、チャンバー内には、有機土壌のかわりにマサ土を充填し、落葉のみを供給した。土壌呼吸を測定する場合には、このチャンバーを土壌に直接差し込む。（B）枯死木の分解呼吸速度を連続測定するために、枯死木表面にチャンバーを取り付けている。（C）小型物置の中には、6 つの自動チャンバーを制御するための全ての制御システムが収納されている。（D）6 つのチャンバーのガスラインを切替のための電磁弁

以内にゼロに近い値まで減少するといったダイナミックな変動を示す（図 –4B、Ataka *et al.* 2014）。

同じく地表に存在する枯死木（倒木）では、その分解呼吸速度は降雨時に低下し、その後緩やかに増加する。密度の大きい枯死木の分解呼吸速度は、降雨時に水が浸み込むことで、ガス拡散・微生物への酸素供給が抑制されるために低下し、その後の緩やかな乾燥とともに増加する（Jomura *et al.* 2012）。その一方で立枯木は、倒木と比べて乾燥している傾向があり、分解呼吸量も相対

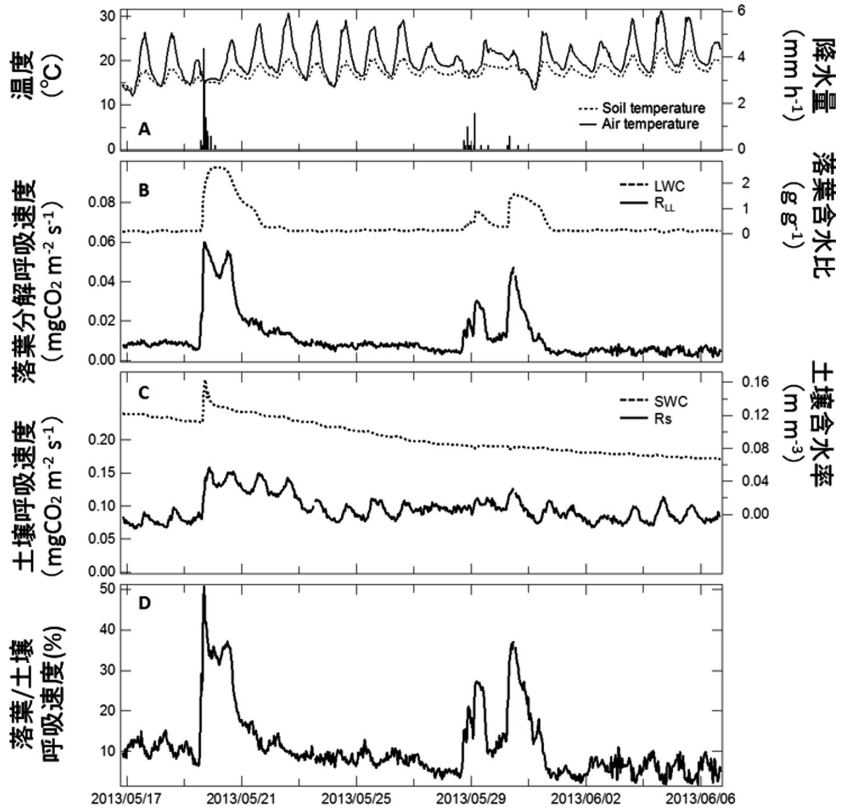


図 –4　自動チャンバーで測定された落葉分解呼吸速度と土壌呼吸速度の時間変動
2013 年 5 月 17 日～ 6 月 6 日の期間に、山城試験地で連続測定された
（A）気温・地温と降水量（B）落葉層の含水比と分解呼吸速度
（C）土壌の含水率と呼吸速度（D）寄与率のデータの時間変動

的に小さい。

このように、土壌圏の炭素動態において、有機物の特性や存在位置ごとに水分の変動パターンが異なることによって、特徴的な分解呼吸のトレンドが形成される。落葉に関しては、年間の土壌呼吸量に占める落葉分解呼吸量は 8.6% 程度であるが、土壌呼吸速度に対する落葉分解呼吸速度の寄与率は、湿潤 - 乾燥サイクルに従って、0 ～ 51% の大きな時間変動を示した（図 –4D）。枯死木に関しては、倒木（3.69 tC ha^{-1}）は立枯木（5.61 tC ha^{-1}）よりも存在量が小さいにもかかわらず、倒木の年間呼吸量（0.33 tC ha^{-1} $year^{-1}$）は、立枯木の呼吸量（0.17 tC ha^{-1} $year^{-1}$）よりも 2 倍程大きい値を示した（Jomura *et al.* 2008）。

通常、土壌呼吸研究においては、根呼吸と対比して、分解呼吸はひとまとめに扱われる場合が多い。しかし、実際の土壌呼吸は、環境の変化に対して異なる変動特性をもった多様な有機物の分解呼吸をたしあわせたものであり、その結果として、土壌呼吸の時間・空間変動が形成されている。そのため、個別の有機物の特徴的なトレンドを抽出し、それぞれの分解呼吸プロセスを定量的に理解するといったボトムアップアプローチを取ることで、「土壌呼吸のばらつき」に対して、実証データに基づいたより正確な解釈ができるであろう。

分解呼吸の主体である微生物と分解呼吸の関係

分解呼吸の主体は微生物である。微生物は、基質中に数 % 以下（微生物炭素量 / 基質炭素量）しかふくまれていないが、分解呼吸量は、生態系呼吸量（森林から放出される全 CO_2 量）の約 4 割を占める（小南「西日本の広葉樹林の炭素収支、その解明の現状と問題点」図 -3（b））。炭素収支研究において、植物体の活動である独立栄養呼吸に関しては、その主体である器官・個体ごとの量や CO_2 放出特性について詳細に評価・定量されてきた。それに対して微生物は、その存在自体を目視できないといった根源的な問題により、分解呼吸は物理環境因子を用いて関数化される場合が多く、微生物動態そのものがどのくらい分解呼吸に寄与しているのかについての実態解明は進んでいない。

実際に、山城試験地で測定された 2 年以上の落葉分解呼吸速度の連続データを解析すると、同じ温度帯であ

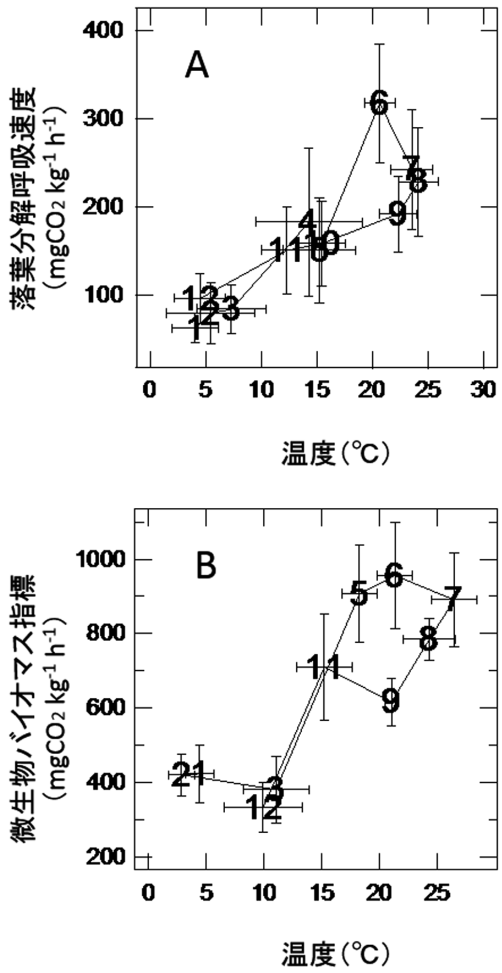


図 –5　落葉層の分解呼吸速度（A）と微生物バイオマス指標（B）の季節変化
数字は月をあらわしている。（A）連続測定データから含水比が 1 g g^{-1} 以上のときの分解呼吸速度の平均値と温度の平均値（B）基質導入呼吸法（SIR 法）を用いて測定された微生物バイオマス指標。温度は落葉層を回収した時の温度の平均値。

るにもかかわらず、秋期（9 月）よりも春期（6 月）に呼吸速度が 1.65 倍高いといった、季節的なヒステリシスが検出された（図 –5A）。さらには、微生物バイオマスも同様の季節変化を示した（図 –5B）。これらの結果は、分解呼吸速度の季節変化は、増減する微生物バイオマスによる影響を受けていることを示しており、微生物量は分解呼吸速度の変動幅の大きさを決定していると考えられた。

さらには、それ自体が菌体の集合物であると考えられる菌糸（2,800 ～ 26,400 mgCO_2 kg^{-1} h^{-1}）や子実体（3,037 ～ 21,674 mgCO_2 kg^{-1} h^{-1}）の呼吸速度は、落葉・枯死根・枯死木（それぞれ平均 244・220・16 mgCO_2 kg^{-1} h^{-1}; Ataka *et al*. 2015；松本ら 2010；Jomura *et al*. 2008）の呼吸速度と比べると、数オーダーほどの大きい値を示す。枯死有機物の分解呼吸や土壌呼吸では、局地的・一時的に有意に高い CO_2 放出量が見られることがある。通常このホットスポットは、はずれ値として処理される場合が多いが、菌糸や子実体の呼吸速度が非常に高いことを鑑みると、目視することができない微生物が集中的に存在している可能性が考えられる。

微生物は、環境や分解に伴う基質の変化に応じて、短期的・長期的な時間スケールでその量や活性、群集構造が変化しながら、その環境場の分解系を駆動する。近年では、微生物動態に関する測定技術の進歩により、微生物の構造や機能に関する研究が盛んに行われている。これらの微生物動態をフィールドで測定された分解呼吸データの解釈と結び付けることで、分解呼吸プロセスをより実態に基づいて定量的に解明できるだろう。

根圏滲出物として土壌に供給される炭素量の測定

光合成によって樹木に取り込まれた炭素は、幹や根圏に配分され、呼吸として再放出されるのに加え、根圏から有機態炭素として分泌される（根圏滲出物）。非構造炭素としての根圏滲出物は、微生物にとって利用しやすい炭素である。これにより根圏まわりの土壌（通常 5 mm 以内）では微生物の活性が高くなり、有機物分解が促進され、利用可能な栄養塩が増加する。この効果は、根圏プライミング効果と呼ばれている。

実際に山城試験地でコナラを対象に測定された結果（Sun *et al*. 2017）では、根圏土壌の溶存有機炭素量や微生物炭素量は、それ以外の土壌と比べて大きい値を示したのに加え、両値は根圏滲出物量と正の相関を示した。これにより、根圏滲出物は、根圏まわりの土壌の有機物分解を促進していることが示された。さらに、推定された年間根圏滲出物量（0.15 tC ha^{-1} $year^{-1}$）は、純一次生産量（NPP）の 2.9% を占めていた。

樹体内を介して土壌圏へと供給される根圏滲出物は、季節や日々の天気によって変化する地上部光合成活動の影響を強く受けていると考えられる。刻々と変化する環境の変化に対して、滲出物量はどのように変化するのか、それによってひきおこされる有機物分解呼吸はどの程度なのか、いつ光合成として固定された炭素によるものなのか、など問いは多く残されている。檀浦が紹介しているパルスラベリング法や吉村が紹介している葉群自動チャンバーを組み合わせ、樹体全体の炭素動態を網羅することができれば、これまで森林炭素動態モデルではほとんど考慮されてこなかった地上部と地下部のつながりに着目した土壌圏炭素動態の研究を加速することができると考えている。

過去の履歴の影響を受ける分解呼吸量と土壌炭素蓄積量

花崗岩を基盤とする山城試験地や隣接する田上山系一帯は、都の建築用材や薪炭材としての過度の森林利用と土壌侵食によって、明治初期まで裸地化していた。木津川や瀬田川の源流域周辺は、過去の土砂流出を物語るいくつもの天井川がはしっている。山城試験地では、その後の緑化工事により、アカマツが優占する森林に回復したが、1970 年代にはマツノザイセンチュウという線虫による伝染病が原因となり、マツ枯れによる大量枯死が発生した。現在ではコナラが優占する広葉樹林へと姿をかえたが、再びカシノナガキクイムシという甲虫による伝染病によって主に大径木の枯死が発生し、ギャップが散在している。

これまで光合成により炭素を吸収していた樹木が枯死し、分解系にまわり炭素を放出する有機物に転化するといった現象は、森林生態系において常に発生している。しかし、虫害などにより一度に大量枯死した場合、樹木の現存量は大きく減少するとともに、枯死有機物の分解呼吸量は大幅に増加する。現存量に対する枯死量の割合によっては、森林が炭素の放出源になる可能性もある。さらには、十年、百年単位で分解する枯死木は、長期間にわたり炭素の放出源となる。実際に、山城試験地ではマツ枯れ木が 2000 年代に入っても残っており（図–6）、その分解呼吸量（約 0.4 tC ha^{-1} $year^{-1}$）は、正味の CO_2 吸収量（NEP, 1.5 tC ha^{-1} $year^{-1}$）の 30% ほどを占めていた。このように、突発的に起きる発生頻度の低い大規模イベントは、枯死有機物の供給量ひいては分解呼吸量の特異なトレンドを生み出す。森林の炭素収支を評価するためには、大規模イベントを含めた森林構造の変化を長期的かつ広域的に観測していくことが必要である。

また、裸地化していた過去の履歴の影響によって、山城試験地の土壌炭素蓄積量（31 tC ha^{-1}, Kominami *et al*. 2008）は、日本の平均値と比べても大幅に小さい。裸地化した山肌を見た当時の土木技師は、「雪が降っている、もしくは白布で包まれているようだ」と表現していることから、有機物層はほぼなかったと考えられる。百年以上の時を経て森林が回復し、現在の土壌では数 cm ～ 10 cm 程の有機物層を形成している（図–7）。一方では、現在でも、非常に激しい雨が降った後には、微地形の変化や、量水堰にたまった大量の土砂を目にする。そのため、日本に多くみられる斜面地形上に成立する森林においては、土壌の生成に加え、崩壊・流出が動的に繰り返されながらも、少しずつ土壌に炭素が蓄積していることを実感する。



図–6　山城試験地のアカマツの立枯木



図–7　山城試験地の土壌断面

炭素蓄積機能としての土壌圏

森林の炭素蓄積量は、樹木と土壌に蓄積した炭素量を足し合わせた値である。樹木は生長し炭素を固定・蓄積するが、数千年生きる樹木でもいつかは死を迎える。このように成長・枯死をくりかえす樹木に対し、樹木がある限り有機物が供給され続ける土壌では、非常に長い年月をかけて土壌に炭素が蓄積され続ける。IPCC の第 5 次報告書（IPCC 2013）では、陸域生態系における土壌炭素蓄積量は、植生の炭素蓄積量よりも数倍大きいことが報告されている。これからも窺い知れるように、長期スケールでは、土壌は本質的な炭素蓄積機能を有している。

土壌炭素蓄積量は不均一に分布するため、その評価が困難である。とくに、斜面地形に成立する日本の森林の土壌炭素蓄積量は空間的に不均一である。山城試験地の流域内（1.7 ha）において、土壌炭素蓄積量に影響する

要因である落葉堆積量は、0.22 ～ 2.87 tC ha^{-1} の大きな変動幅を示した（2 月に林床面に堆積している落葉サンプルを回収）。

また気候変動に対して土壌炭素蓄積速度の評価が重要なことは言うまでもないが、土壌炭素蓄積量の変化は非常に緩慢であり、予測するのはもちろんのこと、その変化を測定することは容易ではない。土壌炭素蓄積速度を直接的に測定する場合では、定期的に土壌を採取しその炭素量の変化を測定することで求めることができる。しかし、土壌炭素蓄積量は不均一であることに加え、サンプリングによる土壌攪乱により、同一地点における変化を長期的に観測し続けることは実質的に困難である。一方、土壌炭素蓄積速度を間接的に求める場合、有機物の供給量から分解呼吸量をさし引いて求めることができる。しかしながら前述したように、森林には様々な有機物が混在し、環境に応じてそれぞれに固有の供給・分解呼吸パターンを有するため、これらの詳細で継続的な観測が必要である。

現在、世界の 500 カ所以上の地点での気象観測タワーを用いた CO_2 フラックス観測により、短期的な観測をベースにした森林ー大気の CO_2 交換量（≒正味の CO_2 吸収量、NEP）の測定と変動要因評価が行われている。しかし、分解系の炭素動態は過去の土壌炭素蓄積プロセスの履歴に強く依存するため、動的に変化する NEP に対する分解系の寄与を十分に説明することができていない。短期的な観測をベースにした NEP 評価に、土壌炭素蓄積プロセスの長期的な評価を組み入れることは、森林の炭素蓄積機能の正確な評価を行う上で重要である。

さいごに

森林生態系において、絶えず繰り返される多様な有機物の枯死・分解サイクルに拠って立つ分解系の炭素動態は、環境の変化に連動して様々な時間・空間スケールで不均一に分布する現象を積み上げた総体である。そのため、森林炭素収支における分解系の果たす役割を明らかにするためには、個々の有機物の枯死･供給とその分解･蓄積プロセスを詳細に記述し、特徴的な現象を正しく抽出し定量化することが重要である。同時に、頻度は低いが大規模イベントによる影響評価も長期的かつ広域的に観測し、分解系の炭素動態評価に反映させていくことが必要である。

引　用　文　献

Ataka M, Kominami Y, Jomura M, Yoshimura K, Miyama T, Kosugi Y, Tani M (2015) CO_2 efflux from decomposing leaf litter stacks is influenced by the vertical distribution of leaf litter water content and its temporal variation. J Agri Meteo 71: 263-270

Ataka M, Kominami Y, Yoshimura K, Miyama T, Jomura M, Tani M (2014) In Situ CO_2 Efflux from Leaf Litter Layer Showed Large Temporal Variation Induced by Rapid Wetting and Drying Cycle. Plos One 9: e108404

IPCC (2013) The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Stocker TF *et al*., Eds. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2013): 465-570

Jomura M, Kominami Y, Ataka M (2012) Differences between coarse woody debris and leaf litter in the response of heterotrophic respiration to rainfall events. J Forest Res-Jpn 17: 305-311

Jomura M, Kominami Y, Dannoura M, Kanazawa Y (2008) Spatial variation in respiration from coarse woody debris in a temperate secondary broad-leaved forest in Japan. For Ecol Manage 255: 149-155

Kominami Y, Jomura M, Dannoura M, Goto Y, Tamai K, Miyama T, Kanazawa Y, Kaneko S, Okumura M, Misawa N, Hamada S, Sasaki T, Kimura H, Ohtani Y (2008) Biometric and eddy-covariance-based estimates of carbon balance for a warm-temperate mixed forest in Japan. Agric. For. Meteorol. 148: 723-737

Sun L, Ataka M, Kominami Y, Yoshimura K (2017) Relationship between fine-root exudation and respiration of two Quercus species in a Japanease temperate forest. Tree phys 37: 1011-1020

松本　晃・小南裕志・石井弘明（2010）野外における小型チャンバー法を用いた枯死根の分解呼吸量の直接測定．日林誌 92: 269-272

炭素収支における ^{13}C パルスラベリング手法の適用と展望

檀浦　正子（だんのうら　まさこ、京都大学地球環境学堂／農学研究科）

はじめに

森林を構成する樹木は光合成によって二酸化炭素を吸収し、酸素を放出している。実際にはエネルギーを得るために酸素を吸収し、二酸化炭素を放出する呼吸もおこなっているので、その差し引きが、実際に樹体に固定される炭素ということになる。このような炭素の収支の結果は樹木が大きくなる量として表現できるが、そのやりとりを実際にみることは、二酸化炭素や酸素が透明な気体であるため難しい。もし、そのやりとりを詳細にみることができれば、樹木の炭素固定の様子が、季節ごとにどのように変化するのか、気温の上昇に伴いどのように変化するのか、など、様々な情報が得られることであろう。本稿では、炭素の安定同位体である ^{13}C を用いて、トレース実験を行なう手法を導入して、どのような利点がありどのように森林の炭素収支研究に応用できうるのかという点について考察する。

^{13}C パルスラベリングとは

炭素の安定同位体には、^{12}C と ^{13}C とがあり、自然状態でそれぞれ 98.89%、1.11% の比で存在している。^{13}C パルスラベリングとは、この存在比の少ない ^{13}C をトレーサーとして対象に付加し、^{13}C を追跡するという手法である。特定の部位を標識し、代謝経路を追跡するのによく使用される手法で、たとえば、胃炎などの原因となるヘリコバクター・ピロリ菌は尿素を分解しアンモニアと二酸化炭素を生成する酵素をもつが、このことを利用して、^{13}C で標識した尿素を服用し、呼気中の $^{13}CO_2$ を測定することでヘリコバクター・ピロリ菌の有無を調べる検査などにも利用されている。^{13}C は、放射能の心配のない安定同位体であるため、野外でも安全に使用できる。^{13}C を樹木に付加する方法には、樹冠全体や、枝をビニールなどで覆い、$^{13}CO_2$ を充填させて光合成により取り込ませる方法（写真 -1）や、幹に ^{13}C を溶け込ませた溶液を注入する方法などがある。樹木が固定した ^{13}C は、一部は呼吸として樹木の各部位から大気に放出され、一部は貯蔵され、一部は樹木の生長につかわれる。これらの ^{13}C を追跡するためには、呼吸中の $^{13}CO_2$ の割合や、樹体内の ^{13}C の割合などを

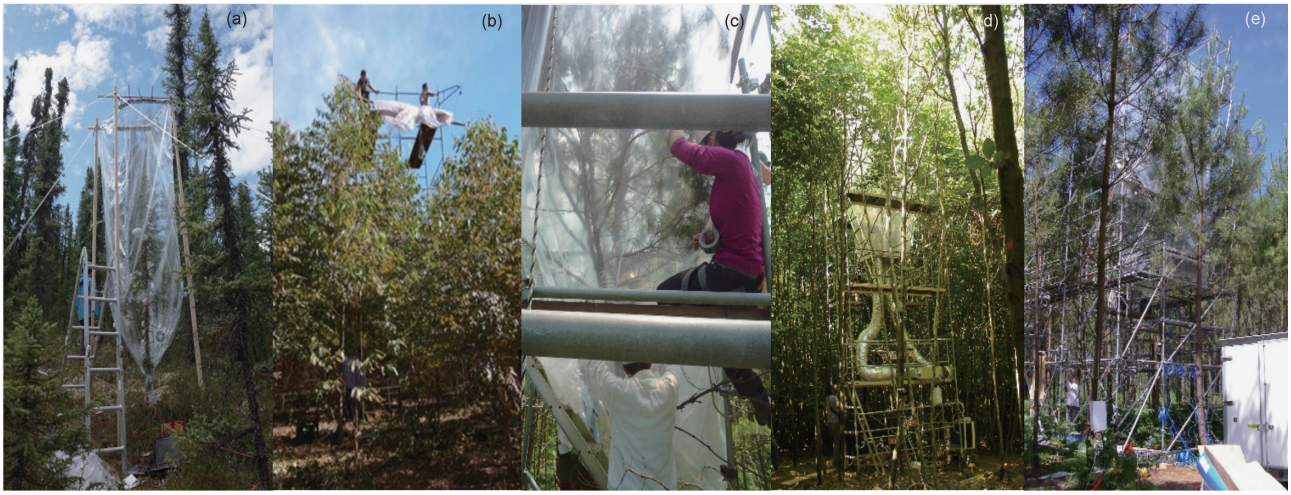


写真 -1　ラベリングチャンバーを設置して ^{13}C パルスラベリングを行なう様子。(a) アラスカのブラックスプルース、永久凍土上に成育しており、林床はふかふかの地衣類やコケで覆われている。(b) ブラジルのユーカリ、一年間に 5 m 程度も生長するので、2 年生であるが樹高はすでに 9-12 m である。(c) 日本の富士吉田のアカマツ、樹冠部分は高さ 19.5 m である。(d) フランスのヨーロッパブナと、(e) フランスのカイガンショウ。樹種の違いをくらべる実験である。(d) にみられる大きなチューブはラベリング中のチャンバー内の温度上昇を抑えるための空調システムである。

