



森林

科学

[特集]

樹木の根

[第2特集]

福島原発事故の森林生態系への放射能
汚染影響を考える

フォーラム

「森林学の過去・現在・未来」 (4)

シリーズ

森めぐり

水の森、インドネシア中部カリマンタンの熱帯泥炭
湿地林

スコットランドの森 Culbin

No. **65**
June 2012



安価な LAI 観測が可能なプラントキャノピーアナライザー

CI-110

(シーアイ 110)

CID社製のCI-110は、森林内での上空を撮影する画角150度の魚眼レンズとCCDカメラ搭載の安価(従来製品の半値以下)なプラントキャノピーアナライザーです。本体を草木の下で持ちながら、接続した専用ターミナルでリアルタイムの高解像度魚眼イメージを撮影できます。

任意のタイミングで静止画をキャプチャし、そのまま画像の葉面積指数(LAI)や光量子(PAR)解析が可能です。

イメージをキャプチャした後、付属のソフトウェアで太陽光線の透過係数を、天頂角と方位角のグリッド数(設定可)により算出します。

専用タブレットPCはGPS内蔵で測定した位置情報も記録されます。



専用タブレットPC

スウェーデン製 成長錐 (インクリメントボア)



Haglof(ハグロフ)社のインクリメントボア(成長錐)は成長・年輪・樹齢を高精度で測定できます。70年以上の歴史を持つ世界中で使用されている信頼ある森林調査用器具です。



| 長さ | 価格(税込) | 長さ | 価格(税込) |
|------|----------|-------|----------|
| 10cm | 15,561 円 | 60cm | 48,174 円 |
| 20cm | 18,669 円 | 70cm | 78,855 円 |
| 30cm | 21,567 円 | 80cm | 82,740 円 |
| 40cm | 24,738 円 | 100cm | 92,505 円 |
| 50cm | 41,202 円 | | |

コア径は 5.15mm と 4.3mm (長さ 60cm 以上は 5.15mm のみ) 極太タイプ (コア径 10mm・12mm) も取り扱っております。

特集 樹木の根

| | |
|----------------------------------------------|----|
| 樹木の根が見せる様々な姿 野口 享太郎 | 2 |
| 樹木細根のターンオーバー 平野 恭弘・野口 享太郎 | 3 |
| 土の中の根をみる方法 大橋 瑞江・中野 愛子・平野 恭弘 | 8 |
| 根をめぐる炭素循環 一炭素安定同位体ラベリングを用いたアプローチ 檀浦 正子 | 12 |
| 樹木の根を取りまく様々な微生物 竹本 周平・山中 高史・片岡 良太・谷口 武士 | 16 |
| 細根と土壤動物の相互作用 藤井 佐織 | 21 |

森林科学 No.65

2012年6月1日発行

領 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：00190-5-50836

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：インドネシア中部カリマンタンの熱帯泥炭湿地林（バランカラヤ市郊外にて2012年に撮影）シリーズ 森めぐり「水の森、インドネシア中部カリマンタンの熱帯泥炭湿地林」より（50ページ）

第2特集 福島原発事故の森林生態系への放射能汚染影響を考える 26

大久保 達弘 / 金子 真司 / 金子 信博 / 田中 浩 /
Sergiy Zibtsev / Valerii Kashparov, Vasyl Yoschenko /
吉田 聡 / 恩田 裕一

コラム 森の休憩室Ⅱ 樹とともに
暑い、寒い、濡れる 45
二階堂 太郎

フォーラム 「森林学の過去・現在・未来」(4)
Stay Hungry. Stay Foolish. 篠原 健司 46

森林政策策定のあり方を考える 遠藤 日雄 47

森について学び続け、経験に基づいた知識を蓄え、
それを活かす 田中 和博 48

ゲリラとしての森林学 小島 克己 49

シリーズ 森めぐり

水の森、インドネシア中部カリマンタンの熱帯泥炭湿地林 50
斎藤 秀之

スコットランドの森 Culbin 52

上村 佳奈

シリーズ うごく森

54 年輪から読む樹木・森林・環境のうごき
— 樹木年輪年代学の応用 —
安江 恒

シリーズ 現場の要請を受けての研究

60 鹿児島県におけるスギ人工林管理システム
「SILKS」の開発
長濱 孝行・近藤 洋史

シリーズ 森をはかる

64 森から流れ出る水の量をはかる
壁谷 直記

記録

66 第56回国連婦人の地位委員会 (CSW56)
NGOフォーラムに参加して
太田 祐子

68 Information

ボックス
北から南から

樹木の根が見せる様々な姿

野口 享太郎 (のぐち きょうたろう、森林総合研究所四国支所)