測定することになり、同位体比赤外分光法（IRIS）や、同位体質量分析計（IRMS）が用いられる。具体的な手法については檀浦ら（2016）を参照されたい。

^{13}C パルスラベリングは森林炭素循環研究にどのような視点を与えうるか

^{13}C をパルスで与える利点は、与えた時間が正確にわかるため、いつ固定された炭素であるかが特定されることである。この利点を森林炭素循環の観点から見ると、いくつかの面白い知見が得られる。

1）移動速度

ある部位で自然状態より多い ^{13}C が検出されれば、炭素の移動時間を計算することができる。たとえば、幹の上部 10 m の高さで ^{13}C を付加してから 3 時間後に ^{13}C が検出され、幹の下部 1 m の高さで 12 時間後に検出されたとすると、9 m を移動するのに 9 時間かかったことになり、時速 1 m で炭素が移動したことになる。

この移動速度は、幹においては、樹種により異なるだけでなく、温度や樹木のサイズが影響を与えていることが報告されており（Dannoura *et al*. 2011）、同じ高さの木であっても、光合成産物が土壌に到達する時間は異なるということを示している。

2）平均滞留時間

^{13}C パルスラベリングにより、あるコンパートメントに滞在する時間が推定できる。コンパートメントは、たとえば葉、幹、根などの器官全体や、その中の糖などの各要素であっても、貯蔵や成長という機能であっても、また幹呼吸や土壌呼吸などの気体であってもかまわない。図 –1 はあるコンパートメントにラベリングにより付加された ^{13}C（Excess^{13}C、xE（^{13}C））の時間変化を示したものである。あるコンパートメントに ^{13}C が入り、出て行く様子を、ロジスティック関数にしたがって上昇し、指数関数にしたがって減少する式を含む以下の数式を用いるとよく表現できる（Dannoura *et al*. 2018）。

$$x^E(^{13}C) = a \times \frac{\exp\left(\frac{t-b}{\tau}\right)}{1+\exp(-c\times(t-b))}$$

ここで、t はラベリング後の時間である。またこの式の τ は、そのコンパートメントにおける ^{13}C の平均滞留時間を示す。この平均滞留時間は、森林生態系のコンパートメントの中にどのくらい滞在しているかを示すので、炭素循環研究に重要な時間の概念をもたらすことができる。環境要因にどのように応答するかについても答えることができ、たとえば乾燥条件では、葉（Ruehr *et al*. 2009）や、幹呼吸（Dannoura *et al*. 2018）、土壌呼吸（Barthel *et al*. 2011）の平均滞留時間が遅くなることが示されている。

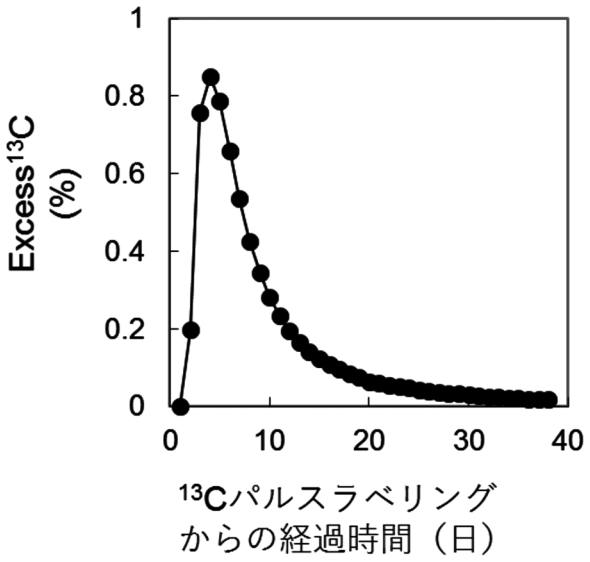
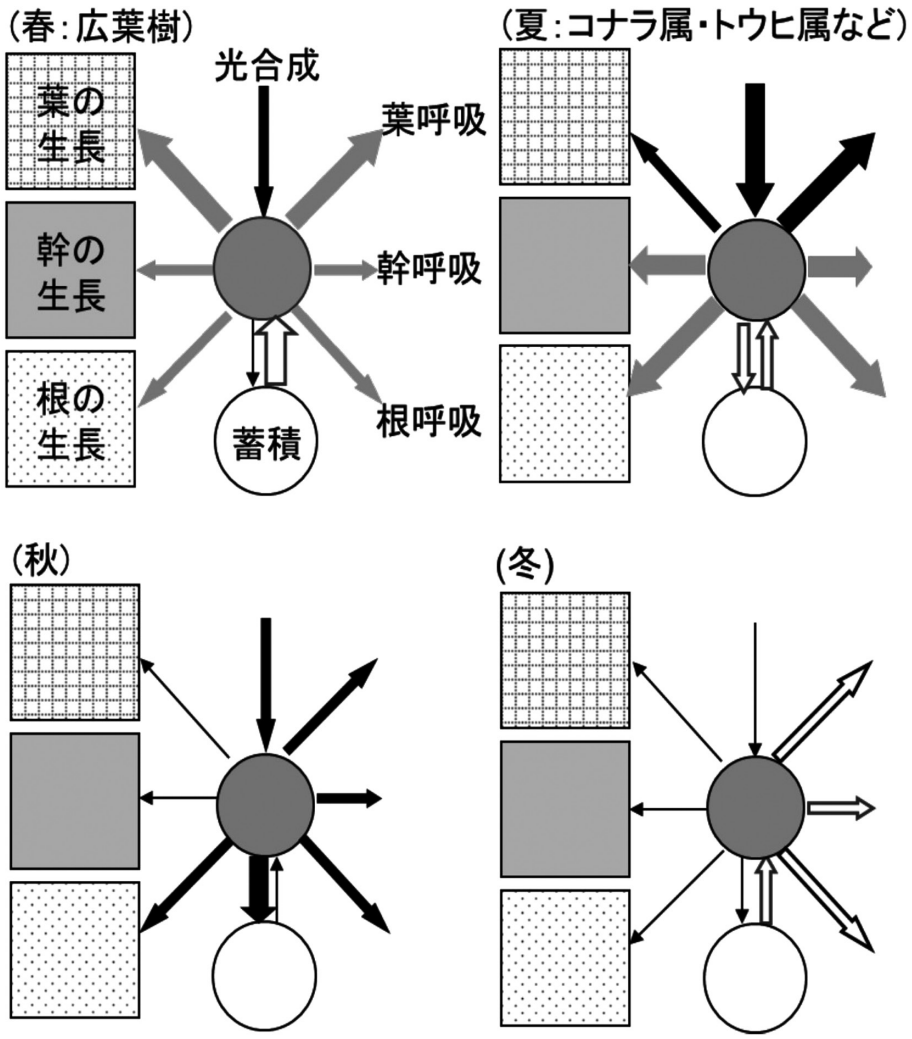


図 –1　あるコンパートメントにラベリングにより付加された ^{13}C（Excess^{13}C）の時間に伴う変化。ラベリング開始後、ある時間（タイムラグ）を経てコンパートメントに到達した ^{13}C は、上昇し、ピークを経て、減少していく。タイムラグは、最も早くラベリングによる ^{13}C が到達した時間、ピークは最も多くの ^{13}C が到達した時間である。ピークにいたるまでの時間は、炭素固定器官である葉では 0 であり、枝、幹、根と葉から距離のある器官にいくにしたがって長くなる。

3）炭素配分

常緑樹も落葉樹も、春になると新しく葉をつける。この葉を形成する炭素はどこから来ているのであろうか？種子や実には豊凶やマスティングがある樹種もあるけれども、これらをつくるための炭素はいつ獲得された炭素なのだろう？このような疑問に答えるためにも ^{13}C パルスラベリングは有効である。図 –2 は ^{13}C パルスラベリングにより得られた知見をまとめたものである。たとえば Hoch *et al*.（2013）は、葉や花には辺材のデンプンに貯蔵していた古い炭素を、果実には当年に葉で生産された新しい炭素を使い分けることを示している。常緑樹において当年の葉は光合成産物を自分の葉のために使い、1 年目の葉はそれを他の器官に使うために葉の外に出していることも示されている（Desalme *et al*. 2017）。また、Endrulat *et al*.（2010）は、細根のセルロースに分配された ^{13}C から、細根が生産されるときには新しい炭素がすぐに使われることを示している。これらの研究のように、獲得された炭素をすぐに使われる糖や、貯蔵物質であるデンプンなどの非構造性炭素と、植物体を構成する構造性炭素にわけて解析すると、炭素の使われ方を詳細にみることができる。



図–2　炭素配分の季節変化（Epron *et al.* 2012 から抜粋・改変）。黒い矢印は新しく獲得した炭素、白い矢印は貯蔵から持ち出された古い炭素、灰色の矢印は両方の混合を示す。矢印の太さはシンクまたはソースの強度を示している。落葉樹では春に葉をつけるのに、大部分が貯蔵からもちだした炭素を使う。このとき幹、根の生長や呼吸は主に貯蔵からまかなわれている。夏には、葉の成長はほとんどの樹種でとまる。幹と根の生長と呼吸は主な炭素シンクであり、それらにはコナラ属やトウヒ属では、新しい炭素と古い炭素の両方が使われる。秋には、新しい炭素は貯蔵に投資される。そして冬の間は、光合成と生長はゼロ（落葉樹）であり、呼吸は貯蔵からまかなわれて続けられる。

また、^{13}C パルスラベリングで樹木がどれだけの炭素を獲得したのかが明らかであれば、そのうちのどれくらいの割合がどのコンパートメントに配分されたかも計算できる（図–3）。たとえば、Epron *et al.*（2011）は、ブナにおいて、光合成産物のうち土壌呼吸に配分される炭素が、春や秋に比べて、夏では卓越しており、20%程度になることを示している。このように、樹木内の炭素配分は季節によって変化する。^{13}C パルスラベリングは、新しく獲得された炭素と、蓄積されていた古い炭素とが、樹木の中でどのように配分されるかをしらべるのにも有効である。

山城の測定結果が示すもの

山城試験地における森林の炭素循環研究は、タワーフラックスを用いた微気象学的手法に、森林を構成する各要素からの CO_2 フラックスを測定するためのチャンバー法と、生態学的積み上げ法を組み合わせて研究されてきたが、大きな変動を示す土壌呼吸や、それらに影響を及ぼすリター・土壌・地下部動態はなおブラックボックスである。そこで、山城試験地で ^{13}C パルスラベリング実験を行ない、細根呼吸に配分されるまでの時間が季節ごとにどのように変化するのか、また炭素配分はどの程度なのか、などを調べた結果を紹介する。

炭素の移動速度の季節変化をみるために ^{13}C パルス

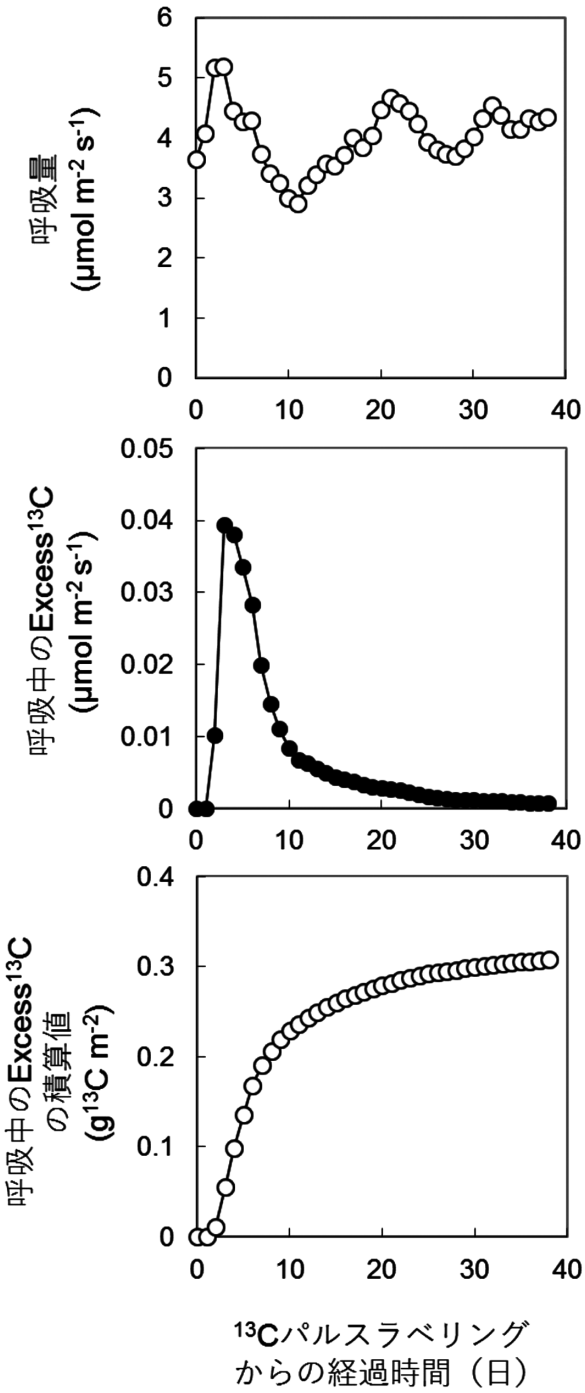


図 –3　呼吸量の日平均値（上）と、Excess^{13}C を用いて算出した、呼吸中に含まれる 13C パルスラベリングによって付加された 13C（中）。この値を積算すると、あるコンパートメントに配分された ^{13}C 量になる（下）。



写真 –2　山城試験地のコナラの枝を対象とした ^{13}C パルスラベリングの様子。コナラ全体を覆う足場（写真右）を利用して、枝にラベリングチャンバーを設置した（写真左）。



写真 –3　山城試験地でコナラを対象に行なった ^{13}C パルスラベリングの様子。樹冠全体を覆うチャンバーをかぶせた。とても多くの人たちが協力してくれた。

ラベリングを、同じ個体の同じ枝を対象に 7 月から 11 月にかけて 7 回実施した（写真 –2）。幹呼吸や細根呼吸を測定するためのチャンバーを設置し、それらのチャンバーを同位体比赤外分光計（EnviroSence-2050、Piccaro、USA）に接続し、呼吸に含まれる $^{13}CO_2$ の割合を測定した（図 –4）。光合成産物が幹をとおり、細根から呼吸として放出されるまでにかかる時間は、夏から秋にかけて遅くなっていった。夏には細根呼吸として検出されるまでに 1 日程度（22.4 時間）かかり、そのピークは 40 時間後であったが、秋になると 2 日以上（56.3 時間）かかり、そのピークは 100 時間後であった。平均滞留時間は夏は幹でも根でも数日と同じ程度であったが、季節が進むにつれ長くなり、幹では最大 80 日程度

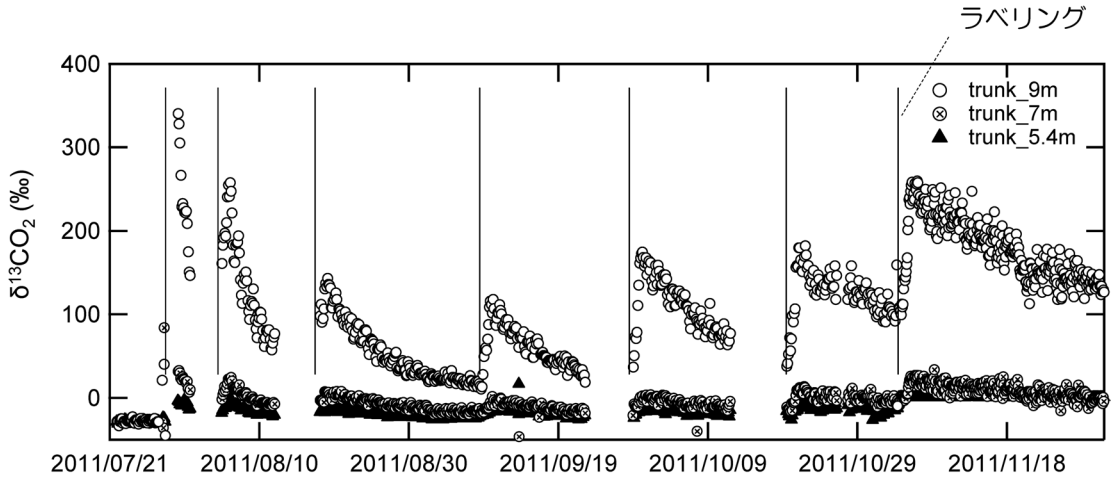


図 –4　山城試験地で行なわれた、コナラの枝を対象とした ^{13}C パルスラベリング実験で得られたグラフ。7 回のラベリングのあと、幹呼吸から放出された $\delta^{13}CO_2$（標準物質との偏差であらわす）の時系列変化を示している。ラベリングを行なった後、$^{13}CO_2$ が上昇し、徐々に減衰しているのがわかる。

にもなった。

また、11 月の落葉前に、樹冠全体を対象にした ^{13}C パルスラベリングを実施した(写真 –3)。メッシュを使って細根の進入を防ぎ、菌糸だけが入れるような仕掛けをしたチャンバーを作り、菌糸呼吸の測定も試みた。光合成産物が細根・菌糸の呼吸として検出されるまでの時間はほぼ同じで、34.5 時間、そのピークは 127 時間後であった。平均滞留時間は、幹呼吸の 28.2 日に対し、細根呼吸では 8.4 日、菌糸呼吸では 7.6 日であった。このことから秋に獲得された光合成産物は幹では長くとどまっているが、細根や菌糸では配分されると 1 週間程度ですぐに使われるということが明らかになった。この細根・菌糸呼吸を 18 日間連続測定して、放出される $^{13}CO_2$ 量を積算した結果、^{13}C パルスラベリングで与えられた炭素の 1-2% が細根・菌糸呼吸に配分されていると推定された。

このように、光合成で獲得された炭素は数日かけて樹木の地下部細根へと移動する。この移動にかかる時間は夏から秋にかけてゆっくりになっていく。寒くなると炭素は幹にとどまり、細根への配分をしぶっているようにもみえる。幹における平均滞留時間が秋になると長くなるのは、光合成で獲得された炭素が、蓄積のために幹にとどまっている様子を示していると考えられる。

今後の展望

^{13}C パルスラベリングは、樹木がいつ獲得した炭素が、樹体内のどのような経路をどれくらいの時間をかけてめぐり、樹体外に放出されるまでの時間を教えてくれる。これらは森林炭素循環研究に、炭素の滞留時間という概念を組みこむことを可能にする。また、樹木が環境に対して、たとえば温度上昇や、乾燥、食害・虫害などのストレスに、どのように対応するのかを研究するよいツールともなる。またラベリングされた落葉を使えば土壌内での分解過程の炭素動態を調べることもできる。アイデア次第で、森林炭素循環における様々な疑問を解決する手法である。

これらの研究は JSPS 科研費 22780146、24380080、鉄鋼環境基金の助成をうけておこなわれた。

引　用　文　献

Barthel M, Hammerle A, Sturm P, Baur T, Gentsch L, Knohl A (2011) The diel imprint of leaf metabolism on the $\delta^{13}C$ signal of soil respiration under control and drought conditions. New Phytol. 192: 925–938

Dannoura M, Epron D, Desalme D, Massonnet C, Tsuji S, Plain C, Priault P, Gérant D. (2018) The impact of prolonged drought on phloem anatomy and phloem transport in young beech trees. Tree Physiol. tpy070

Dannoura M, Maillard P, Fresneau C, Plain C, Berveiller D, Gerant D, Chipeaux C, Bosc A, Ngao J, Damesin C, Loustau D, Epron D (2011) In situ assessment of the velocity of carbon transfer by tracing ^{13}C in trunk CO_2 efflux after pulse labelling: variations among tree species and seasons. New Phytol. 190: 181-192

檀浦正子・種子田春彦・小林　剛（2016）炭素安定同位

体パルスラベリングを用いて樹木の師液流を測定する．日本生態学会誌 66: 501–513

Desalme D, Priault P, Gérant D, Dannoura M, Maillard P, Plain C, Epron D (2017) Seasonal variations drive short-term dynamics and partitioning of recently assimilated carbon in the foliage of adult beech and pine. New Phytol. 213: 140–153

Endrulat T, Saurer M, Buchmann N, Brunner I. (2010) Incorporation and remobilization of ^{13}C within the fine-root systems of individual Abies alba trees in a temperate coniferous stand. Tree Physiol. 30: 1515–1527

Epron D, Bahn M, Derrien D, Lattanzi FA, Pumpanen J, Gessler A, Hogberg P, Maillard P, Dannoura M, Gerant D, Buchmann N (2012) Pulse-labelling trees to study carbon allocation dynamics: a review of methods, current knowledge and future prospects. Tree Physiol. 32: 776-798

Epron D, Ngao J, Dannoura M, Bakker MR, Zeller B, Bazot S, Bosc A, Plain C, Lata JC, Priault P, Barthes L, Loustau D (2011) Seasonal variations of belowground carbon transfer assessed by in situ $13CO_2$ pulse labelling of trees. Biogeosciences 8: 1153–1168

Hoch G, Siegwolf RT, Keel SG, Korner C, Han Q (2013) Fruit production in three masting tree species does not rely on stored carbon reserves. Oecologia 171: 653-662

Ruehr NK, Offermann CA, Gessler A, Winkler JB, Ferrio JP, Buchmann N, Barnard RL (2009) Drought effects on allocation of recent carbon: from beech leaves to soil CO_2 efflux. New Phytol. 184: 950–961

炭素収支における光合成―呼吸応答研究の現状と展望

吉村　謙一（よしむら　けんいち、山形大学農学部）

はじめに

乾燥重量ベースで考えると樹木のからだの大部分は炭素・酸素・水素でできており、そのほとんどが光合成に由来する物質である。光合成産物が樹体内に蓄積されることにより樹木は成長することができる。成長のよい樹木は単位時間あたりの光合成産物の蓄積スピードが高い樹木だと表現することができ、現存量の多い大きな樹木は一生の間でからだに光合成産物をたくさん貯め込んだ樹木だと表現することができる。

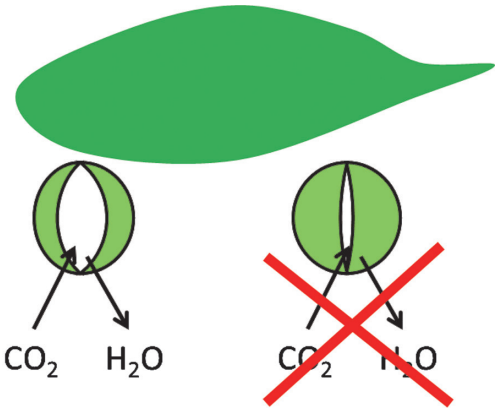
樹木は葉で光合成をおこない、糖を生成する。その糖は篩液として葉から枝、幹、根と各器官の細胞内に運ばれる。細胞内に運ばれた糖のうち一部は代謝に用いられる。その際、呼吸活動により二酸化炭素として大気中に再び放出される。残りの糖はデンプンやセルロースなどの形で蓄積され、この量が成長量に相当する。したがって、光合成量は呼吸量と成長量の和にほぼ等しいといえる。そのため、光合成量が同じだった場合、呼吸量が多ければ成長量は低下し、逆に呼吸量が少なければ成長量は増加する関係にあると考えられる。光合成産物を用いて最大限に成長しようとすれば呼吸の割合を抑制すればよい。しかし、呼吸自体はいわば樹木が生命活動をおこなう上で欠かせない現象であることから、呼吸を抑制しすぎると樹木の生死に関わることになるかもしれない。そのため、どちらかに偏ることはなく呼吸と成長にバランスよく光合成産物を配分しているのではないかと考えられる。

光合成や呼吸は樹木生理学的な観点で測定されることが多く、成長量は造林学や森林生態学的な観点で測定されることが多かった。しかし、実際には光合成・呼吸・成長には密接な関係があるため、これらを結び付けることにより、樹木生理学的視点から森林の生態を説明することや、逆に森林生態学の立場からより細かい生理現象をみることが可能となる。そこで、本稿では樹木個体内における炭素の流れに注目し、光合成・呼吸・成長の３者関係を整理し、今後の展望について述べることとする。

光合成の環境応答

光合成は葉が大気中の二酸化炭素を取り込んで糖を合成する現象であり、光エネルギーを化学エネルギーに変換する光化学反応と化学エネルギーを使って二酸化炭素の固定をおこなうカルビン回路から成り立っている。光がなければ光化学反応が起きないので、低光量のときに光合成速度は低下し、光量と光合成速度の関係は比例関係にある。また、カルビン回路は葉内の二酸化炭素を基質としているため、光が充分にある状態では光合成速度は葉内の二酸化炭素濃度との関係が強い。これらの関係性は後述する呼吸の環境応答に比べると明瞭である。光合成は光や二酸化炭素を材料とした化学的プロセスによって成り立っており、環境要因によって説明できることを示している。このように、光合成の環境応答に関する研究は進んでおり、個葉レベルから森林全体レベルまでをつなげる光合成モデルが考案されている（たとえばBaldocchi and Wilson 2001）。

乾燥ストレスを受けると葉からの水分損失を防ぐために気孔を閉鎖する。気孔を閉鎖すると大気中からの二酸化炭素を取り込めなくなるため、葉の内部の二酸化炭素濃度は低下する。そのため、乾燥ストレスにより光合成速度は低下する（図–1）。また、酵素反応には最適温度域があるため、最適温度よりも高温や低温状態では光合成速度は低下する。このように、光条件以外にも温度や乾燥といった気候条件の変化によって光合成速度は変化



図–1　気孔が閉まると光合成も蒸散もできなくなる

することが知られている。

光合成の環境応答が樹木成長の環境応答に関係することは容易に想像できる。例えば、乾燥ストレスを受けた個体では光合成速度は低くなるが、乾燥ストレスを受けた個体の成長も抑制される。光が不足する環境下に生育する個体でも光合成の低下および個体の矮化がみられる。しかし、後述するように呼吸を含めて個体レベルの炭素収支を考慮する必要があり、光合成と成長を直接結びつけて考えることには注意が必要である。

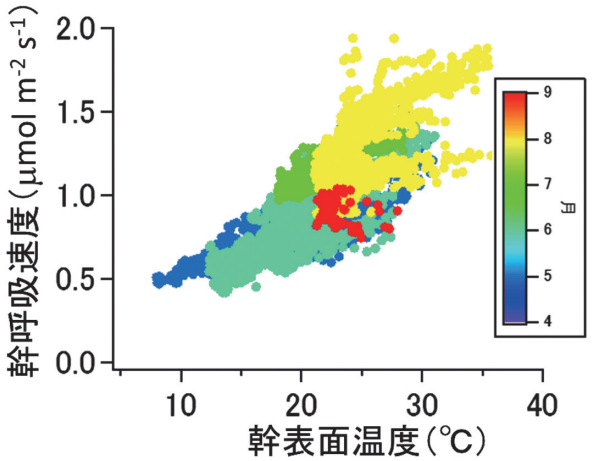
呼吸の環境応答

樹木だけでなく生物が生きていくためには呼吸活動は欠かせない。呼吸活動は糖を分解して生命エネルギーの通貨であるATP（アデノシン三リン酸）を得るプロセスであり、呼吸が低下すると生命活動に支障をきたすようになると考えられる。光合成はほぼ葉のみで行われるのに対し、呼吸は葉・枝・幹・根といった生きている全器官でおこなわれている。器官ごとに重量あたりの呼吸速度を比較すると、酵素活性が高い葉で最も呼吸速度が高く、死細胞の割合が高くほぼ通道と支持機能しか担っていない幹では呼吸速度が低い。

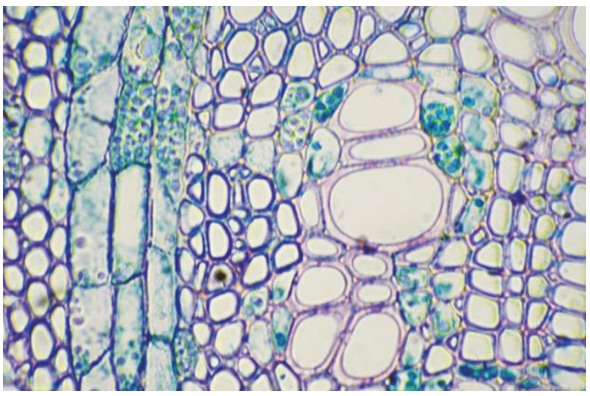
呼吸速度の環境応答に関するこれまでの知見として、温度の影響を受けていることが知られている。これは生命活動に欠かせない酵素の活性が温度影響を受けるためである。しかし、呼吸の温度依存性の説明精度はあまりよくなく、温度―呼吸速度の関係は大きくばらつく（図–2）。また、光合成では光や水、二酸化炭素濃度等の環境要因で説明されているが、呼吸に関しては温度でしか表現されていない。その１つの理由として、呼吸に関する研究例は光合成に関する研究例に比べると圧倒的に少なく、特に野外研究者にとって呼吸現象の理解は充分に進んでいないことが挙げられる。また、もう１つの理由として、光合成は比較的単純な化学プロセスの組み合わせによって成り立っているが、呼吸はATP要求量などの生物学的プロセスによって成り立っており、とても複雑であることが挙げられる。いずれにしても、樹木呼吸の環境応答に関する知見は充分ではなく、さらなる研究が必要である。

細胞レベルからみた樹木呼吸

生きている樹木の中で生きた細胞はごくわずかであり、樹木の大部分が死んだ細胞で構成されている（図–3）。生きている細胞は呼吸によってATPを生成するが、死んだ細胞は呼吸活動をおこなわない。したがって、生きている細胞の割合が多い樹木では単位重量もしくは体積あたりの呼吸量が高いことが予想される。実際に針葉樹であるスギと広葉樹であるコナラの枝の呼吸を測ってみるとコナラのほうが呼吸速度が高く（図–4）、これは針葉樹に比べて広葉樹のほうが一般に柔組織（木化していない生きている組織）が発達していることと関連しているかもしれない。



図–2　幹呼吸速度と温度の関係性



図–3　枝の細胞構造
枝組織をファストグリーン・サフラニンで二重染色後、顕微鏡観察した。紫色に染色された細胞は繊維や道管等死んだ細胞であるため、呼吸しない。緑色に染色された細胞は生きた細胞であるため呼吸する。また、緑色に染色された細胞の中に蓄積されたデンプンの粒を観察することができる。

幹の中で放射組織とよばれる組織の中にある生きている細胞は呼吸活動をおこなう役割だけでなく、呼吸基質となる糖・デンプンの貯蔵の役割も担っている。糖・デンプンが少なければ呼吸速度は低下する可能性がある。また、大木は貯蔵器官が大きく大量の糖・デンプンを貯蔵できるが、稚樹は貯蔵器官が小さく、貯蔵できる糖・デンプン量が少ない。そのため、実生では大木に比べると貯蔵物質の枯渇による呼吸速度の低下が起こりやすくなると考えられるが、本当に貯蔵物質の量の変化と呼吸の変化が追従するのかについてはさらなる実験により検証する必要がある。

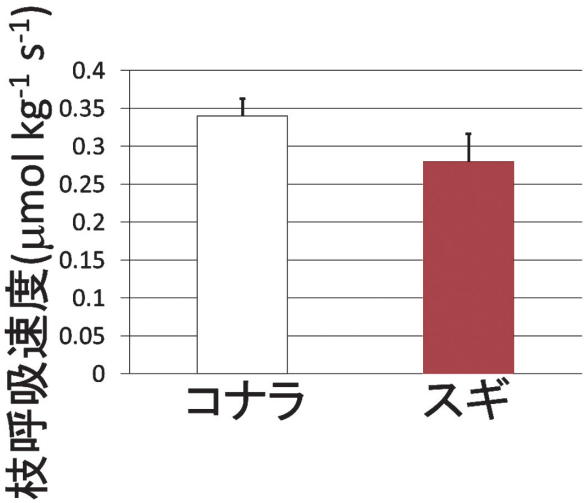


図 –4　コナラとスギの枝の呼吸速度

幹を輪切りにしてみると表皮近くに篩部や形成層といった生きている細胞が多い部分があり、内部にいくにしたがって生きている細胞の割合が低くなる傾向にある。そのため、呼吸活性のある生きている細胞の分布は幹呼吸の温度依存性を考える際に重要な問題になる。太陽光による温度上昇や大気中への放熱は幹の表面で生じる。幹の表面付近は昼夜の温度変化が大きく、幹の内部では温度変化は小さい。幹の中で深さに沿って温度勾配が生じるため、温度と呼吸量の関係を調べる際に幹の温度をどこで測定するのかという問題に注意を払う必要がある（図 –5）。仮に細胞の呼吸速度が完全に温度との指数関数で表される関係だったとした場合でも、幹の表面の温度を用いて温度—呼吸関係を表現してしまうと、内部の細胞の呼吸は見かけ上温度依存性が小さいようにみえてしまう。同じようなことは深さ方向のどの部位の温度を幹温度として用いても起こりうる。したがって、表面の細胞から内部の細胞までの呼吸を全部合わせた幹呼吸と幹温度の関係をみようとすると、どうしても指数関数の式からバラついてしまう。

幹呼吸を測定する際には幹の内部での二酸化炭素の拡散についても考える必要がある（Trumbore *et al.* 2013）。幹の内部には細かな細胞が詰まっており、幹の内部の二酸化炭素の拡散効率は低い。たとえ内部の細胞が呼吸活動をしていても、そこで生成された二酸化炭素が幹表面に放出されるまで時間がかかるため、細胞の呼吸活動と測定の間にタイムラグが生じる。また、木部道管を流れる樹液流に溶け込む可能性も指摘されており、幹表面からの二酸化炭素放出量は細胞レベルでの呼吸活性を必ずしも適切に表現しているとはいえず、幹呼吸速度を細胞の代謝活性とみる際の大きな課題の 1 つである（図 –6）。

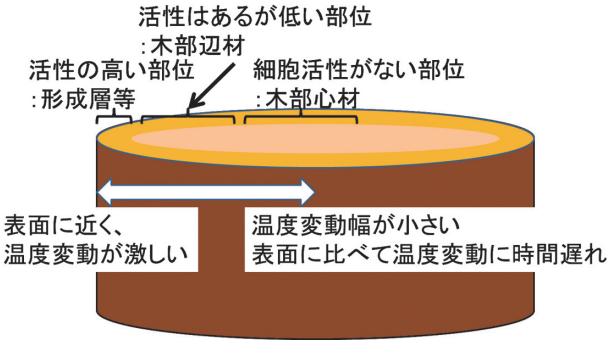


図 –5　幹の表面付近と内部の呼吸活性および温度の分布

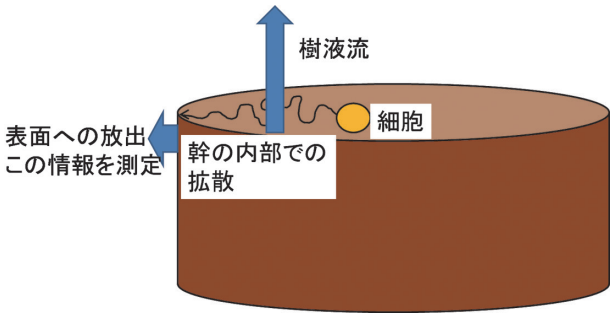


図 –6　幹内部細胞の呼吸が表面に現れるまで

光合成と呼吸の関係

放射組織への糖・デンプンの蓄積は幹や枝の呼吸速度に大きな影響を及ぼすと考えられるが、その糖・デンプンは光合成由来であるため、葉の光合成速度が枝や幹、根の呼吸速度に影響を及ぼす可能性がある。光合成により葉で合成された糖は篩部輸送により枝や幹、根といった各器官に運ばれ、そこで呼吸や成長に利用される。したがって、昼に光合成をして夜間に光合成が止まるといった日変化パターンや、雨の日には光合成速度が低く晴れの日には光合成速度が高いといった天候による光合成速度の変化は枝や幹、根の呼吸速度に変化を引き起こす可能性がある。図 –7 はソヨゴ成木における光合成速度と幹呼吸速度の変化パターンを示している。呼吸速度の変化パターンは温度の変化パターンから大きくずれていることがわかる。この理由の 1 つとして、呼吸速度の変化には光合成速度の変化パターンが影響していることが挙げられる。光合成産物の流れは光合成速度の変化パターンから時間遅れが生じるので、呼吸速度の変化パターンは光合成の変化パターンからタイムラグがありながら追従すると解釈することが可能である。

貯蔵組織の大きさも光合成と呼吸の関係性に寄与していると考えられる。アラカシの当年生実生を用意し、組織内の貯蔵養分が充分使われて炭素枯渇気味の状態に保つために 1 週間程度暗黒下で育てた。その後、12 時間ごとに光の照射・消灯を繰り返す実験をおこなった。この測定条件は当年生実生という貯蔵組織があまりない樹

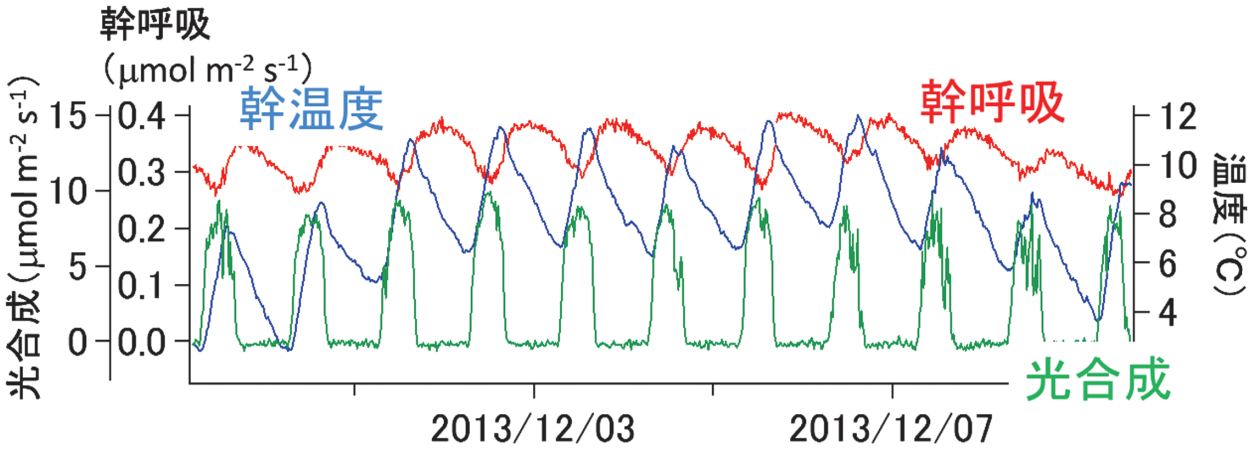


図 –7　幹呼吸・光合成・温度の関係

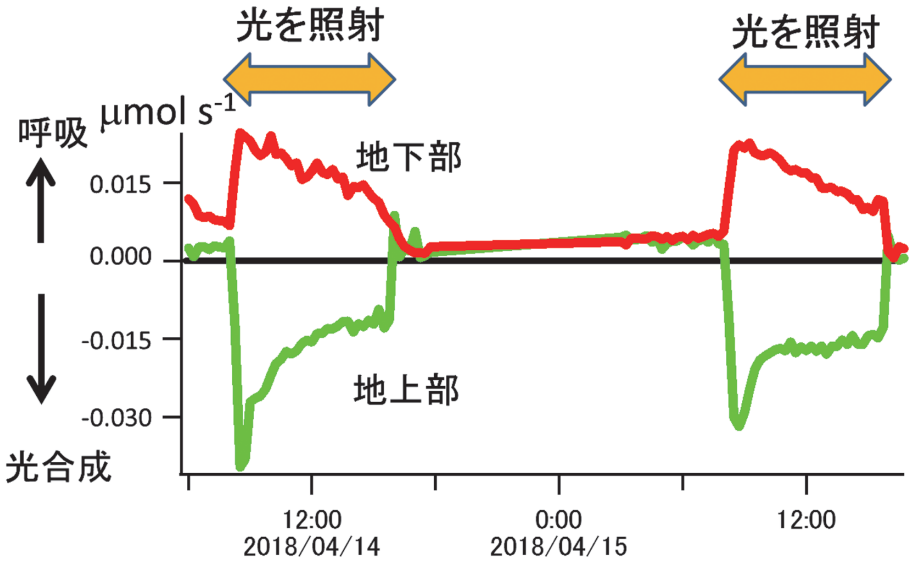


図 –8　実生における地上部・地下部炭素収支

木を用い、炭素枯渇気味の状態であるとみなせる。すると、根呼吸は光を照射した時間帯で高く、消灯した時間帯ではゼロに近くなっていた（図 –8）。光照射によって温度にほぼ影響がなかったため、この根呼吸の変化は温度影響ではなく、光合成影響が強いと考えられる。この変化パターンは図 –7 の変化パターンと比較しても極端な変化であり、貯蔵組織が少ない樹木の呼吸は直近に生成された光合成産物への依存度が高いことが示唆される。

光合成速度自体は光や温度、水分量などの影響を受けることから、呼吸速度も時間遅れをもちながらこれらの影響を間接的に受けると考えられる。また、樹木の呼吸は温度だけでなく直近に光合成によって生産された糖量にも依存するのではないかとも考えられる。こうした要因が呼吸速度が温度だけで説明できない一要因になっていると考えられる。

樹木成長の環境応答

光が当たらない暗い環境に生育する樹木は成長が悪く、乾燥ストレスがかかった樹木も成長が悪い。このように環境ストレスは樹木の成長を抑制することが知られている。1 年ごとの成長とその年の環境の関係を知るには、樹木の年輪を数え、各年の年輪幅を測定し、年輪幅と環境の関係をみることによって明らかにすることができる。このような解析により、曇りが多く日照時間が少ない年には成長が悪い、もしくは雨が少なく乾燥した年には成長が悪いといったことが分かるかもしれない。

乾燥ストレスがかかると気孔が閉鎖し、葉の中の二酸化炭素濃度が低下することにより光合成は低下するが、この際に葉の中の炭素の同位体組成に変化が生じる。炭素には質量数 12 と質量数 13 の 2 種類の安定同位体がある。光合成反応には軽い 12 の炭素が用いられやすいため、通常の光合成産物は質量数 12 の炭素を多く含有する。しかし、気孔の閉鎖により葉内の二酸化炭素濃度が低下すると質量数 13 の炭素の割合が高くなるため、

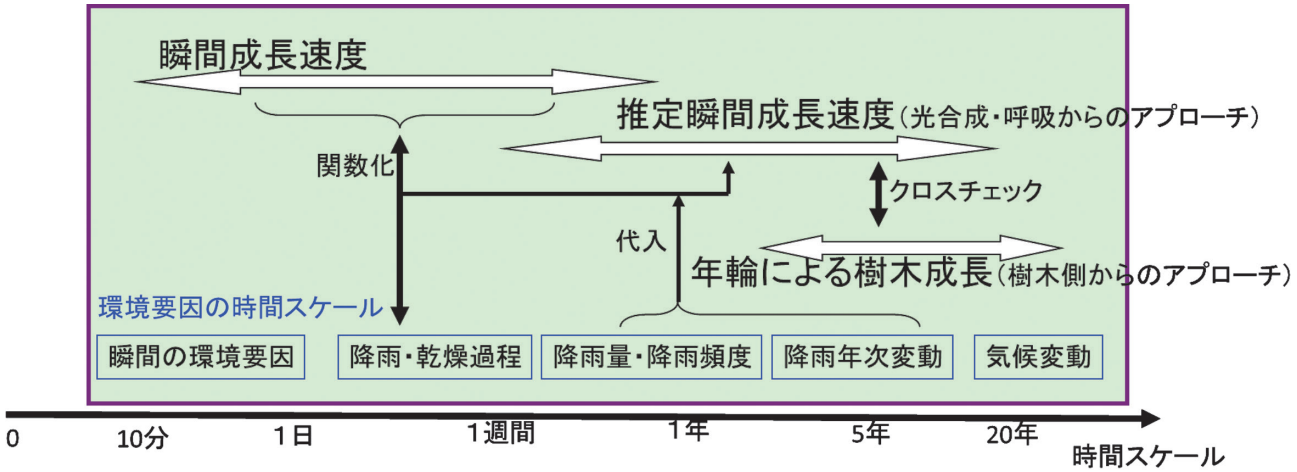


図 –9　瞬間成長と長期成長をつなげる

光合成にも質量数 13 の炭素が用いられるようになり、光合成産物も質量数 13 の炭素の割合が高くなる。そのため、年輪ごとの炭素安定同位体比を調べることにより、大まかに年ごとの乾燥ストレスの変化を捉えることが可能となる。

光合成・呼吸・成長の環境応答

光合成と呼吸の差分を成長と表現することができるが、生理学的測定で測定される光合成速度や呼吸速度は瞬間値であることから、光合成速度と呼吸速度の差分で表現される成長速度を瞬間的な成長速度とみなせる。光合成や呼吸は環境条件との関係性も表現することができるため、樹種や環境要因等によって樹木成長の違いが生じるプロセスについて説明することができる。

年輪等を用いて測定された成長速度は光合成・呼吸といった生理学的測定と比べると樹木ごとに成長差が生じるメカニズム等を表現することができないが、一方で長期的な成長については表現できる。そのため、光合成・呼吸から求めた瞬間的な成長速度と長期的な成長速度を組み合わせることにより、樹木成長を瞬間値から数十年のスケールまでつなげることができる。そうすることで互いの短所を埋め合わせることが可能になり、どういった要因によって成長が抑制されているか？という生理学的な疑問に答えつつ、この成長パターンは森林の動態にどのような寄与をもたらすのか？という問いにつなげることができると考えられる（図 –9）。

森林の遷移は一般的に初期成長が高い遷移初期種が繁茂し、のちに遷移後期種が追い越すというように説明されている。遷移初期種の初期成長はよいが、なぜ早い段階で成長が停止するのか？遷移後期種の成長パターンは林床面とギャップでどのように異なるのか？といった問いには答えることができていない。光合成・呼吸を用いると樹木成長が生育段階によってどのように異なるのかを生理学的観点から明らかにできる。ほかにも、立地条件等によって樹木成長が異なる場合でも光合成・呼吸の変化パターンから成長抑制の要因を明確にすることができ、その抑制要因を解決することで成長を促すことが可能になる。

樹木の成長（この場合は重量成長）において、セルロースやリグニンといった樹木の骨格を構成する成分が増加する場合とデンプンなどの貯蔵物質が増加する場合がある。樹木の骨格を形成することによって樹木のサイズを増加させ、より急速な樹高成長が可能となる。一方で、貯蔵物質を増加させることによって、将来光合成ができなくなった場合でも呼吸できるよう、もしくは何らかの要因によって枝や根が脱落してしまっても再生できるよう光合成産物を備蓄することができる。このように、光合成産物の呼吸と成長への配分比だけでなく、成長のなかでも構造性・非構造性炭素へどのような割合で配分するかも樹種による生態学的性質を捉える上で重要であると考えられる（図 –10）。

樹木の生死と光合成・呼吸

樹木が枯死する要因の 1 つに炭素枯渇が挙げられる。なんらかの要因によって光合成が低下すると貯蔵糖分量が低下し、呼吸を維持できなくなることになり枯死につながる。枯死する前から光合成・呼吸を測っておけば光合成の低下や呼吸の低下などを示すことができ、どのようなプロセスで枯死するのか明らかにすることができる。造林の現場においても、苗が枯れるプロセスが分かっていれば植林後に苗をいかに枯死させないようにするのか対策を練ることが可能となる。

樹木は地上部が枯死した場合でも地下部が生き残っていれば萌芽によって再生する場合がある（図 –11）。そ

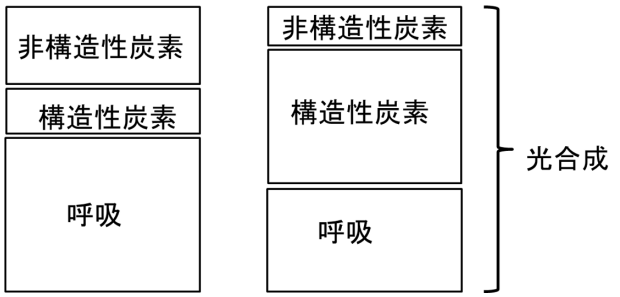


図 –10　樹種によって異なる光合成産物分配比

の際も地上部衰退後に地下部の貯蔵炭素および地下部の呼吸活性の状態が生き残るために重要な意味を持っている可能性が高い。また、人為的に伐採したのちに萌芽再生する場合についても同様である。外来樹木の駆除後に根萌芽により再生するケースがあり、外来樹木を管理する上で問題となっている。このように根萌芽をコントロールするためには蓄積と呼吸の関係を考慮したうえで適切な管理法を考えていく必要がある（図 –12）。

引　用　文　献

Baldocchi DD, Wilson KB (2001) Modeling CO_2 and water vapor exchange of a temperate broadleaved forest across hourly to decadal time scales. Ecol Modelling. 142: 155-184

Trumbore SE, Angert A, Kunert N, Muhr J, Chambers JQ (2013) What' s the flux? Unraveling how CO_2 fluxes from trees reflect underlying physiological processes. New Phytol. 197: 353-355



図 –11　父島のテリハハマボウ
枝枯れしていた個体が 2 年で復活していた。枝の中に蓄積した資源を用いて萌芽したと考えられる。



図 –12　インドネシアにおける外来種駆除
外来種を伐採してしまうと逆に萌芽によって増える可能性があり、コントロールすることの難しさがわかる。

森の休憩室 II
樹とともに　その 33

樹が動く進化を想像してみる

二階堂　太郎
（にかいどう　たろう、国立科学博物館　筑波実験植物園）



樹が枝を自在に動かしたり、人のように歩いたりしたら。そんな映像に力を注いだ映画が結構あるので幾つか紹介を。まずは「ハリーポッターと秘密の部屋」。大きい柳の樹が、子供二人を乗せた車を枝で絡み掴んでブンブンと振り回します。樹木に凶暴な動きをさせた描写が上手でした。次は「ロード・オブ・ザ・リング　二つの塔」。人型をした巨大樹木達がド派手な大立ち回を見せます。悪に仕える軍団を足で蹴散らす姿に生々しい迫力があって、手に汗を握りました。しかし彼らの正体は樹木を模した巨人だったので、ちょっと残念。本物の二足歩行樹木が登場するのは「ガーディアンズ・オブ・ギャラクシー」。樹木異星人が主人公達を絶体絶命の爆発から守るため、無数の枝を編むように生やして囲うシーンが秀逸でした。犠牲になったと思っていたら、細切れの枝から小さい体が芽生えて思わず涙。しかし、樹高（背丈）が 254 cm と高くなく、ついでに地球の樹木ではないのがまた残念。期待通りの映像と出会えたのは一昨年公開された「怪物はささやく」。主人公の家から見える墓地に立つイチイの巨樹が、夜中の定時に荒ぶる怪物の姿で現れ、３つの物語を語り聞かせます。破壊的な感情を主人公に当り散らす怪物、本当はどんな存在であるのかが分かっていく展開が深い。怒れる巨樹の躍動に満ちた映像があってこそ感動が高まる映画でした。では、樹木はどうしたら動けるようになるのでしょうか。仕組みに考えを巡らせてみましょう。

動く植物で有名なのは、マメ科草本のオジギソウ。振動を感じると左右に開いている葉を閉じ、茎をうな垂れます。曲がる仕組みは、動く部位の内側に位置する細胞の水分を減らして収縮させ、その水分で外側の細胞を膨張させる事にあります。それは樹木でも可能でしょうか。水分を利用した伸縮は、木部の外周を取りまく形成層ならば生きた細胞なので可能かもしれません。しかし、内側の硬い木部を曲げる事はできないでしょう。そこでもし、木部が上下できっぱり分断され、断面の片方は半球状になり、もう片方はすり鉢上になったなら。結果、そこが関節の骨格を成し、外側の形成層が筋肉の役割を得たら、ちょっとだけ曲るかもしれません。ちなみに木部の分断や関節の形成は、腐朽菌が上手にやってくれることを期待します。しかし人間のように歩けるまでには、色々と道が長そうです。

樹木の現実に意識を向け、今一度考えてみましょう。まず、移動中の水分欠乏に備えなければならないので、幹はバオバブのように水分を貯める太った形状になりそうです。また、バランスを崩しても倒れない為には、樹高を低く、そしてタコノキの「支持根」にならって「つっかえ根」が沢山必要です。肝心の移動方法は、進みたい方向の反対に位置する「つっかえ根」が地面を押すよう伸長成長したらどうでしょう。数さえあれば樹体を前へ動かす力を生むかもしれません。別方向へ進む時は「つっかえ根」の地面に刺さっている部位を腐朽で脱落させ、地面との繋がりを無くします。私の想像だと、低く太ったタコに枝葉を被せたような樹木が、一年で数センチだけズズズッと動いている様が見えます。

そもそも、樹が動こうとする理由はなんでしょうか。もし環境の良い場所へ移動して子孫を繁栄させるためならば、植物は既に良い手段を持っています。そう、種子散布です。植物は個体の移動が出来ずとも、種子をあちこちに飛ばし、数の勝負でその種にとっての良い場所を見つける事を繰り返しながら進化をしてきました。時にはあえて環境の厳しい所へ逃げたり、新天地で勢力を広げたり。その、個体よりも種の移動に力を入れてきた戦略を見るに、植物、特に樹木が何十年もかけて地に張った根を放棄して動くメリットはあまりないように思われます。しかし、動物などにくっ付いた状態で、芽生えから生涯を全うすることはあり得えそうです。それが互いに有利に働いて、いつしか共生関係を結んだなら、さらにその互いを混ぜ込むシステムが、菌類と藻類が共生している地衣類のように子孫へ受け継がれるようになったなら。もしかすると、葉緑素を持つ動物の誕生へ向かうかもしれません！

こんな風に進化を想像するのはとても楽しいのですが、実はこうも思っています。人の考えで進化をどこまで計れるのかと。出来る事と言えば、今の姿へ際限なく目を向けて、これまでに至った経緯や戦略を読み解く努力を続ける事だけではないかと。しかし、ウケ狙いで作られた映像や発想に対してであっても、そこへの可能性をあれこれ考える事は今の理解を深める一助になっているような気もします。そんな理由で、時に空想、時に妄想を織り交ぜながら、機会がある度に樹が動く進化を想像しています。

著者プロフィール
二階堂太郎：1970 年生まれ。山形大学農学部林学科修了後、新潟市の「らう造景」入社。後藤雄行氏に師事。現在は筑波実験植物園の技能補佐員。屋外と圃場の管理を担う。樹木医、森林インストラクター。著書「植物園で樹に登る」築地書館

シリーズ
森めぐり 40

トドマツ人工林の保持林業実証実験区

山中　聡（やまなか さとし、森林総合研究所北海道支所）

はじめに

現在日本に存在する人工林の多くは成熟期を迎えており、今後広い地域で主伐による木材生産が進むことが予想されます。ある区域のすべての木を一斉に伐採する皆伐は、効率的に木材生産ができる一方で、森林の構造や組成を極端に単純化させ、野生生物の生息地としての機能を損ない、水源涵養機能といった森林が発揮する様々な機能を一時的に大きく減少させると懸念されます。このため、森林の多様な機能を維持しつつ、木材を効率的に生産できる森林の伐採方法が今後の日本に求められると考えられます。

このような中で、近年、木材生産とそれ以外の森林の機能を両立させる森林管理手法として注目され、様々な国でその効果の検証や実際の林業への導入が行われているのが保持林業です[1)]。本稿では、北海道庁と北海道立総合研究機構林業試験場、北海道大学農学部森林科学科、森林総合研究所が共同で実施している保持林業の実証実験（REFRESH: Retention Experiment for Plantation Forestry in Sorachi, Hokkaido）の概要と、そこで行っている学術調査について紹介します。

保持林業とは

保持林業とは、「伐採前にその森林がもっていた重要な構造やそこに生息する生物を伐採後も長期にわたって残す森林管理」と定義されます[2)]。伝統的な木材生産ではどのような木を収穫するかに着目してきたのに対し、保持林業では、どのような森林の構造を伐採地に残すのかに着目します[2)]。伐採の際に残す森林の構造としては生立木や枯損木などが挙げられます。また、木を単独で残す単木保持や、木々をまとめて残す群状保持など、残す森林の構造の配置にも様々なパターンが存在します。

実験区の概要

当実験は、北海道札幌市から北東に約 80 km の芦別市と深川市、赤平市にまたがるイルムケップ山（標高 864 m）とその周辺の道有林で行われています。当地域の気温は 8 月平均で 21.5℃、1 月平均で－ 6.6℃、年平均降水量は 1092.5 mm、冬の積雪は 1.5 ～ 2 m ほどです。この地域には人工林が多く存在しており、その 80% がトドマツ林です[3)]。伐期に近づいた高齢のトドマツの人工林には、ダケカンバやウダイカンバ、シナノキなどの広葉樹が侵入・混交しており、それらの広葉樹は林冠に届く程度まで大きくなっているものもあります。また、これまで森林伐採が行われてこなかった森林は、シナノキやミズナラ、イタヤカエデなどが優占する広葉樹天然林となっています（写真 –1）。

この地域の 50 年生以上のトドマツ人工林と広葉樹天然林（1 林分 5 ～ 9 ha）に、全ての木々を伐採する皆伐区や、伐採を行わないトドマツ人工林区と広葉樹天然林区を含む計 8 つの処理区を設定しました（表 -1、写真 –1）。保持林業に関わる処理としては、人工林内に侵入・混交した広葉樹を単木で残す単木保持と伐採地の中心にトドマツ林をまとめて残した群状保持を行っています（写真 –1）。また単木保持では、残す広葉樹の本数を変え、保持する量の違いによる影響も検証できるように設定しています。伐採地に残された広葉樹は、胸高直径 20 ～ 30 cm ほどのダケカンバやウダイカンバが中心ですが、ところによっては胸高直径が 60 cm を超える高齢木も残っています（写真 –2）。これら 8 つの処理区はそれぞれ 3 つの繰り返しが設定されており、2014 年から順次伐採と地拵え、トドマツの植栽が行われています。

学術調査

当実験区では伐採 1 年前の 2013 年から、様々な学術調査を行っています。生物多様性に関しては、草本類や鳥類、昆虫類の種数や個体数が伐採の前後でどのように変化するのかを調査しています。これにより、どのくらいの量、どのような配置で伐採地に木々を残すことが、野生生物の生息地を最も効果的に維持することに繋がるのかを検証しています。また生態系サービスに関しては、保持林業が伐採地下流の水質や土砂流出量に与える影響などの水源涵養機能との関係性などを調査しています。また保持林業を実施した際の作業効率や、残した木々の下に植栽された苗木の成長率といった木材生産コストの調査も行っています。



写真 –1　各処理区のようす。大量単木保持区（左上）、皆伐区（右上）、広葉樹天然林区（左下）、群状保持区（右下）。

表 –1　処理区一覧

処理	内容
1. 皆伐区	全ての木を伐採
2. 少量単木保持区	人工林内に侵入した広葉樹を単木で残す（10 本 /ha）
3. 中量単木保持区	人工林内に侵入した広葉樹を単木で残す（50 本 /ha）
4. 大量単木保持区	人工林内に侵入した広葉樹を単木で残す（100 本 /ha）
5. 群状保持区	伐採地中央に人工林の区画（60 m× 60 m）をまとめて残す
6. 小面積皆伐区	約 1 ha の小規模の皆伐を複数箇所で行い、合計で林分の 3 分の 1 の面積を伐採
7. トドマツ人工林区	非伐採
8. 広葉樹天然林区	非伐採

おわりに

2013 年から始まったこの実証実験は昨年 2017 年にすべての処理区での伐採と植栽が完了しました。今後はこれまでの調査や今後数年の調査で得られるデータをもとに、残した木の量や配置が、伐採直後の生物多様性や生態系サービスにどのような影響を与えるのかを明らかにしていきたいと考えています。

一方でこの保持林業の効果はこれから長い期間を経て発揮されることも予想されます。例えば、今回の伐採で残された木々は、伐採地に植栽されたトドマツが大きくなり森林が発達するなかで、高齢木として人工林の中に残っていくことになります。一般的に、人工林は空間構造や種組成が単純で、野生生物の生息環境としては質が低いとされます。保持林業は人工林のなかに高齢の広葉樹や森林パッチを作り出し、将来、より複雑な森林環境を作り出すことが期待されます。このような効果を検証するには、まだ長い時間がかかりますが、これからの継続的なモニタリングによって検証していきたいと考えています。



写真 –2　処理区に残されたシナノキの高齢木

引　用　文　献

1）柿澤宏昭・山浦悠一・栗山浩一（2018）保持林業―木を伐りながら生き物を守る．築地書館

2）Gustafsson L, Baker SC, Bauhus J, Beese WJ, Brodie A, Kouki J, Lindenmayer DB, Lõhmus A, Pastur GM, Messier C, Neyland M, Palik B, Sverdrup-Thygeson A, Volney WJA, Wayne A, Franklin JF (2012) Retention Forestry to Maintain Multifunctional Forests: A World Perspective. BioScience 62: 633–645.

3）Yamaura Y, Akashi N, Unno A, Ozaki K, Tsushima T, Nagasaka A, Nagasaka Y (2018) Retention Experiment for Plantation Forestry in Sorachi, Hokkaido (REFRESH): A large-scale experiment for retaining broad-leaved trees in conifer plantations. Bulletin of FFPRI 445: 91-109.



林業遺産紀行 第13回

旧帝室林野局木曽支局庁舎および収蔵資料群

奥　敬一（おく　ひろかず、富山大学）

木曽地域に関連する林業遺産が、またひとつ新たに加わることとなった。「旧木曾山林学校にかかわる林業教育資料ならびに演習林（2013 年度選定）」「木曾森林鉄道（2013 年度選定）」「木曽式伐木運材図会（2016 年度選定）」に続く 4 件目は「旧帝室林野局木曽支局庁舎および収蔵資料群」である。現場の作業や教育を代表する遺産に、管理組織を代表する遺産が加わったことで、近代の木曽地域が林業に果たした役割の全体像をより俯瞰できるようになったといえるだろう。

「旧帝室林野局木曽支局庁舎」は、皇室財産であった木曽谷一円の御料林を管理する行政機関の庁舎として建築された。本庁舎が所在する長野県木曽町福島は、江戸期から木曽地方の山林を管理する尾張藩木曽代官の屋敷が置かれるなど、地域の林政の中心であった。1889 年（明治 22 年）に木曽山林が御料林に編入された当初、御料局木曽支庁は岐阜市に設置されたが、その後、名古屋市への移転を経て 1903 年（明治 36 年）に現在地に落ち着いた。そして、1924 年（大正 13 年）の組織改称により帝室林野局木曽支局と呼称されるようになった。

木曽支局は御料林の中でも最大規模かつ特殊な役割を持った組織であった。1928 年（昭和 3 年）時点で全御料林の直営伐採量の 76%（112 万石）を占めており（帝室林野局 1929）、また 1937 年（昭和 12 年）時点で帝室林野局全体で 1382 名の職員数のうち、部局中最多の 343 名を擁していた（帝室林野局 1939）。さらに、管内には伊勢神宮の式年遷宮用材としてヒノキ大径材生産に特化した「神宮備林」7,000 ha が設定され、特別な森林施業が実施されていた。1941 年（昭和 16 年）には実際に遷宮用材が伐出されている。国内で初めて軽便鉄道を施設し、森林鉄道の先駆けとなったのも木曽支局である。そうした組織の格にふさわしい建築として、本庁舎には内外装とも凝った設計が採用されている。

最初の庁舎は木造 2 階建ての洋風建造物であったが、1927 年（昭和 2 年）の大火により焼失した。現在の建物は、この火災のわずか 7 か月後に、帝室林野局が威信をかけて再建したものである。再建された本庁舎は、



写真 –1　旧帝室林野局木曽支局庁舎（現御料館）

優れた建築を多く手がけた宮内省内匠（たくみ）寮による設計である。当時の設計図面、棟札等が残されており、建築は東京の業者が請け負ったことが明らかになっている。本庁舎は木曽地域に残る最も古い擬洋風建築であり、当時最先端の装飾美術であったアール・デコ様式の建築意匠が随所に見られる。外観的には、三方にアーチを持つ玄関の車寄せや屋根中央の八角の塔屋が特徴となっており（写真 –1）、全体的には装飾を控えた左右対称のシンプルな形態であるが、遠望からもそれとわかる品格を備えている（写真 –2、3）。また、建築部材には、ヒノキやサワラなどの木曽五木ではなく、当時としては珍しいヒッコリー、ベイマツなどの輸入材が用いられている。

1947 年（昭和 22 年）の林政統一により、御料林は現在の国有林に統合されることとなったが、本庁舎は新設された長野営林局の庁舎として使用され、林業近代化の拠点となった。長野営林局の全ての機能が長野市へ移転した 1956 年（昭和 31 年）には、福島営林署の庁舎として引き継がれている。その後、組織の見直しで名称や機能が変わりつつも、本庁舎は 2004 年（平成 16 年）まで約 80 年にわたって御料林・国有林の拠点として役割を果たしてきた。

2010 年（平成 22 年）には、地元自治体である木曽町が中部森林管理局から本庁舎や敷地などを取得した。そして 2012 年（平成 24 年）には、近代の木曽地域における林野行政を知る上で貴重な建築であることが評価

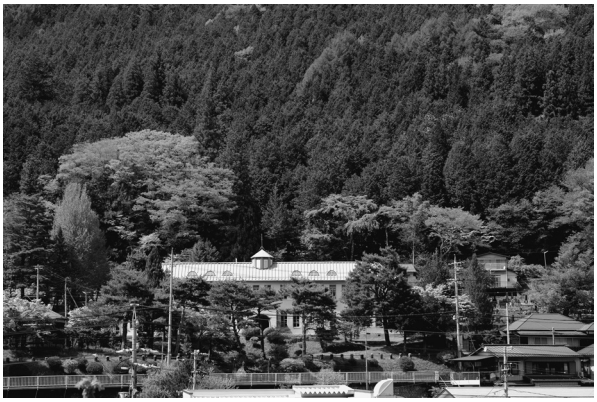


写真 –2　現在の庁舎全景

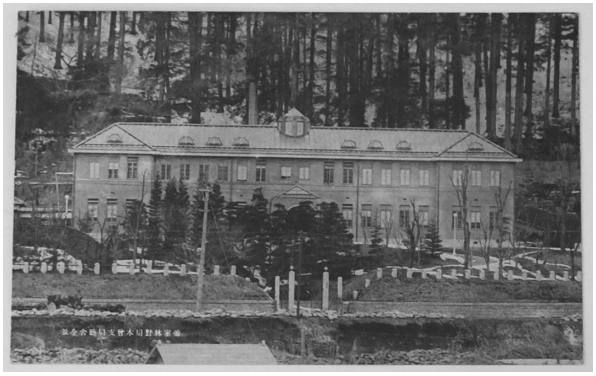


写真 –3　かつての庁舎全景（明治～昭和の絵葉書、館内展示資料）



写真 –4　内装、奥のテーブルは支局長席



写真 –5　木曽谷模型

され、木曽町有形文化財（建造物）に指定されている。木曽町は、2012 年から 2014 年（平成 26 年）にかけて、再建当時の図面等に基づき、間仕切り等の改造部の復元、漆喰壁の修復、塗装色の再現、真鍮製金具類の再現製作などを行い、往時の姿となるように改修復元工事を行った。現在は「御料館」の愛称で一般公開され、1 階は住民の交流や研究の拠点となっている。2 階は木曽支局当時の状態に復元され、華麗な内装（写真 –4）とともに、御料林時代の写真、図面、道具類など近代の林野行政を物語る貴重な史資料、木曽地方の生物を中心とした剥製や標本が多数展示収蔵されている。

収蔵資料のうちで特筆すべきは「木曽谷模型」である（写真 –5）。木曽谷全域を詳細に示すこの巨大な立体地図は、1881 年（明治 14 年）に東京上野で開催された第 2 回内国勧業博覧会に当時の山林局が出品するため、旧福島町の旅館当主であり御嶽参りの講の先達も勤めていた児野嘉左衛門が依頼を受けて制作したものである（田原 2006）。天然木曽ヒノキ材を用いた彫刻を組んで作られており、木曽駒ヶ岳、御嶽山、木曽川などの地形が精巧に表現されている（作製当時は村名、村境、官林民林の境界、植生などの表現もあったとされる）。当時の木曽谷の国内産業の中での位置づけを示す史料として、また立体地図造形としても非常に価値が高い。展示には由来や地形再現の精度などに関して、より詳細な解説も付されている。

旧御料林、帝室林野局の庁舎として使われた建築物は、現在わずかしか残っていない。現存するものも出張所クラスが中心であり、支局庁舎クラスとして使い続けられたものは本庁舎のほかに例がない。本庁舎は、御料林時代を物語る唯一の官庁建築であるとともに、木曽地域の林野行政史や森林文化を後世に伝える建造物として極めて重要な意味を持っている。先述の林業遺産群や日本遺産「木曽路はすべて山の中～山を守り　山に生きる～」とあわせて、周辺は森林・林業関係者にとって見所の多い場所でもあるので、ぜひ一度訪れていただきたい。

参考・引用文献

香田徹也編著（2000）日本近代林政年表 1867-1999. 日本林業調査会

田原　昇（2006）近代木曽林業と第二回内国勧業博覧会～『第二回内国勧業博覧会関係文書』より～. 徳川林政史研究所研究紀要 40: 137-152

帝室林野局（1929）昭和 3 年度帝室林野局統計書

帝室林野局（1939）帝室林野局五十年史

シリーズ

現場の要請を受けての研究㊽

周辺環境に配慮した森林作業道の研究

臼田　寿生（うすだ　ひさお、岐阜県森林研究所）

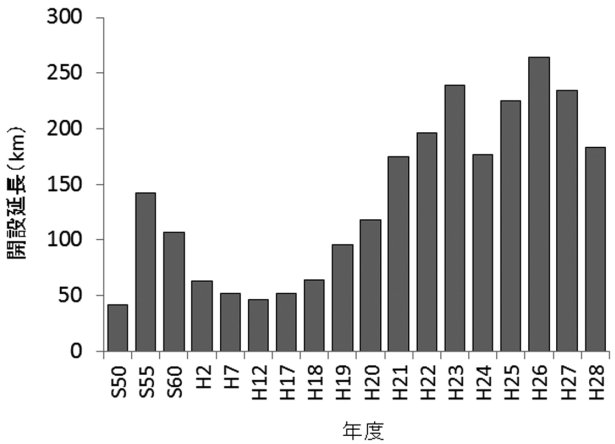
はじめに

岐阜県では、木材生産の基盤となる森林内の路網を充実させるため、森林作業道（以降、作業道）の開設を積極的に実施しています。

毎年、県内で開設される作業道の延長は、平成17年度から増加しはじめ、平成21年度からは、毎年200㎞前後で推移しています（岐阜県林政部2018）（図–1）。

作業道は、主に林業の収益性向上を目的として開設されることから、土構造による簡易な構造を基本とし、作設コストを抑制しています。このため、コンクリート構造物やアスファルト舗装などを用いた高規格の道路と比較して、土砂や濁水が流出しやすく、開設する場所や方法を誤ると、道だけでなく周辺の林地も崩壊させる恐れがあります。

岐阜県森林研究所では、このような作業道の開設にともなう周辺環境への被害を未然に防ぐため、行政や現場技術者と連携しながら「土砂･濁水流出防止対策の研究」および「壊れにくい森林作業道の作設技術の研究」に取り組んできましたので、その内容について紹介します。



図–1　岐阜県内の作業道開設延長の推移
（岐阜県森林・林業統計書をもとに作成）

土砂・濁水流出防止対策の研究

県内各地で作業道の開設が進み、平成20年度に入ると、一部の作業道では土砂・濁水の流出によるトラブルが発生しはじめました。これにより、現場関係者から当研究所に対して、土砂・濁水流出の実態調査や被害防止対策などに関する依頼や相談が寄せられるようになりました。

当研究所では、このような状況に備えて、平成18年度から作業道からの土砂流出防止対策に関する研究に着手していましたが、現場からの要請が強くなったことを受け、平成21年度からは、森林総合研究所など外部機関との共同研究（新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「間伐促進のための低負荷型作業路開設技術と影響評価手法の開発」平成21年度～24年度）に参加し、体制を強化しながら、研究に取り組みました。

まずは作業道からの濁水流出の実態を明らかにするため、作業道開設地周辺の渓流から水を採取し、濁度（濁りの程度）を計測しました。作業道の開設にともなう濁りの実態については、できる限り、多くの条件下でのデータを把握することが重要であるため、作業道を開設している複数の事業体と連携しながら調査を実施しました。濁度を計測したデータは、その都度、調査に協力していただいた事業体へ提供しました。従来は、主に見た目で判断していた濁りの程度を濁度という形で定量的に示すことで、濁水発生に対する事業体の意識が向上しているように感じました。

現場関係者の協力を得ながら作業道開設地周辺の渓流水の濁度を調査した結果、渓流を横断するなど作業道が渓流に接近する箇所で濁りが強くなる傾向が明らかになりました（杉山ら2009）（図–2）。このような傾向は、図–2の事例以外の調査地でも同様でした。これらの調査結果から、作業道を開設する際には、できる限り渓流に接近しないような路線を計画するとともに路面水が直接、渓流に流れ込まないような対策が必要であることが示唆されました。

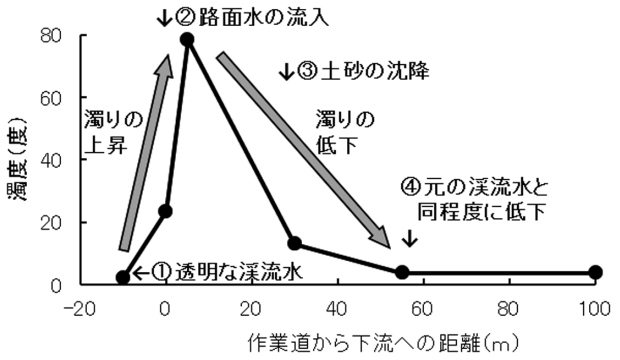


図 –2　作業道周辺における渓流水の濁度変化の事例

実態調査の結果を踏まえた土砂・濁水の流出防止対策を検討するにあたっては、作業道の性格上、できる限り簡易かつ低コストであることが求められるため、高価な資材を必要としない工法を検討しました。対策工法の一つとして、路面水の濁りを緩和させるため、路面水の排水先に沈砂池を設置する工法（図 –3）の効果を検証しました。検証の際には、実際に作業道の開設を行っている事業体の作業者にご協力をいただき、現地で沈砂池の設置作業を行いました。設置作業の際には、作業者に対して、設置にかかる労力や作業のしやすさなどについて聞き取り調査を行い、実用的な対策工法となるように留意しました。

沈砂池による濁りの緩和効果を確認するため、沈砂池を通過する排水の浮遊物質の濃度を計測しました。その結果、沈砂池に流入する前（呑口）と比べて、流出後（吐口）では、浮遊物質濃度が大幅に減少し、粒径 0.1 mm 以上の土粒子（主に砂）は、全て沈砂池内に捕捉されていました（臼田ら 2014）（図 –4）。

以上の結果から、作業道からの土砂・濁水の流出を抑制するためには、横断溝等を用いて、路面からの排水をできる限り分散させるとともに排水先には沈砂池を設置することが有効であることを明らかにしました。

これらの成果は、共同研究機関である森林総合研究所および石川県農林総合研究センター林業試験場の研究成果とあわせて「森林作業道開設の手引き－土砂を流出させない道づくり－」（図 –5）として冊子にとりまとめました。

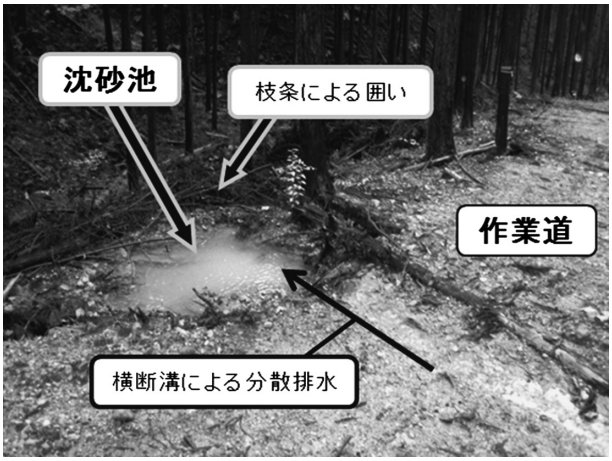


図 –3　横断溝による分散排水と流末に設置された沈砂池

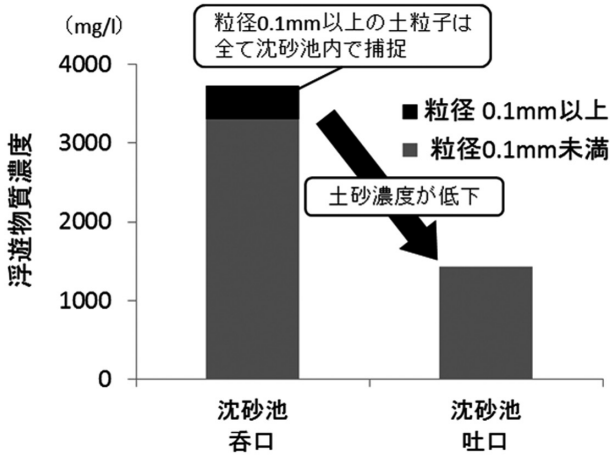


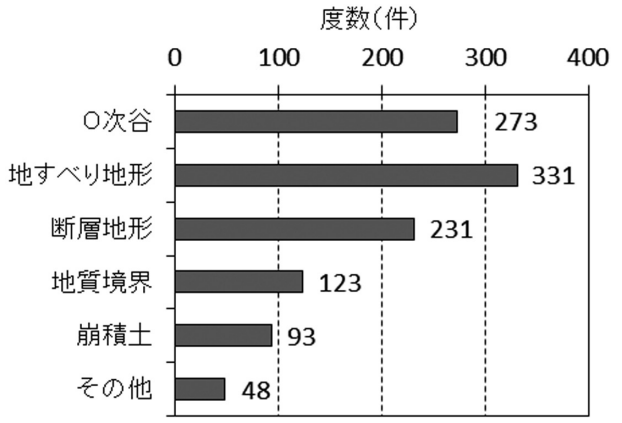
図 –4　沈砂池による排水中の浮遊物質濃度の変化



図 –5　森林作業道開設の手引き
―土砂を流出させない道づくり―

壊れにくい森林作業道の作設技術の研究

県内の森林では、平成 21 年度から毎年 200 ㎞前後の作業道の開設が行われたことにより、容易に開設できる場所が少なくなるとともに、豪雨時に作業道が損壊する事例がみられるようになりました。このような状況を踏まえ、平成 24 年度には行政機関から壊れにくい森林作業道の作設技術に関する研究についての要望が寄せられるようになりました。このため、平成 26 年度からは、森林総合研究所などの機関と連携し、壊れにくい作業道の作設技術に関する研究（農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業「安全な路網計画のための崩壊危険地ピ



図−6　崩壊危険地別の損壊発生件数
※１箇所の崩壊が複数の危険地形に該当する箇所もある

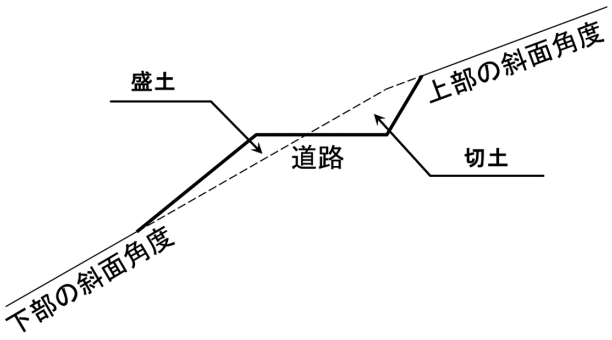
ンポイント抽出技術」平成 26 ～ 28 年度）に着手しました。なお、本研究では、全幅員 3.5 m 程度までの土構造を主体とする作業道（同程度の構造の林道および林業専用道を含む）を対象として、損壊が発生しやすい作設条件（場所、方法等）を明らかにし、低コストで壊れにくい作業道作設技術の普及を図ることを目的としました。

損壊箇所を調査するにあたっては、損壊が発生している場所を効率的に把握する必要がありますが、作業道を開設した事業体にとって、損壊箇所の情報は、基本的にあまり知られたくないものであると思われ、調査箇所の選定に苦労することが予想されました。しかし、幸いなことに損壊箇所の情報提供について関係者に呼び掛けたところ、多くの事業体から協力を得ることができ、貴重なデータを入手することができました。

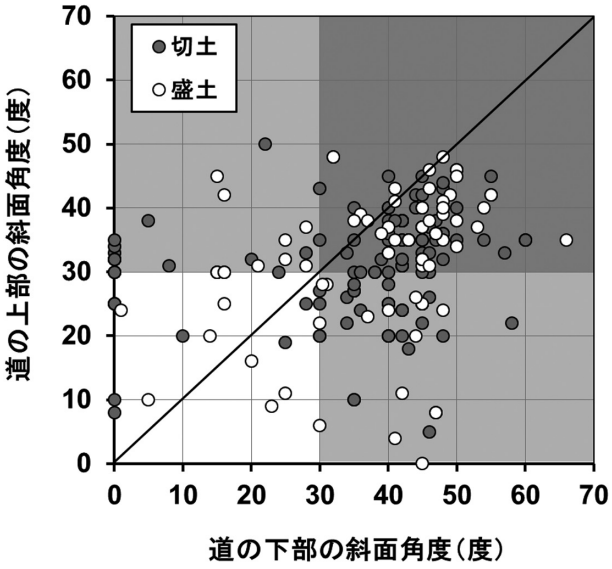
まずは作業道が損壊しやすい条件を明らかにするため、県内外の作業道の損壊箇所において、作設状況や損壊箇所の地形的特徴などを調査しました。

その結果、損壊は全て地すべり地形などの崩壊危険地内で発生し（図 −6）、特に崩壊危険地の中でも地山の斜面角度が 30 度以上の急傾斜地で多くの損壊が発生していることが明らかとなりました（図 −7、図 −8）。さらに、道の上部と下部の斜面角度に着目すると、上部の斜面よりも下部の斜面の傾斜が急になる「遷急点」がある斜面で多くの損壊が発生していることがわかりました。また、盛土や排水処理の施工方法が原因の損壊が多く見られたため、主な特徴をタイプ別に整理しました。

損壊箇所の調査から明らかになった損壊しやすい条件は、①路線計画、②盛土、③排水処理の３つの項目に分類し、壊れにくい作業道を作設するための注意点として整理しました。このうち路線計画に関しては、崩れやすい地形の判読を支援するため、傾斜区分図などの地形



図−7　調査した道の標準断面図



図−8　道の損壊箇所における道の上部および下部の斜面角度



図−9　壊れにくい道づくりのための森林作業道作設の手引き

がわかりやすい地図を作成し提供しています。

本研究の成果は「壊れにくい道づくりのための森林作業道作設の手引き」として冊子にとりまとめました（図 −9）。

おわりに

今回紹介した作業道に関する研究の成果は、森林施業プランナー、作業道作設オペレーター等を対象とした各種研修会において、冊子などを活用し、普及を進めています。なお、成果をとりまとめた冊子は希望者へ随時配布しているほか、岐阜県森林研究所のホームページからPDF ファイルのダウンロードができますので、ご活用いただければ幸いです。

引 用 文 献

岐阜県林政部（2018）岐阜県森林・林業統計書．https://www.pref.gifu.lg.jp/sangyo/shinrin/shinrin-keikaku/11511/index_6075.html、2018 年 11 月 22 日確認

杉山正典･古川邦明･横井秀一･臼田寿生･松本　武（2009）山地小流域における作業路開設時の濁水発生について．中部森林研究 57:169-172

臼田寿生・古川邦明・鈴木秀典・小倉　晃（2014）森林作業道における濁水流出防止対策の検討―沈砂池の効果―．森林利用学会誌 29(2):97-100

動物がタネをまいて森をうごかす —特に地球温暖化が進むなかで果たす役割に注目して—

直江　将司（なおえ　しょうじ、森林総合研究所東北支所）

シリーズ うごく森 36

1. はじめに

自ら動くことのできない植物は、タネを飛ばすこと（以下、種子散布）によって移動します。種子散布には植物種の分布の拡大、かく乱や気候変動で新しく発生した生育適地への移動、ネズミや菌、昆虫といった天敵が多い親植物周辺からの移動（遠くへの種子散布に失敗した種子が落下する親植物の周辺には天敵が集まってきます）、個体群間の遺伝子流動の促進といった役割があります（直江 2015）。このような役割から、植物は種子散布のために様々な工夫を凝らしています。種子散布には、様々なタイプがあり、風散布は、風に乗って種子を移動させる種子散布で、カエデのようにプロペラ状の翼を発達させる植物や、タンポポのようにフワフワとした綿毛を発達させる植物が知られています。海流散布は海に浮かんで海流によって種子を移動させる種子散布で、ヤシやハイビスカスなどが知られています。なかでもハイビスカスの一種であるオオハマボウは海流を利用することで、西アフリカからオーストラリア、日本まで広く分布することに成功しています（高山 2009）。今回は、動物散布の研究で分かった動物による森のうごきを紹介します。

2. 動物のタネまき

動物を利用する種子散布は、付着散布、貯食散布、周食散布が知られています。付着散布は種子が鳥類や哺乳類の毛にくっついて散布されるというもので、オナモミやヌスビトハギが代表的なものです。貯食散布は、森林生のネズミやリスといったげっ歯類、またカケス、ホシガラス、ヤマガラといった鳥類が後で種子を食べるつもりで地面などに貯え、のちにこれらの動物が食べ忘れたり死んでしまったりして生き残った種子が散布されたと考えるものです。特に種子の豊作年には動物が食べつくせないためにたくさんの種子が生き残ります。この散布を行うのは堅果（いわゆるドングリ）をつける植物で、コナラ、ブナ、エゴノキやハシバミなどが知られています。周食散布は液果（いわゆるフルーツ）をつける植物でみられ、植物が種子の周りの果肉を動物にエサとして提供し、動物は糞や吐き出しで種子を排出することで散布するというものです。種子散布を行う動物は、ナメクジ、バッタ、トカゲ、カメ、魚類など様々ですが、なかでも鳥類と哺乳類が重要と考えられています。果実も大まかには鳥類向けの果実と哺乳類向けの果実が進化しており、鳥類向けでは鳥類の特性を反映して小型で色鮮やか、哺乳類向けでは大型で色は地味なものの強く匂う、といった特徴が知られています（写真 –1）。周食散布を行う植物は全植物の 3 分の 1 を占め、温帯林の樹木では 35% から 44%、熱帯雨林では 75% から 90% も占めています（Herrera 2002）。森林の植物多様性は、動物の種子散布によって支えられているともいえそうです。実際に森林伐採や狩猟によって動物が激減した森林（Empty forest、空洞の森といいます）では、動物の種子散布が制限されたことで更新が進んでおらず、将来の森林の劣化が危惧されています。森林率が高い日本でも、人工林に囲まれた広葉樹林において鳥類が減少したことによる種子散布量の減少が知られています（Naoe *et al*. 2011）。



写真 –1　鳥類向けの果実であるマムシグサ（左上）とヨウシュヤマゴボウ（右上）、哺乳類向けの果実であるアケビ（左下）とサルナシ（右下）

3. 温暖化が進むなかでの植物の移動

さて近年注目されている種子散布の役割として、移動により、温暖化の影響から逃れることがあります。現在

生育している場所は温暖化によって生育適地でなくなりつつあるため、より気温の低い高緯度や高標高に移動する必要があるのです。種子散布以外の対策としてはその場で温暖化に対応した形質を進化させるといったことも考えられますが、世代交代に時間のかかる樹木では現在の温暖化のスピードに対応して進化することはなかなか困難なように思われます。実際、植物の分布は高緯度・高標高にシフトしつつあることが知られています（Corlett and Westcott 2013）。

それでは植物が温暖化の影響から逃れる場合には緯度方向と標高方向のどちらに移動するのが効率的なのでしょうか？一般に、北半球では、北に 100 km 移動すれば気温は約 1℃減少することが知られています。一方で山を標高 100 m 登れば気温は約 0.65℃減少します。移動距離を比較すれば、緯度方向に移動するよりも標高方向に移動するほうがはるかに効率的であることが分かります。実際に植物の分布変化は緯度方向よりも標高方向でより強く温暖化と対応していることが分かっています。しかしながら、標高方向の種子散布はこれまで評価されたことがありませんでした。これは山に無数に生えている植物から散布種子の母親を特定するのが困難であったためです。私たちは、種子の酸素安定同位体比（原子核内の陽子の数が同じで中性子の数が異なる原子のことを同位体、そのうち環境中に安定して存在するもののことを安定同位体といいます。酸素では 3 種類の安定同位体が知られていいます。同じ元素の安定同位体でも、それぞれ性質がほんの少し異なっています。その結果、環境によって物質に含まれる安定同位体の割合は異なります。）を利用することでこの問題を解決しました。種子の酸素安定同位体比は標高が高いほど小さくなるという関係がみつかり、散布種子の酸素安定同位体比を測定するだけで母親の分布する標高を特定できるようになったのです（図 –1）（Naoe *et al*. 2016a, 2016b）。そして散布種子を拾った標高から母親の分布している標高を差し引くことで、種子が散布によってどのくらい山を上り下りしているか明らかにできるようになりました。この手法を利用して、哺乳類が野生のサクラであるカスミザクラの種子をどのように運んでいるかを関東山地の奥多摩で調査しました（写真 –2）。

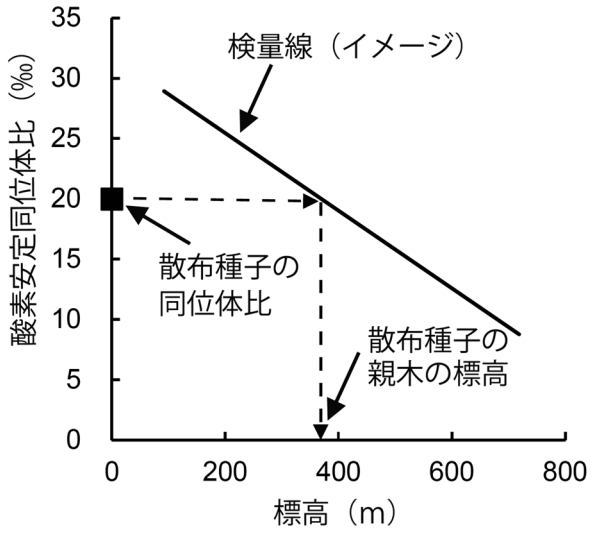


図 –1　種子の酸素安定同位体比と標高の関係（検量線）を利用して、親木の分布する標高を特定する



写真 –2　カスミザクラの開花



写真 –3　果実を食べるツキノワグマ親子

4. クマのタネまきがサクラを温暖化の危機から守っている

哺乳類の糞に含まれているカスミザクラ種子を集計した結果、奥多摩ではツキノワグマが種子の 8 割を、テンが 2 割を散布していることが分かりました（写真 –3）。そこでツキノワグマとテンが散布した種子の酸素安定同位体比を測定したところ、ツキノワグマでは平均で 307 m 高標高へ、テンでは 193 m 高標高へ種子散布していることが明らかになりました（図 –2 上）。これを気温減率（標高 100 m 高くなると気温が 0.65℃低下する）で換算すると、ツキノワグマは平均で 2.0℃、テ

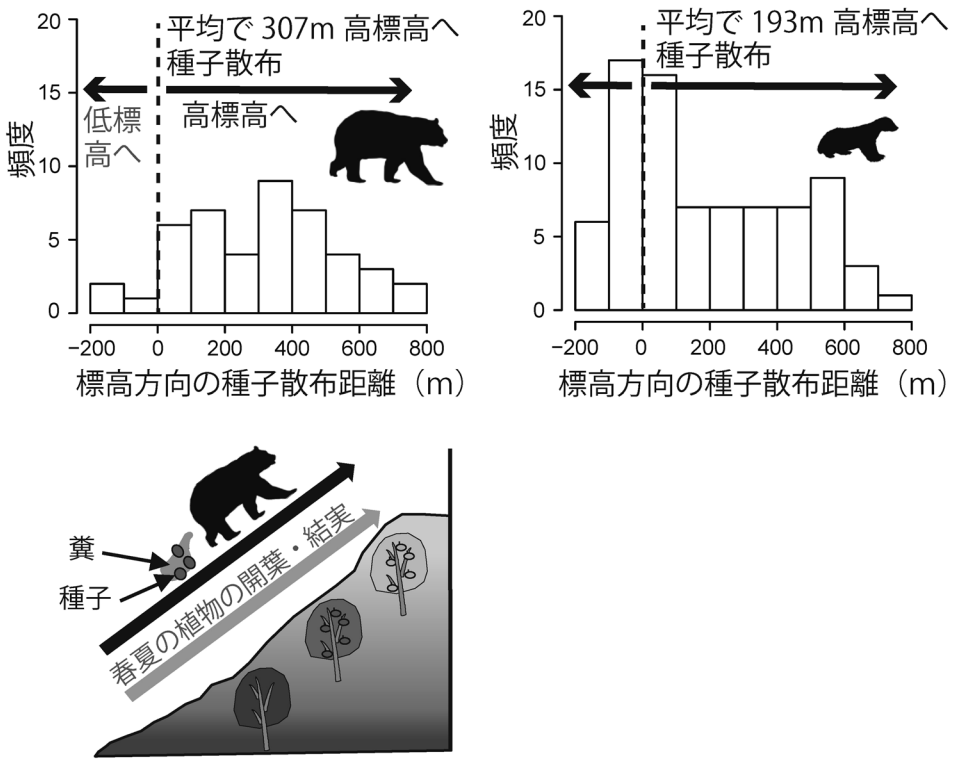


図 –2　ツキノワグマとテンによる標高方向の種子散布距離（上）と哺乳類による種子散布の模式図（下）。山麓から山頂にかけて植物の開葉や結実が進み、それを哺乳類が追いかけた結果、種子が標高の高い方に偏って散布されたと考えられます。Naoe *et al.* 2016 Current Biology 26: R315-R316 DOI: 10.1016/j.cub.2016.03.002 を Elsevier 社から許可を得て改変利用

ンでは 1.3℃気温が低い場所に種子散布していることになります。IPCC が予想する 2100 年までの温度上昇は最悪シナリオでも 4.8℃であるため（IPCC 2013）、ツキノワグマとテンが何度か種子散布すれば植物が温暖化から逃れるに十分であると考えられました。

しかし、なぜツキノワグマとテンは高標高に偏って種子を散布していたのでしょうか？この原因としては温帯域における植物のフェノロジー（生物季節ともいいます）が影響していると考えられました。温帯においては、春夏は植物の開葉や結実のフェノロジーは山麓から山頂に向かって進むことが知られています（Rötzer and Chmielewski 2001）。そしてツキノワグマやテンはこの時期のエサとしてサクラの果実や植物の若葉をよく利用しています。そのため、ツキノワグマとテンが植物のフェノロジーを追いかけて山を登り、その途中で糞をすることで高標高への種子散布が起こったのではないかと考えられました（図 –2 下）。ただし、哺乳類が果実を食べて糞をするまでの時間がせいぜい二日であること、植物のフェノロジーは二日で 200、300 m も高標高に進まないことを考えると、ツキノワグマとテンが単純に果実の成熟を追って山を登り続けただけでは今回観察された長距離の種子散布の説明にはなりません。私たちは果実の成熟よりも同じくエサとして利用されている若葉の発生のほうが早いことが影響したのではないかと考えています。例えば山の中腹で果実が成熟した時点では、その場所の葉はすでに固くなってしまいエサとしては利用しづらくなっています。一方で、山頂付近では果実はまだ未熟で利用できないものの若葉は利用できる、といった状況が起こりえます。このような状況でツキノワグマとテンが山の中腹で果実を食べたのちに若葉を食べるために山頂付近に移動していれば、高標高への長距離の種子散布が成立します。一方で山頂付近で若葉を食べたのちに果実を食べに中腹に山を下りる際には、彼らのお腹には若葉しか入っていないため、低標高への種子散布は生じません。このような採餌行動が高標高に偏った長距離の種子散布を生じさせていたのではないかと考えられます。結果として、ツキノワグマとテンの春夏の採餌行動がカスミザクラが温暖化から逃れるのに貢献していたといえます。

5. 今後の展望

カスミザクラにおいては動物が温暖化から逃れる手助けをしていると考えられましたが、このような関係は他の植物でも期待できるでしょうか？カスミザクラと同じ

ように春夏に結実するヤマグワやキイチゴ類の多くなどでは同様な関係が得られるかもしれません。しかしながら、温帯の周食散布植物のほとんどは秋冬に結実します。そして、紅葉が分かりやすい例ですが、秋冬の植物フェノロジーは山頂から山麓方向に進みます。もし動物が植物フェノロジーを追いかけて山を下りていれば、種子は低標高に偏って散布されている可能性があります。温暖化が進むなかでより温暖な低標高に種子が散布されている場合、植物の個体群の維持が危ぶまれ、また森林の種構成の変化も予想されるため、実際にこのようなパターンがみられるか喫緊に評価していく必要があります。また、哺乳類と並んで重要な種子散布動物である鳥類による種子散布パターンも気になるところです。

今回は、植物が効率的に気温の低い場所に移動できる標高方向の種子散布に注目した研究を紹介してきました。しかし、緯度方向の種子散布も場合によっては有効かもしれません。例えば、鳥が渡りを行っている途中で糞をしていれば、緯度方向に数十キロメートルもの種子散布を行っているかもしれません。緯度方向の種子散布も研究例がありませんが、こちらも種子の酸素安定同位体比を利用することで評価できる可能性があります。種子の酸素同位体比の変化は種子の生産される場所の気温を反映していると考えられるため（Naoe *et al*. 2016a）、同じ標高であれば緯度によっても酸素安定同位体比が変化していると予想されます。そのため、種子の酸素安定同位体比を手掛かりにすることで、緯度方向の種子散布の評価も今後可能になってくるかもしれません。

今回のテーマでは植物の種子散布がいかに動物に依存しているか、また動物の採餌行動を反映した種子散布によって植物が温暖化から避難できるかが左右される可能性についてお話してきました。長寿命の樹木が構成する森林の変化はゆっくりで、なかなか変化を見つけるのは難しいですが、動物たちが種子散布を通していかに森林を駆動しているか思いを馳せていただければ幸いです。

引 用 文 献

Corlett RT, Westcott DA (2013) Will plant movements keep up with climate change? Trends Ecol Evol 28: 482–488

Herrera CM (2002) Seed dispersal by vertebrates. In: Herrera C M, Pellmyr O (eds) Plant–animal interactions—an evolutionary approach, 185–208

IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press

Naoe S, Sakai S, Sawa A, Masaki T (2011) Seasonal difference in the effects of fragmentation on seed dispersal by birds in Japanese temperate forests. Ecol Res 26: 301–309

直江将司（2015）わたしの森林研究―鳥のタネまきに注目して―．さ・え・ら書房

Naoe S, Tayasu I, Sakai Y, Masaki T, Kobayashi K, Nakajima A, Sato Y, Yamazaki K, Kiyokawa H, Koike S (2016a) Mountain-climbing bears protect cherry species from global warming through vertical seed dispersal. Curr Biol 26: R315-R316

Naoe S, Tayasu I, Masaki T, Koike S (2016b) Negative correlation between altitudes and oxygen isotope ratios of seeds: exploring its applicability to assess vertical seed dispersal. Ecol Evol 6: 6817-6823

Rötzer T, Chmielewski FM (2001) Phenological maps of Europe. Clim. Res. 18: 249–257

高山浩司（2009）汎熱帯海流散布植物の系統地理：全球レベルの DNA 多型解析．分類 9:123-130

シリーズ 森をはかる その68

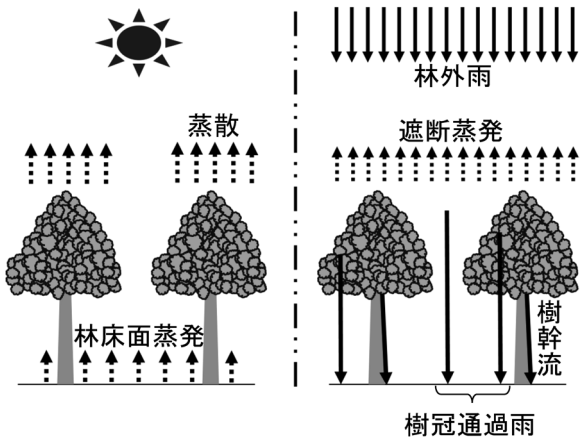
森林の遮断蒸発をはかる

飯田　真一（いいだ　しんいち、森林総合研究所　森林防災研究領域）

はじめに

雨が降ってきたときに、木の下で雨宿りをした経験はありませんか？弱い雨ならば、木陰で雨に濡れずに済んだ経験がある人は多いことでしょう。このように、森林に雨が降ると（林外雨）、その一部は地面まで到達せず、蒸発することが知られています。これを遮断蒸発と呼びます（図–1）。基本的に、遮断蒸発は、森林が存在することによって、林外雨が遮られるために生じる現象です。雨宿りの経験がある人には、遮断蒸発は単純な現象と感じられるかもしれません。また、雨が降っている間や止んだ直後は、湿度が高く、日射量も少ないために蒸発は生じにくいので、遮断蒸発量は少ないと想像されるかもしれません。では、実際はどのようになっているのでしょうか？

降雨の無い日には、樹木の蒸散と地面からの蒸発（林床面蒸発）があり（図–1）、これらの合計に遮断蒸発を加えたものが蒸発散となります。すなわち、降雨日・無降雨日に関わらず、蒸発散量＝遮断蒸発量＋蒸散量＋林床面蒸発量です。森林流域の蒸発散量は降雨量の約50% にも達することが分かっています（鈴木 1992）。そして、国内のスギ林やヒノキ林では、遮断蒸発量が林外雨量に占める割合は10～30%にも及びます（例えば、田中ら 2005）。つまり、遮断蒸発量は蒸発散量の20～60% に相当しており、森林の水源涵養機能を評価する場合に重要です。他方、蒸発が生じにくい環境で多量の遮断蒸発量がどのように発生しているのか、未解明な部分が残されています。その原因の一つは、遮断蒸発量のはかり方に起因しています。そこで、今回は遮断蒸発をどのようにしてはかるのか紹介します。



図–1　蒸発散プロセスを表す概念図。左：蒸散および林床面蒸発プロセス、右：遮断プロセス



図–2　筑波森林水文試験地での遮断蒸発量の測定。

遮断蒸発量は雨水の収支として評価する

林外雨のうち、雨滴として地面に到達するものが樹冠通過雨、幹の表面を流下して樹木の根元まで到達する雨水が樹幹流です（図–1）。一般的に、遮断蒸発量は、林外雨が地面に到達するまでの雨水の収支に基づいて算出します。具体的には、遮断蒸発量＝林外雨量－（樹冠通過雨量＋樹幹流量）です。つまり、遮断蒸発量をはかるためには、林外雨量、樹冠通過雨量、樹幹流量をそれぞれ計測する必要があります。実際の例として、筑波山系に位置する筑波森林水文試験地（以下「筑波試験地」という）のスギ林における遮断蒸発量の測定について紹介したいと思います（図–2）（Iida *et al*. 2017）。

林外雨の測定

当然ながら、林外雨は森林の外で計測する必要があります（図–1）。しかし、森林は山地斜面に連続して分布することが多く、適切な場所を見つけることは容易ではありません。あるいは、森林よりも背が高い構造物等があれば雨量計を森林の上に置くことができますが、そのようなケースは稀です。筑波試験地では、樹冠に覆われていない開空地と日射や温湿度などを観測している塔の上部を林外雨測定の候補として、計測を行いました。その結果、観測塔の上部は風の影響を受けて雨量計の捕捉率が低く、計測には不適切なことがわかり、最終的に、開空度が十分大きい尾根部での値を林外雨量としました。

樹冠通過雨量の測定

樹冠通過雨の特徴として、場所によって雨量が大きく

異なることが挙げられます。森林内には林外雨よりも多く雨が到達することさえあるのです（田瀬 1989）。その理由は枝葉に付着した雨水が滴り落ちるときに、特定の場所に集中することがあるためです。したがって、遮断蒸発量を正しく評価するためには、森林の代表的な樹冠通過雨量を得る必要があります。そこで、多数の雨量計を配置して空間分布を実測し、そのデータに基づいて必要となるサンプル数を統計学的に検討する方法が用いられます（例えば、Kimmins 1973）。あるいは、受水面積の大きい樋を用いて、樹冠通過雨を一挙に集水することもあります。筑波試験地では、大型の樋（幅20cm、長さ10m）を2つ用いて樹冠通過雨を計測しました（図–2）。なお、直径21cmの貯留型雨量計30個による樹冠通過雨量と、樋の値は良く一致し、樋は林分を代表した樹冠通過雨を計測していることが確認されました（Iida *et al*. 2017）。

樹幹流量の測定

樹幹流を計測するためには、まず、幹表面を流下してくる雨水を捕捉する必要があります。筑波試験地では幹にシリコンシーラントを塗布してウレタンマットを密着させ、樹幹流を集水しました（図–2）。遮断蒸発量を評価するためには、樹冠通過雨と同様に、対象となる森林の代表的な樹幹流量を得る必要があります。筑波試験地で測定対象としたスギ林分に存在する全樹木について樹幹流量を測定しました（14個体）。その結果、樹幹流量が最も多い個体の値（12ヶ月間で2379L）は最も小さい個体（165L）の14倍にも相当していましたが、スギ個体毎の樹幹流量は胸高直径や樹冠長と正の相関を示すことが分かりました（飯田ら 2010）。森林のすべての樹木について樹幹流を計測していない場合は、このような相関関係から推定することが可能です。

おわりに

以上のように、森林の遮断蒸発量をはかるためには、広範囲を代表する樹冠通過雨量と樹幹流量を計測する必要があります。そして、これらの計測コストを抑えるために、貯留型雨量計や貯水タンクを用いることが多いです。しかし、この場合は遮断蒸発量の一雨毎の積算値のみが得られることになり、降雨中のメカニズムについては手がかりを得ることができません。このことが、遮断プロセスに不明な点が残されている理由の一つです。筆者らは降雨中の1時間毎の挙動を知るために、転倒マス型雨量計・流量計を検定し（Iida *et al*. 2012）、遮断蒸発量の測定を行い、降雨の前半と後半で遮断プロセスが異なっていることを明らかにしました（Iida *et al*. 2017）。雨が降っている間の遮断プロセスの挙動を計測した事例が増え、それらの相互比較を行うことで、メカニズムを解明する糸口が得られるものと期待されます。

引 用 文 献

飯田真一・清水　晃・壁谷直記・延廣竜彦・玉井幸治・清水貴範（2010）筑波森林水文試験地のスギ林分における樹幹流量の個体間差．関東森林研究 61:207-210

Iida S, Shimizu T, Kabeya N, Nobuhiro T, Tamai K, Shimizu A, Ito E, Ohnuki Y, Abe T, Tsuboyama Y, Chann S, Keth N (2012) Calibration of tipping-bucket flow meters and rain gauges to measure gross rainfall, throughfall, and stemflow applied to data from a Japanese temperate coniferous forest and a Cambodian tropical deciduous forest. Hydrol Process 26: 2445–2454

Iida S, Levia DF, Shimizu A, Shimizu T, Tamai K, Nobuhiro T, Kabeya N, Noguchi S, Sawano S, Araki M (2017) Intrastorm scale rainfall interception dynamics in a mature coniferous forest stand. J Hydrol 548:770-783

Kimmins JP (1973) Some statistical aspects of sampling throughfall precipitation in nutrient cycling studies in British Columbian costal forests. Ecology 54: 1008–1019

鈴木雅一（1992）森林地の蒸発と蒸散.（森林水文学. 塚本良則編, 文永堂出版）. 53–78

田瀬則雄（1989）遮断 . 気象研究ノート 167: 249-257

田中延亮・蔵治光一郎・白木克繁・鈴木祐紀・鈴木雅一・太田猛彦・鈴木　誠（2005）袋山沢試験流域のスギ・ヒノキ壮齢林における樹冠通過雨量、樹幹流下量、樹冠遮断量．東大演報 113: 197-240

記 録

海外における森林療法の現況（1）
ーアジア諸国編ー

上原　巌
（うえはら　いわお・東京農業大学　森林総合科学科）

現在、森林浴（*Shinrin-yoku*）、森林療法（*Shinrin-ryoho*）は、国際的にも広がりを見せ、これらの言葉は、アジアだけでなく、いまやヨーロッパや南北アメリカ、オセアニアにまで拡大している。それぞれの地域において、国際シンポジュウム、セミナーなども活発に行われるようになってきた。そこで今回は、各国で最近開催された森林と人間の健康を考える国際会議、シンポジュウムを中心に紹介し、森林浴、森林療法の現在の国際的な趨勢について報告してみたい。アジアとヨーロッパの2回に分け、今回はアジア諸国における現況を報告する。

1. アジア諸国

今回は、近年活動が活発な韓国、中国・台湾における森林療法の国際シンポジュウムや研修会の様子をご紹介したい。

(1) 韓国

お隣の韓国では、2000年代の半ばに森林療法が紹介されて以来、これまですでに各地での国際シンポジウムがほぼ毎年のように開催されてきている。筆者も5回ほど招聘され、発表をしてきた。

韓国においては、アウトドアや登山ブームも相俟って、森林療法が広がってきた観があり、その内容は健康増進や地域振興という当初の目的から、具体的な事例、具体的な効果についての内容の模索に現在ではシフトしてきているようにうかがえる。

2017年10月25日(水)～26日(木)には、榮州市において、森林療法を中心にした山林産業についての国際シンポジュウムが開催された（写真–1）。榮州市は、アジアで初となる「森林万博」も開催される予定の地方都市であり、森林療法にも力が入れられている。筆者は、シンポジュウムの前に主催者より、森林療法を取り入れた地域医療、地域福祉についての事例報告を中心にしてほしいとの事前のリクエストをいただいた。そこで、日本における医療や福祉にお



写真–1　韓国榮州市での国際シンポジュウムの様子。
懇親会では、森にちなんだ音楽の演奏もあった。

ける森林療法の事例と韓国における可能性について基調講演を行ったが、そのリクエストにも韓国における森林療法の今後の方向性を検討する姿勢がうかがえる。

韓国と日本の森林は、造林樹種をはじめ、植生も似ており、意見交換もしやすい。また、過疎化、高齢化などの社会事情をはじめ、いじめや自殺などの社会的な課題も共通する要素が多い。韓国では今後、医療、福祉分野はもちろん、教育現場、職場などにおける事例研究においても大いに共同研究、推進できる可能性があるだろう。

(2) 中国

筆者は、2016年より、中国北京市の森林・公園管理局より招聘を受け、森林療法の研修会をおこなっている。毎回の研修会には熱心で、積極的な参加者が多い。また、現在中国では、森林を活用した健康増進と並行する形で、急ピッチで保健休養林や緑地造成に力が注がれてもいる。その中心樹種は、やはり生長が早く、枝の萌芽力の強いヤナギ、ポプラ類が多く、また公害に強いプラタナスなども数多く植栽されている(写真-2、3)。

このような状況下で、小生は北京市での森林療法の研修会を以下のような内容で行っている。

①森林療法とは？森林療法・森林の持つアメニティについての概論
②森林療法の事例（地域病院、社会福祉施設、学校、市役所、山村などにおける事例)
③コミュニケーションのワークショップ
④野外・森林での実地研修

研修会の参加者は、女性が圧倒的に多く、男性はごく少数であることが特徴だ（写真-4)。女性の参加者には積極的な方が多く、コミュニケーションの演習などでも実に生き生きと取り組まれる一方、男性の参加者には消極的な方が多いようにもうかがえる（写真-5)。しかし、こうした傾向は、日本国内の各地での研修会でもほぼ同様である。

また、研修会では、森林公園や、近隣の山林を利用して、必ず実地の研修を行うようにこころがけている。その際には、当地域の植生をはじめ、土壌、降水条件、薬用植物の有無、




写真-2　北京市の街路の植栽木　（左：ポプラ　右：プラタナス）




写真-3　北京市郊外の森林公園（人工植栽による造成である）



写真-4　2017年7月の北京市での第2回目の森林療法研修会





写真-5　コミュニケーションの演習風景。女性が圧倒的に多く、男性は少数である積極的に演習するのは女性であり、男性は片隅で眺めているケースが多い。




写真 –6　森林での実地研修の様子




写真 –7　植栽間もない北京市郊外の「森林公園」
外観は、森林よりも果樹園に近い！？



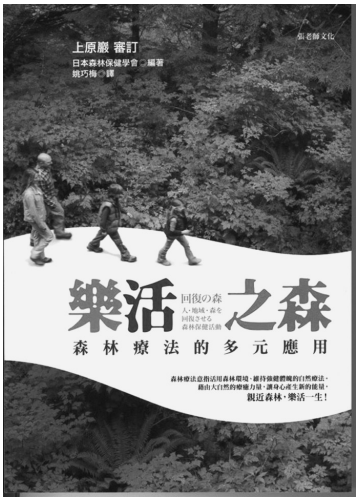


写真 –8　台湾での筆者の翻訳本（いずれも張老師文化社より 2013 年発刊）





写真 –9　台北市内・国際会議場での筆者の森林療法の講演会（2013 年）
数百名が集まり、会場はとても盛況！

地形療法としての林地活用、休養場所の設定などを実地に合わせて講習している（写真 –6）。

現在、中国、および北京市における森林療法の目的は、都市部に暮らす住民のメンタルヘルスや健康増進、生活習慣病の予防、健康増進などであり、日本における森林療法の目的と共通している部分が多い。また、中国においても、不登校や出勤拒否という社会現象がやはりあるそうで、そのことは当地に出かけてみて、実に意外であった。儒教思想が社会の共通基盤となっているためか、研修会の実施も欧米より進行しやすく感じることが多い。しかしながら、中国では、「型」「体裁」から入り、何はともあれ、「療法」「セラピー」の場を私たちも作っていますよという、外枠、外見上を整備することから急ピッチですすめる傾向もうかがえ、「森林」の実体を伴わない若齢林での研修となることもあった（写真 –7）。今後、中国における森林療法は、森林環境の遷移と並行して展開、発達、成熟していくのではないかと予想している。

台湾では、2013 年に筆者の拙著が二冊翻訳され（写真 –8）、同年より、台湾での森林療法の研修会を毎年担当するようになった。研修会は、台北のような都市部と、地域の山村の 2 か所の会場で行うことが多く、その参加者の傾向にも明らかな差異がある。都市部では、先に紹介した北京市同様に、都市部に暮らす住民のメンタルヘルスや健康増進、生活習慣病の予防、健康増進など、「みどりの環境」を渇望している参加者が多く（写真 –9）、山村部では、地域振興を目的とした参加者が多い（写真 –10）。これは、中国、台湾だけではなく、日本においても同じ傾向がうかがえる。

台湾における研修会でも、森林療法の概論にはじまり、地域高齢者、障害者、労働者、地域病院、福祉施設での小生の事例を説明するところまでは、都市部、山村部ともに共通して行っている。けれども、山村資源の豊富な山村部での実地研修会では、さらに傾聴、ブラインド・ウォーク、簡単なカウンセリング・ワーク、運動療法などの実習を行い、現地で

採集したクスノキ、台湾ヒノキなどの樹木から芳香水を作成する実習も行っている（写真–11、12）。台湾の山村においては、その地域高齢者の健康増進と、新たな産業、仕事としての保健休養の提供の2つが、森林療法の主な柱になっている。しかしながら、台湾においては、国の政策により、原則的に森林の伐採は禁止、保護されているため、森林療法の内容は、作業などの森林に働きかけるアクティビティよりも、散策、休養、鑑賞といった受け身的な内容に偏りがちになってしまう傾向もある。

ちなみに、北京市での研修会でも同様であったが、研修会において、漢字は共通言語として実に有効なツールであり、板書で意思の疎通、コミュニケーションをはかることがほぼ可能であることが再発見できたことも思わぬ副産物であった（写真–13）。

2016年12月には、筆者らの日本森林保健学会と台湾森林保健学会が協力協定を締結した（写真–14）。今後、お互いの森林、森林療法を通じて、国を超えた森林での友情の輪がさらに広がっていくことを強く願っている次第である。

さらに台湾では、森林と人間の健康を考える国際会議「森林療癒　國際研討會　International Conference of Forest Human Health and Well-being 2017」が、2017年11月26日（日）～27日（月）に、台北市の台湾林務局国際会議場で、台湾森林保健学会の進行のもと、開催された（写真–15）。会場には、連日200余名の参加者が集い、とても盛況で、フロアからの質疑応答も活発であった。筆者は、日本における地域医療、地域福祉、学校、市役所、住民グループなどによる森林療法の事例研究を基調講演した。会議翌日の28日(火)には、国立の東眼山森林レクリエーションエリアに出かけ、ワークショップが行われた（写真–16）。

台湾には、生態的に貴重な森林資源があり、文化人類的にも貴重な地域文化がある。その双方が生き生きと活用される形での森林療法の今後の発展を期待しているところである。

（次号　ヨーロッパ編に続く）





写真–10　南投県竹山村での研修会（2018年）
地元住民の方と、地域の竹林なども活用して研修会を行った。



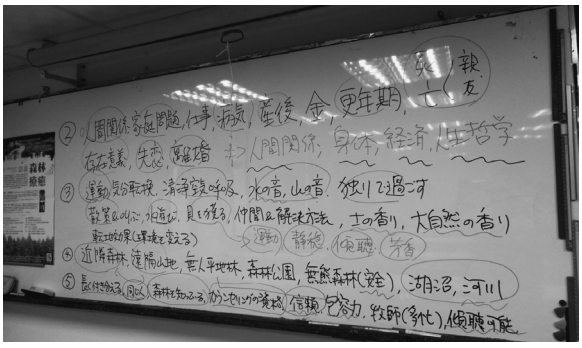


写真–11　南投県竹山村のビンロウ（ヤシ科）の人工林。
ビンロウの林冠下にコーヒーが植栽されている。現在、コーヒーは台湾の山村における主要な生産物の一つとなっている





写真–12　クスノキ、台湾ヒノキ、台湾スギなど、
当地の樹木の枝葉から芳香水を作る研修



写真–13　研修会での板書の一コマ。漢字はもちろん、日本語混じりの表記でも十分に理解され、日本での講義とほぼ同様に板書ができる！



写真 –14　日本森林保健学会と台湾森林保健学会との協力提携の締結
（2016 年 12 月　於：東京農業大学）





写真 –15　2017 年に林務局国際会議場で行われた国際シンポジュウム
地元開催の台湾からの研究発表の他、カナダ、韓国、日本からの発表が行われた

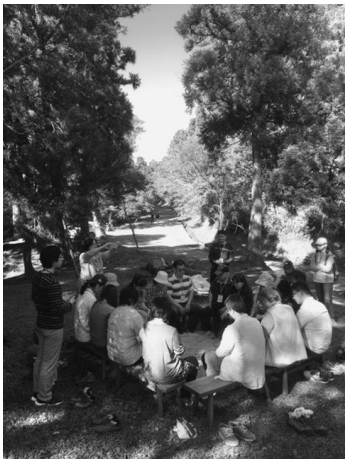




写真 –16　国立東眼山レクリエーション林にてのワークショップの様子
木質チップを素足の感覚で楽しむ

ブックス

森林科学シリーズ　1巻 森林の変化と人類

中静透・菊沢喜八郎 編、共立出版、2018年3月、268ページ、3,300円（税別）、ISBN 978-4-320-05817-0

人類は、地球上に登場以来、生きていく上で必要なモノの多くを森林から得てきました。薪や木の実などの採取から、樹木の伐採、開墾、植林と、人類は森林を変化させてきました。本書は人と森林との関わり方の変化と今後への展望を様々な観点から解説したものです。

序章では、森林変化を人との関わりの歴史から振り返る意義を解説しています。

第1章では、有史以来世界各地で起きている森林減少の話題を解説しています。森林資源の枯渇は各地で繰り返して起きている一方、近年森林を増加させている国もあり、森林減少問題を例に森林と人間社会との関わりの複雑さを知ることになります。

第2章は、日本列島における森林変化を環境史として解説しています。日本列島の地史的な環境に始まり、古代からの現代に至る森林やその利用の変遷を、年代を追って解説しています。とくに変化の大きい明治維新以降の近代における森林変化を、第2次世界大戦後を境として前半と後半に区切り、さらに戦後の拡大造林の影響とその後の変遷について1990年代を区切として解説しています。現在私たちが目にしている森林を含む景観がどのような社会的、自然的背景のもとに形成され、社会的な背景は国内の森林だけでなく周辺国の森林にも及んでいることを知ることになります。本章では豊富に配置されている脚注解説が読者の理解を助けてくれます。

第3章は、第2次世界大戦後の拡大造林により変貌した日本の森林の実態と、その再生への実践例を紹介しています。森林は人の関与がなくなると本来の姿である天然林に変化していくという考えに立脚して、森林再生を通じて地域再生を図るという取り組みはこれからの森林との関わり方を示唆しています。

第4章は、森林の変化と生物多様性の変化について解説しています。この100年間に日本の森林は大きく変化し、生物多様性も大きく変わったことを理解できます。そして生物の絶滅は不可逆的な変化であり、多様性を失うことの重大さに思いを巡らされます。

第5章は、前章までの人と森林との関わり方の歴史を踏まえて、「森林の多面的機能」と呼ばれてきた、人々が森林から受ける様々な恩恵を「生態系サービス」として整理し、その歴史的な変化を解説するとともに、生態系サービスの持続的利用に向けた問題提起がされています。

本書の解説で年代区切となっている「第2次世界大戦後」は人間活動が地球環境に与える影響が加速度的に増加した時代で「人新世」の始まりともいわれています。また、「1990年代」は地球環境問題が人類共通の課題になった年代で、日本だけでなく世界の森林変化を考える画期といえます。本書は、歴史的画期を踏まえた人と森林との関わり方を考えさせる論述にあふれています。これから森林のことを学ぼうという人はもちろん、これまで森林分野に関わってきた人にも一読をお奨めしたい一冊です。

森貞和仁（森林総合研究所）

生物学者、地球を行く まだ知らない生き物を調べに、深海から宇宙まで

日本生態学会　北海道地区会　編、小林真・工藤岳　責任編集、文一総合出版、2018年4月、228ページ、価格1,800円（税別）、ISBN978-4-8299-7107-9

この本には、深海、極地、山、乾燥地、森、都市、宇宙を調査地とする生態学者32人による28の話が収録されている。普段は縁のない世界とそこに住む生き物の話がくりひろげられており、興味深い。森林科学の読者で「深海」が調査地だという方は少ないと思うが、海水の95％は200メートル以深にあるそうで広大なフィールドだ。「極地」は遠くて寒くて大変そうだが、魅力的な研究対象だと聞いている。「山」、「森」には馴染みが深いと思うが、副題に「まだ知らない生き物を調べる」と書かれているだけあって、その調査地は「山」といっても高山、火山、極地であり、「森」といっても熱帯であったり、100メートルもの高さの樹上であったり、なかなか行けるところではない。「乾燥地」は水が少なくて暑いが、そんな環境にめげない生き物と研究者がいる。「都市」は人間にとっては身近な場所だが、人間以外の生物にとってはなかなか過酷な生育環境であり、そこに小さな生き物たちがけなげに暮らしていることに気づかされた。「宇宙」は地球外生物の話ではなく、地上最強の生物として名高いクマムシとコケを対象として、宇宙での生物の可能性を探る研究の紹介である。

どの話も、生き物の話としてもちろん面白く、また地球環境の現在の問題点やこれからの課題について考えさせられる点も多いのだが、調査にまつわる苦労話もとても面白い。著者それぞれのお人柄がにじみでていて、研究対象に対して愛情を持っているのが伝わってくる。研究のためとはいえ、よくそんな苦難に耐えられるなと感服するほどの方もいらっしゃる。生き物たちの凝らした工夫のナゾを解くことはそれだけ魅力的なのだろう。

親切に調査地へのアクセス情報が難易度と共に記載されている。が、難易度・初級、と書かれていても、世間一般には初級とは言わないのでは？という調査地も多く、著者らがつわものであることがしのばれる。

本書は生物学、生態学を学んでいる方はもちろん、生き物が好き、冒険が好きという一般の方にもお勧めできる一冊である。

長倉淳子（森林総合研究所）

H・フォン・ザーリッシュ 森林美学

W・L・クック・Jr、ドリス・ヴェーラウ　英訳・解説、小池孝良・清水裕子・伊藤太一・芝正己・伊藤精晤　日本語版監訳、海青社、2018年6月、384ページ、4,000円（税別）、ISBN 978-4-86099-259-0

本書は、元森林官のドイツ人、H・フォン・ザーリッシュが1885年に著した本の第二版を重訳したものであり、これにより私たちは初めて日本語でこれを読むことができるようになった。

ザーリッシュによると、森林美学とは“施業林の美の学問”であり、“森林の美がどこにあるのか、森林の美をどのように育てるのかを示す”学問とされている。

原著の第二版が発行されたのは1902年（明治35年）であり、日本では森林法が制定されてようやく5年が経った頃である。そんな時代にドイツではすでに森林を美の観点から科学していたということになる。日本語版序文を記した信州大学名誉教授の伊藤精晤氏によると、当時のドイツは、“木材生産の優先から環境とのバランスが問題とされる時期”であったという。

本書は、第一部で森林美学の基本的な考え方を説明した後、第二部で土地利用や林道設計、伐期齢の決定等に応用する方法を詳説する二部構成となっている。本書で形作られる森林美学とは、林道設計や作業種、樹種や更新方法等といった林学領域に加えて、樹木の配置や色、においといった造園学的、芸術的な領域を森林管理に組み込む考え方である。そのため、この書は実験結果やそこから導き出された考察から成る一般的な論文や学術書とは一線を画している。

そしてザーリッシュは森林管理には哲学的な思考や芸術的な視点が必要であることを効果的に表現するため、詩的な表現を多用している。これが本書の理解を難しくしているようにも思われるが、全体の流れを大きく捉えると、柔軟な感性を森林管理に導入することが、森林の価値を高めるために重要であることを示しているようにも考えられる。

例えば、本書の序盤において、“森林こそ、森で働く人にとっての展覧会であり、コンサートホールであり、映画館であり、図書館なのです。（中略）私は最近、自然を楽しむことが、近代人にとって実は芸術を楽しむことの代わりになっていることに気づきました”、といった言及が見られる。このような表現によって森林が単なる木材生産の場としてだけではなく、レクリエーションやセラピーの場としての可能性を秘めていることを訴えているのではないだろうか。

一方で、原著はドイツで100年以上前に著されたものであることや、その独特な表現方法のため、現代の読者にとっては理解が難しい箇所が含まれていることをあらかじめお伝えしておくべきだろう。

ただし、ザーリッシュの森林官としての経験・知識とともに、自身の所有する森林において、自らの考える森林美学に基づく森林管理を実践してきたことから、その文書には実体験に基づく深みがある。また、豊富な文学や芸術、森林美学に関する先駆者達等の豊富な引用文献や、当時の森林を撮影した貴重な写真も見どころの一つであろう。

2018年に森林法が改正され、日本の林政はついに森林保育から木材生産に舵を切り、スマート林業や林業成長産業化等、生産量を増大させるための取組に最も注目が集まっている。森林管理の全てを統計的な価値観で判断しかねないこれからの時代にこそ、「森林美学」は今後の人間と森林のあり方について大きな示唆を与えるだろう。

森林管理を実際に行っている林業事業体や森林所有者の方、もしくはこれからの森林管理を考えている行政の方には是非、ザーリッシュが提示した「美」の視点にも注目してほしい。

吉田城治（日本森林技術協会）

生態系生態学（第2版）

F. Stuart Chapin III, Pamela A. Matson, Peter M. Vitousek 原著、加藤知道 監訳、森北出版、2018年7月、608ページ、11,000円（税別）、ISBN 978-4-627-26122-8

この本は世界的に著名な教科書である「Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology」の邦訳書である。そもそも『生態系生態学』とは一見なかなか奇妙なタイトルではないか？生態学というと、例えば光合成の生化学のような、比較的小さな時間・空間スケールの学問である。一方生態系というと、物質循環や食物連鎖などといった、大きなスケールに注目することが多い。この本の一番の特徴は、この二つのスケールを結びつけるような、系統的な知見を提供していることである。光合成を例にとると、「第5章 生態系への炭素インプット」においては、一般的な光合成の解説（光化学反応・葉緑体の構造など）から始まり、そこから光合成生物が効率よく光合成ができる条件の解説（光・温度・水分などの制限）が続く。最後には、地球上のどの場所（陸域の群落プロセスなど）や時期（季節変化など）に活発な光合成が起きるのか、と議論がつながる。原題にはTerrestrialと記載されているものの、章によっては大気や河川、海洋の生態系や物質循環についても解説されている。まさに分野横断的な知見を提供してくれる、そして様々な人―初学者からある分野の専門家、研究者から行政

官まで―、にお勧めができる、良書であると言えよう。

非常に分厚い本であるので、この本を読む際には、まず各章の目次や「はじめに」「焦点」の部分に目を通し、その章がどのような事象をターゲットとしているのかを確認しておくことをお勧めする。「第Ⅰ部 背景（第1―3章）」や「第Ⅱ部 メカニズム（第4―11章）」の部分はともかく、「第Ⅲ部 パターン（第12章 時間的動態、第13章 景観の不均一性と生態系動態）」の部分などは、章の題名からは内容がなかなか掴みにくいであろう。各章の最後には、まとめや復習問題も掲載されており、正しく内容を理解できたかを確認することができる。また、分野横断的な解説の裏返しで、各専門分野の内容が複数の章に分散してしまっている感は否めない。例えば「土壌」に関しては、組成やその機能といった基本的な内容が「第3章 地質、土壌、堆積物」に、土壌水分に関する内容が「第4章 水・エネルギー収支」に、リターの分解に関する内容が「第7章 分解と生態系炭素収支」に記載されている。関連する情報は第○章を参照、というリンクこそ記載されているものの、他の専門書と並行して読み進めることで、より深い理解につながるであろう。

この本のもう一つの特徴として、人間と生態系の関わりについても詳細に解説されている（「第Ⅳ部 統合」など）。近年の人間活動によって、生態系は全球規模で大きく変動している。一方、人間も生態系サービスを利用しなければ、生きていくことができない。人間のより持続的な発展のために、どのように生態系を管理していく必要があるのかについても、この本は貴重な情報を提供してくれる。

眞中卓也（森林総合研究所）

土　地球最後のナゾ 100億人を養う土壌を求めて

藤井一至　著、光文社、2018年8月、219ページ、920円（税別）、ISBN978-4-334-04368-1

本書は若手森林土壌学者による、幅広くかつ奥深く土壌の面白さについて書かれた本である。カラフルな土壌の写真やカラーでわかりやすい図が多く含まれており、土壌について初めて知る読者にとっても興味を引き理解できるよう工夫されている一方で、土壌にかかわる研究者にとっても楽しく読める内容となっている。

第一章は、「地球にしか土がない」という話から、地球の土と火星や月の砂や岩石との違い、土の色の話、粘土や腐植の話を通じて、土とは何かということがわかりやすく解説されている。粘土の性質を擬人化するなど、親しみやすく工夫し説明されている。また第二章は、12種類すべての土を見るという土壌学者にしか理解できない夢（！）を叶えるために、インドア派であった筆者が苦労を重ねながらスコップ一本を手に世界中を旅する冒険談を通じて、12種類の土の特徴が楽しみながら学べる内容となっている。教科書的な内容だけでなく、生産力の低い土壌の森で生息するオラウータンが小さいといった話や、プレーリードックやジリスが土を耕すことによりチェルノーゼムが深くまで腐植のある肥沃の土となっている話などが織り交ぜてあり、飽きさせない。また同時に筆者が世界を旅しながら学生からポスドクを経て、研究者になるまでの過程も書かれており、苦労がしのばれるとともに研究への情熱が感じられる。第三章は地球の土で100億人を養うためにはどうすればよいのか、肥沃な土とはどういう土なのか、ということが考察されている。オーストラリアの塩類集積や、農業を諦めたボルネオの人々が土を売り始めているなどの危機的状況が紹介され、肥沃な土壌がいかに大事なものであるかを再認識させられる内容となっている。100億人を養うことに対する簡単な答えはないものの、本書を読めば土にこれまで興味がなかった方にも土の研究の重要性が理解してもらえるものと期待される。また第四章では、日本は世界でも数少ない水と土の両方に恵まれた場所であるということが解説されている。一般に「地味」とされる土であるが、筆者の土への思いが伝わってくる本である。筆者の努力に敬意を表したい。

唯一注文をつけるとすれば、本文中の土壌の名前をわかりやすい日本語に変えてあるが（例：ひび割れ粘土土壌＝バーティソル）、土壌の名前を知っている読者はちょっと混乱するのではないかと感じた。最後のあとがきに日本語に変えた土壌の名前の解説があるのだが、初出時や口絵にもかっこ書き等で加えてあればありがたい。土壌の名前をすでにご存じの方には最初にあとがきを読んでから読み進むことをお勧めする。

全体的に、大変読みやすく楽しい本である。ぜひ一読されることをお勧めしたい。

秋山博子
（農研機構農業環境変動研究センター）

実践土壌学シリーズ1 土壌微生物学

豊田剛己　編、朝倉書店、2018年8月、208ページ、3,888円（税込）、ISBN 978-4-254-43571-9

本書は、土壌に生息する細菌・菌類などの微生物について、その生態や物質循環に及ぼす機能、植物との相互作用などの基礎な情報から、植物の生産性の向上や環境浄化への活用など応用に至るまで、最新の研究成果を踏まえて幅広い視点から「土壌微生物」を体系的に解説している。序章に「持続的な作物生産を成し遂げるには、土壌微生物のはたらきを熟知し活用することが必須」とある

ように、地球温暖化や気候変動、環境汚染、市場競争の激化など様々な諸問題がとりまく国内農業に、土壌微生物の力を少しでも役立てたいという思いが、この本の念頭にあるように感じられる。そのため、草本作物や農地を対象としたトピックが多く占めていることを予めご理解いただきたい。

本書は13章で構成される。1章では、火山が噴火して出来た裸地にいち早く侵入する微生物の多様性や、窒素・炭素固定、無機物の風化など物質循環にはたす役割について、2章では土壌の団粒構造と植物根圏が、物理的・化学的にどのように微生物の住処を形作るのか解説している。3章では土壌微生物の分類が概説されており、主な分類群の生態や機能が簡潔にまとめられている。4章では土壌微生物の採集方法や種類の同定、機能の推定方法など、古典的なものから最新のDNA解析・分析機器を用いた手法が紹介されている。5章では窒素循環における窒素の無機化、硝化、脱窒の諸現象のメカニズムの解説と、それぞれに関与する微生物の分類や生態がまとめられている。6～8章では植物の成長を助ける有用微生物に焦点を当てており、6章では窒素を固定する細菌、7章ではリン吸収を促進する微生物、8章では植物の生育を促進する根圏微生物について、各現象のメカニズムや関与する微生物の分類、生態が詳細に解説されている。9章では植物の生育に害をなす病原微生物の種類と防除方法が紹介されている。10～12章では、生態系に焦点を当てて、そこに生息する微生物の多様性や働きが解説されており、10、11章ではそれぞれ水田、畑における土壌の構造、微生物の多様性と機能、またそれらの物質循環や、肥培管理等の農作業との関連性がまとめられている。12章では森林における微生物の多様性と機能、物質循環に果たす役割について、分解されにくい木質成分の存在など森林生態系の特徴を踏まえながら解説している。最後に13章では日常で使用されてきた農薬等の有害化学物質の種類と微生物による代謝について解説されている。本書では、土壌微生物の多様性、生態や物質循環等の生態系における機能・役割など、土壌に関連する研究を進めていく上で知っておきたい最新の知見が簡潔に整理されているので、各分野の最新情報を概括的に理解したい学生や研究者にとっての解説書に適した1冊といえる。

最後に、土壌微生物と同じく重要な働きを担う土壌動物については、同じシリーズの「実践土壌学シリーズ2　土壌生態学」で解説されているので、本書に興味を持たれた方はそちらも一読されたい。

小長谷啓介（森林総合研究所）

実践土壌学シリーズ2
土壌生態学

金子信博　編、朝倉書店、2018年8月、216ページ、価格3,600円（税別）、ISBN978-4-254-43572-6

生物の働きや多様性が、あらゆる生態系の維持管理やその生態系がもたらすサービスの持続性にとって、基盤として重要であることが解明されてから久しい。環境変動により生物種が消失あるいは加入することで生物群集の改変が予測されている現在、多様性保全が、農業や林業等、第一次産業をはじめとする様々なセクターの持続的発展性に必須であることは広く認識されている。しかし、地球上の生物多様性の最も大きな貯蔵場所でもある土壌生態系について分かっていることは未だ非常に少なく、国際的にもその重要性に注目が集まり始めたばかりの段階にある。

本書は、この未解明なことが多い土壌生態系について、主に土壌動物を対象に最新の知見を交えて広く解説されている良書である。分類と生態の双方をカバーし、実際の研究において現在使われている手法についても詳しく説明されているのが特徴だろう。第1章にて土壌生物の全分類群を対象に概要が述べられた後、第2章から第5章にかけて原生生物、線虫、土壌節足動物、ミミズ、と各分類群に関する詳細が記述されている。その後、第6章から第9章にかけて土壌動物と土壌微生物との関係や、有機物分解等の物質循環における土壌動物の働き、土壌動物と植物や地上部の動物・昆虫との関係など、生態学の主要トピックである生物・非生物との相互作用に焦点があてられている。そして第10章から第12章にかけては、林業や農業など実際の産業と関連する知見が紹介され、生態系サービスや地球環境問題とも絡めた研究成果が紹介されている。

土壌生態系において大きな役割を果たす土壌微生物に関する記述が少ないことは、土壌生態学というタイトルを冠する本書にとって少し残念な気もするが、これから「土壌動物学」を広く学びたいという学生にとってはぴったりの入門書になるだろう。また、植物・動物など他の生物を対象とする研究者や農林業に関わる行政関係者・経営者らにとって、本書は最新の知見を日本語で容易に手に入れられる便利なツールとなるに違いない。土壌生態学に関する主要な研究は多くが海外で行われ、日本人が行った研究であってもそれが日本語で発表されることはほとんどない。多くの人にとって馴染みが薄いであろう土壌動物の説明には聞いたこともない専門的な英単語が溢れ、英語が読める人にとっても難解なことだろう。今後の陸域生態系の管理において、土壌形成や肥沃化、二酸化炭素フラックスの制御、土壌侵食の防止、毒性物質の浄化など、言い尽くせないほどに膨大である生態系サービスを提供している土壌生物を無視したままでいることは不可能であり、本書が日本において研究と現場をつなぐ一助となることを期待している。

藤井佐織（森林総合研究所）

「森林科学」への投稿について

「森林科学」投稿要領

（2016 年 12 月 22 日改訂）

1. 投稿できるのは日本森林学会会員および「森林科学」購読者のみとする。ただし筆頭者以外の共同執筆者および依頼による記事の執筆者についてはこの限りではない。
2. 原稿は、解説、記録、研究トピックス、読者の声、その他とし、和文とする。
3. 原稿の採否は編集委員会が決定する。
4. 原稿の長さは原則として、すべてを含む刷り上がりが解説、記録は 4 頁以内、研究トピックス、読者の声、その他は 2 頁以内とする（2,000 字／頁を目安とする）。
5. 投稿原稿は執筆要領にしたがって作成し、電子メールで提出する。
6. 著者校正は原則として初校に限り、誤植の訂正にとどめる。
7. 解説・記録・研究トピックスの著者は別刷 50 部を希望により無料で受け取ることができる。無料分以上（50 部単位）および pdf 別刷りを希望する場合は、著者の負担とする。
8. 原稿の送付および編集についての問い合わせは森林科学編集主事あてとする。
9. 著者は最終原稿を提出する際に、著作権譲渡承諾書を提出しなければならない。

著作権について

（日本森林学会学会誌等刊行規則（2011 年 6 月 15 日制定）第 15 条より抜粋、一部修正）

1. 本会の刊行物への掲載が受理された記事、論文等の著作権は、本会単独であるいは本会の定める出版社と共同で、本会に帰属するものとする。
2. 著者に許容される権利については、刊行物ごとに別に定める。

「森林科学」執筆要領

（2018 年 12 月 10 日改訂）

1. 原稿の書き方

専門分野以外の読者が理解しやすいように、図表や写真を多くし、わかりやすく、簡潔な表現を用いる。図にできる場合はなるべく表を使わない。目安として、少なくとも 1 頁に 1 つの図や写真を入れるようにする。

2. 投稿原稿の種類

解説：特定の研究テーマや話題に関する解説
記録：シンポジウムや研究会の記録
研究トピックス：プロジェクトや国際共同研究、特徴ある研究の紹介
読者の声：読者の意見や主張
ブックス：書評、出版物の紹介
その他：上記以外の内容についての投稿。編集主事まで問い合わせること。

3. 原稿の形式

原稿の種類に合わせて、以下の内容をそれぞれページを分けて記載すること。

①投稿連絡票（表題、著者名、所属先、原稿種類名、連絡先（住所、電話番号、電子メールアドレス））、②本文、③引用文献（「解説」·「記録」·「研究トピックス」で必要な場合のみ。最大 10 点を目安に。）、④図表、⑤図表の説明、⑥紹介する印刷物の書誌情報（ブックスのみ。著者・出版社・出版年・頁数・価格・ISBN。）

4. 原稿の体裁

原稿は電子メールに添付しての提出を基本とする。ファイル形式などの詳細については編集委員会が定める「原稿執筆ガイドライン」を参照のこと。

図表の表題にはそれぞれ通し番号をつけ、1 点ごとに別ファイルとする。各ファイルには筆頭著者名と通し番号を含む分かりやすい名前を付ける。

5. 引用文献

引用文献は必要最小限とする。本文中での引用は、①引用順に（1）、（2, 3）のように上付きの通し番号を振る、②該当人名に（年号）あるいは事項に（人名　年）をつけて引用する。混用はしないこと。引用文献の記載は、①では通し番号順、②ではアルファベット順に行う。誌名の略記法は和文の場合は慣例により、欧文の場合は日本森林学会誌に準じる。巻通しページがある場合は巻のみとし、ないときは巻（号）を併記する。

＜引用文献記載例＞

a. 雑誌の場合

笠井美青・丸谷知己（1994）山地河川における立木群による土砂の滞留機構．日林誌 76: 560–568

Ochiai Y, Okuda S, Sato A (1994) The influence of canopy gap size in soil water conditions in a deciduous broad-leaved secondary forest in Japan. J Jpn For Soc 76: 308–314

b. 書籍の場合

Levitt J (1972) Responses of plant to environmental stresses. Academic Press

渡邊定元（1994）樹木社会学．東大出版会

c. 書籍中の場合

小林繁男（1993）熱帯土壌の痩悪化．（熱帯林土壌．真下育久編，勝美堂）．280–333

Wells JF, Lund HG (1991) Integrating timber information in the USDA Forest Service. In: Proceedings of the Symposium on Integrated Forest Management Information Systems. Minowa M, Tsuyuki S (eds) Japan Society of Forest Planning Press, 102–111

d. ウェブページの場合

Nair MNB (2003) Gum tapping in *Sterculia urens* Roxb. (Sterculiaceae) using ethephone. Paper submitted in XII World Forestry Congress 2003, Quebec, Canada. http://www.fao.org/docrep/ARTICLE/WFC/XII/0148-B4.HTM (2017 年 12 月 15 日確認)

林野庁（2017）平成 28 年木質バイオマスエネルギー利用動向調査．http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou /mokusitu_biomass/index.html (2018 年 4 月 24 日確認)

原稿の送付および編集についての問い合わせ先は下記あてとする。

森林科学編集主事　古川拓哉
〒 305–8687　茨城県つくば市松の里 1
国立研究開発法人 森林研究・整備機構
森林総合研究所 生物多様性研究拠点
Tel 029–829–8224
e-mail tfurukawa@affrc.go.jp

学会事務についての問い合わせ先

一般社団法人　日本森林学会
〒 102–0085　東京都千代田区六番町 7
日本森林技術協会館内
Tel/Fax 03–3261–2766
https://www.forestry.jp/

複写をされる方に：一般社団法人学術著作権協会へ複写権委託済み
許諾・連絡は、〒 107–0052 東京都港区赤坂 9–6–41 乃木坂ビル 3F（e-mail: info@jaacc.jp, URL: https//www.jaacc.jp/）

山そして森林

逢沢　峰昭（あいざわ　みねあき、宇都宮大学農学部）



森林に関わる研究や教育に携わる方々がどのような経緯で今に至ったのか、きっと人それぞれで、心々だろう。毎年４月、学科に新入生が来て、新しい世界への希望と不安で満ちた彼らと向き合うにつけて、自身の経緯をふと振り返ることがある。今自分がここにいるのは、きっと山を通した縁があったからなんだろうと。

海なし県で生まれ育ったこともあって、高校時代は大学で海産魚類について勉強したいと考えていた。山岳部に入っていたため、山で森林を見る機会は幾度もあったのだが、それを学びたいとか研究したいとは思いもしなかった。残念ながら海産魚類を学ぶという夢は大学受験で潰えてしまい、学部時代は、その反動もあって、社会人山岳会で夏冬問わず岩登りなどのアルパインクライミングに精をそそいだ。谷川岳や甲斐駒ケ岳などの岩壁のどこにどのルートがあるかなど、今でも指呼したくなる。雨で山行のない週末には、山岳雑誌や神田の古書店で買った山岳書、アルパインクライマーのバイブル的存在であった白水社の日本登山体系などを何度も読み直したりしていた。そんな中、学部４年生の時に、縁あって、山に行くことに非常に理解のある先生の研究室に分属することになり、亜高山性針葉樹の水分生理について研究することになった。雪山に行って、モミの仲間のオオシラビソとシラビソの枝をとってきて、水ポテンシャルやクチクラ蒸散などを測定して、日本海側の亜高山帯林に多いオオシラビソと、太平洋側の亜高山帯林に多いシラビソの分布の違いを説明できないかというのがテーマだった。むろん研究対象としてこれらの樹種に興味はあったものの、森林についてそれほど興味があるわけでもなかったように思う。しかし、卒論研究を進めるうちに、亜高山性針葉樹の分布を地史的観点から論考した論文を読んで強い感銘を受けた。はからずも、その著者の先生が修士課程の学生を募集し始めるということで、幸いにも試験に合格して、晴れてその先生のもとに進学することになった。この先生もまた非常に山に行くことに理解のある先生で、修士課程では、先生が学生時代に作った亜高山性針葉樹の分布資料の再検討から進めることになり、関東地方の山を中心によく歩いた。そして、奥手ながら、この頃から知らない植物を採集したり、森林について勉強するようになった。

当時は思いもしなかったが、この時に植物を意識して山を歩いた経験は、自身の博士課程のテーマを決める上でや、今日に至るまで非常に役立つことになった。どんな植物が、どこの山にあるのか把握できたことで、自分自身の研究ばかりか、今日指導学生のテーマや調査地の選定、国内外の研究者の方々からの調査地やサンプリング場所の相談依頼を受けた際に、非常に役立っている。さらには、学生時代を通して培った、アルパインクライミングのロープや登攀技術が、樹上の調査や、針葉樹の球果採集に活きている。

３年前から科研費の研究課題として取り組んでいるヤマビルの研究もそうだ。学生時代に、谷川岳の南面の沢を登った際にはじめてヤマビルに吸血され、その印象が強く残っていたからだ。当時、足繁く通った神奈川県丹沢の沢筋でもヤマビルは見たことはなかったが、2000 年代から丹沢、群馬、栃木でヤマビルが増えてきたのを実感あるいは知るにつけて、研究テーマにできないかと考えていた。そして、ヤマビル自身の DNA を調べれば、現在のヤマビルの分布拡大が、昔から分布していた集団を核として生じているのか明らかにできるのではないか、さらに、ヤマビルの体内に残っている吸血した動物の血の DNA を調べることで、ヤマビルがどんな動物の血を吸って、運ばれているのかわかるのではないかと考えていた。はからずも、ヤマビルを研究したいという少壮気鋭の M さんが進学してきて、修士・博士課程と研究を進めており、おもしろい知見が得られている。また、学生時代に愛読した日本登山体系や多くの山岳書などにもヤマビルに関する記載が出ていたことを思い出し、山岳書などの文献調査を基にして、ヤマビルの過去の分布をおおよそ再現できた（逢沢・森嶋 2018 1980 年代以前のニホンヤマビルの分布 . 日林誌 100 : 65-69）。これらはいずれも、山を通した縁のおかげである。

そう、自分にとっては、森林に関わる知識や技術は山を歩くことで培われてきたし、今後も培っていきたい。そればかりか、山の好きな高校生や大学生に対して、山で培われた知識や技術を深め、発揮できる場が森林科学にはあることを伝えていきたいと思っている。

南の里地・里山ボランティアから考える保全と将来

朝廣　和夫（あさひろ　かずお、九州大学芸術工学研究院）



私は緑地保全学を標榜し、都市緑地から里地・里山の保全を主なテーマとしている。1992 年ごろ、九州芸術工科大学環境設計学科で建築を中心に学ぶ一方で、干潟、自然環境の保全に興味を抱いた。当時は、海浜地域で埋め立て事業が進む中、なぜ、干潟は大切なのだろうかと考え、地域の歴史、干潟の物理化学性、都市の発展と干潟の変容、土地利用と生物の分布などの理解に努力した。見えてきたものは、生態系の豊かさ、先祖の共生の知恵、そして、都市化･近代化の課題であった。民間都市計画コンサルから助手として九州芸術工科大学に戻り、里地・里山保全ボランティアを基軸に教育･研究を、故重松敏則教授と行った。経済価値を失った里地・里山に、都市住民のレクリエーションの場を設け、里山の再生を見出そうとした取組みである（重松 1999 新しい里山再生法 全国林業改良普及協会 林業改良普及双書 130）。これは、都市・農村問題を解決する、一つの解であるという確信があった。里地・里山でのレクやボランティアの体験を通じ、愛着を育み、それが人々の経験として定着するからである。

デザインの部局に席をおく私は、教育研究のみならず、実践において、複数の草鞋を履いて活動をしている[1)]。この里地・里山ボランティアの流れは、主に、福岡県八女市黒木町に事務局を置く NPO 法人山村塾との共同が多い。平成 24 年 7 月九州北部豪雨により、この地域は甚大な被害を被った。道路寸断により孤立した NPO 事務局は、宿泊していた海外ボランティアと避難所運営を行い、う回路が通じた被災後 2 週間頃に、家屋の土砂出し、水路の復旧など、農業支援・農地等復旧ボランティア活動を展開した。この活動は、隣町の星野村、うきは市にも展開していった。平時より、棚田や森林保全を都市農村交流で実施していた各地域だからこそ、農地復旧ボランティアの力が発揮された好事例である。この 12 月には、JST-RISTEX の「コミュニティがつなぐ安全･安心な都市･地域の創造領域」に「中山間地水害後の農林地復旧支援モデルに関する研究」を申請・採択され、2016 年に手引き（朝廣・小森 2016 農地復旧のための共助支援の手引き 九州大学 59）として Web に公開した。

このような活動の一方で、①八女市のスギ・ヒノキ人工林における群状間伐とコナラ・ヤマザクラの植栽活動を 2007 年から、②バングラデシュ・テクナフ半島における貧困と森林消失に関する研究に 2009 年から、そして、③九州大学ソーシャルアートラボの設置と農山村における半農半アートのプログラムに 2015 年より携わっている。①は、NPO 活動の中で、植林ニーズはあるものの植林する場所がないこと、15 m 四方の伐採・片付け・植栽活動が市民活動規模としてちょうどよく、半日蔭環境での森づくりも、草刈り・ツルきり労力を削減することができ、苗木の成長や生物多様性にもプラスに働くのでは、と開始した。しかし、コナラには照度が不足し、雑木小径材の活用が現在の課題である。②は、貧困により収奪された TWS(Teknaf Wildlife Sanctuary) を対象に、谷正和（文化人類学）教授をリーダーに、全集落の社会・経済的調査と、ソーシャルフォレストおよび樹林の成長量調査を進めている。森林荒廃は人々の生活の高い森林依存が原因であるが、屋敷林は保全されており、地域や集落ごと、民族や職業の違いによる差異が確認された（Tani *et.al* 2017 Deforestation in the Teknaf Peninsula of Bangladesh Springer 204）。国・時代は異なるが、昔の里地・里山の営みを見ているようである。③は、芸術工学研究院の音響、芸術等の先生方と、「社会の課題にコミットするアート」をテーマに、センターを設置し、文化庁の支援を得てアートマネジメント人材育成を進めている（九州大学ソーシャルアートラボ編 2018 ソーシャルアートラボ地域と社会をひらく 水曜社 236）。過疎化の進む農山村において、将来の絵を描くには、産業の振興が不可欠である。その一方で、地域の価値を捉え、表現、伝達する活動が必要と考えている。私は、里地・里山ボランティア活動の延長に、半農半アート、非常時の災害ボランティアを位置付けている。今後、森林保全や森づくり活動においても、新たなプログラムの創出に努力したい。

1）NPO 活動として主に、森と市民を結ぶことを目的に「ふくおか森づくりネットワーク」を 2002 年より、環境保全活動リーダー育成を目的に「NPO 法人日本環境保全ボランティアネットワーク（JCVN）」を 2009 年より実施継続している。

Coming Next !

森林科学 86 予告

特集
小笠原島嶼生態系の研究と保全（仮）

森林科学 86 は 2019 年 6 月発行予定です。ご期待ください。

本会は、複写権の行使について、下記の一般社団法人学術著作権協会に委託しています。本誌に掲載された論文の複写をご希望の方は、公益社団法人日本複写権センター（一般社団法人学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括的許諾契約を締結されている企業等法人の社員による社内利用目的の場合を除き、日本森林学会が複写に関する権利を委託している下記の団体から許諾を受けて下さい（社外領布用の複写は許諾が必要です）。電子的複製についても同様です。

一般社団法人学術著作権協会
107-0052　東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F
info @ jaacc.jp　　https://www.jaacc.jp/

お知らせ

・「森林科学」では読者の皆様からの「森林科学誌に関する」ご意見やご質問をお受けし、双方向情報交換を実践したいと考えております。編集主事まで e-mail でお寄せ下さい。

・日本森林学会サイト内の森林科学のページでは、29 号以降からの目次および 56 号以降のオンライン PDF がご覧いただけます。また、紙媒体のバックナンバー（完売の号あり）の購入申し込みもできます。

・刊行から一年間は、森林学会会員の方は別途お送りするパスワードでオンライン版をご利用になれます。その後はどなたでも閲覧できます。パスワードに関するお問い合わせは編集主事へどうぞ。

森林科学編集委員会

委員長　松本　麻子（森林総研）
委員　古川　拓哉*（植生/森林総研）
岡本　　隆*（防災/森林総研）
岡　　輝樹（動物/森林総研）
深山　貴文（気象/森林総研）
江口　則和（保護/農水事務所）
田中　一生（経営/日本森林技術協会）
長倉　淳子（土壌/森林総研）
平野悠一郎（林政/森林総研）
磯田　圭哉（育種/森林総研）
田中　　恵（土壌・造林/東京農大）
斎藤　仁志（利用/信州大）
田中　憲蔵（造林/森林総研）
大橋　伸太（木材/森林総研）
竹本　太郎（林業遺産/東京農工大）
宮本　敏澄（北海道支部/北海道大）
林　　雅秀（東北支部/山形大）
逢沢　峰昭（関東支部/宇都宮大）
松浦　崇遠（中部支部/富山県森林研）
永松　　大（関西支部/鳥取大）
川崎　章恵（九州支部/九州大）
（*は主事兼務）

編　集　後　記

特集「広葉樹二次林の炭素循環研究の最前線」、いかがでしたでしょうか？ 普段、私は森林気象関係の編集委員としてシリーズ「森をはかる」を担当しています。このシリーズは限られた紙面のため、様々な測定手法をご紹介するにとどまっています。特にフラックス研究については、これらの多様な測定手法を使ったアプローチが必要とされている研究全体の枠組みが十分にご紹介できていないのではないか、と感じていました。今回の特集によって、これらを詳しくご紹介できる機会を頂くことができ、大変ありがたく思っております。この場をお借りしまして、この特集を支えて下さった執筆者、編集者の皆様にお礼申し上げます。物質循環全体を相手にしたこの研究分野は、空間的にも時間的にも、今できる限界まで広い範囲で、カウントできる全ての項目について把握しようとする、非常に熱い意気込みを持った研究者達によって支えられています。この研究の枠組みは一見、小宇宙の様に複雑で今の人間には大き過ぎるようにも見えます。しかし、研究者達は全構成要素を相手にする限り、時代と共に新しい測器や手法、アイデアを次々加えていくことで、じわじわと朧気だった森林生態系における全ての生産者、消費者、分解者の役割とつながりを定量的に示し、理解していくことができる、と信じて研究に取り組んでいるのだと思います。この特集の中では構成要素を漏らさないために込み入った記述もあると思いますが、そこは研究者達の思いが一番こもった部分でもありますので、それを含め、読み取って頂けたら幸いです。

（編集委員　深山貴文）

効果持続期間 7年

7年先の確かな未来を

確かな効果

豊富なデータが裏付ける確かな効果で
皆様の信頼に応えてきた
グリンガード・NEOは
7年間の薬効期間という
新たな時代の夜明けを
迎えました。





松枯れ防止樹幹注入剤

グリンガード®・NEO

Greenguard® NEO

農林水産省登録：第 22028 号

株式会社 ニッソーグリーン

「林業遺産」
選定事業について

日本各地の林業は、地域の森林をめぐる人間の営みの中で編み出され、明治期以降は海外の思想・技術も取り入れつつ、大戦期の混乱を経て今日に至るまで、多様な発展を遂げてきました。

日本森林学会では、学会100周年を契機として、こうした日本各地の林業発展の歴史を、将来にわたって記憶・記録していくための試みとして、「林業遺産」選定事業を2013年度から開始しています。

各年度ごとに、林業発展の歴史を示す景観、施設、跡地等、土地に結びついたものを中心に、体系的な技術、特徴的な道具類、古文書等の資料群を、林業遺産として認定しています。

会員の方々はどなたでも推薦できます。非会員の方も、該当される地区の林業遺産地区推薦委員等を通じて応募することができます。

詳細情報については、学会ウェブサイト「林業遺産」をご参照下さい。
http://www.forestry.jp/activity/forestrylegacy/





林業遺産
ロゴマーク

日本森林学会
The Japanese Forest Society Since 1914