水や養分を吸収し樹木の生育を支える根

土壌中に張り巡らされた樹木の根は、樹木の体を支えながら、生きるのに必要な水分や養分を土壌から吸収している。これらの機能は樹種を問わず共通のものであるが、野外で実際に根を見てみると、その姿は実に様々である(図-1)。このような根の変化は、樹木が置かれたそれぞれの環境に適応した結果と思われる。例えば、根系のバイオマスに着目すると、日本の森林の多くでは根の重さは個体全体の20%程度であるが、シベリアやアラスカの永久凍土地帯の針葉樹林では、根の割合が40%以上にもなることが報告されている(図-2)。また、これらの永久凍土地帯の森林では、養分吸収活性の高い細根の90%以上が、土の中ではなく土の上に堆積した有機物の層に分布している(Noguchi *et al.*, 2012)。これらの結果は、一年中凍った状態にある永久凍土の上で可能な限り根を広げて、限られた水分や養分を何とか獲得しながら生きている樹木の姿を物語っている。

森林生態系で様々な機能を発揮する樹木の根

上記のような生理機能の他、最近では、樹木の根が森林の炭素・養分循環に与える影響や、樹木の根と他の生物の相互作用など、その幅広い役割について注目が集まっており、盛んに研究が行われている。



図-1 様々な樹木の根

上：永久凍土上で水平方向に大きく根を広げるマリアナトウヒ(アラスカ)。下：支柱根を発達させるフタバナヒルギ(タイ)。

本特集「樹木の根」では、平野・野口が森林の炭素循環において重要な「細根のターンオーバー」について概説し、これらの研究を進めるための新技術について、大橋らが「根を見る技術」、檀浦が「炭素安定同位体ラベリングによるアプローチ」を紹介している。後半は、樹木の根と他の生物の関わりについて、竹本らが「土壌微生物」に着目し、病気を引き起こす菌類や根の養分吸収を助ける微生物と根の関係について紹介している。また、藤井は「土壌動物」に着目し、根の周囲に見られる“食う食われる”の関係が根に及ぼす効果など、根と他の土壌生物の持つ興味深い関係について紹介している。

本特集で紹介されているのは、樹木の根の持つ様々な姿のほんの一面ではあるが、読者の皆さんに樹木の根に興味を持っていただくきっかけになれば幸いである。

引用文献

- Karizumi N. (1974) The mechanism and function of tree root in the process of forest production. I. Method of investigation and estimation of the root biomass. Bull. Gov. For. Exp. Stn. 259 : 1-99
- Noguchi K., Dannoura M., Jomura M., Awazuhara-Noguchi M. and Matsuura Y. (2012) High belowground biomass allocation in an upland black spruce (*Picea mariana*) stand in interior Alaska. Polar Sci. (in press).

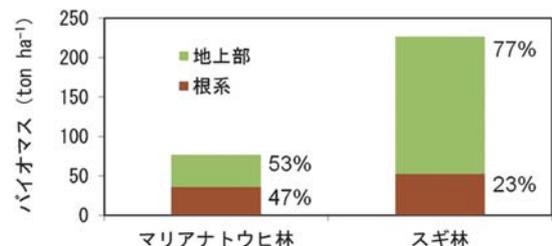


図-2 マリアナトウヒ林(アラスカ・約180年生; Noguchi *et al.*, 2012)、スギ林(秋田県・32年生; Karizumi, 1974)における地上部・地下部バイオマス
図中の数字は、地上部と地下部がバイオマスに占める割合を示す。

樹木細根のターンオーバー

平野 恭弘 (ひらの やすひろ、名古屋大学環境学研究科)

野口 享太郎 (のぐち きょうたろう、森林総合研究所四国支所)

森林炭素循環における樹木細根の重要性

樹木根の中で細い部分を細根 (fine root) と呼び、一般的に直径 2 mm 以下の根と定義されることが多い。温帯林における細根のバイオマスは、樹木個体のわずかな数%、面積あたりに換算するとおおよそ 500 g/m² であり、例えば温帯常緑樹林の平均バイオマス 35 kg/m² など森林全体のバイオマスと比較して大きくない。一方で細根は、地上部の葉が展開し落葉するのと同様に、比較的短い期間で生産、枯死、脱落を繰り返すため、その生産量は森林の純一次生産量 (NPP) の 3 割程度、多いもので 7 割程度を占める (図-1)。さらに細根は、呼吸や有機物の滲出などによっても炭素を樹体外へ放出しており、森林生態系全体の炭素循環に大きく貢献している。



図-1 スギの地上部と地下部根系
地上部の葉が枯れて落ちるように地下部の細根も枯死して落ちる。年間根リター量は年間葉リター量に匹敵すると言われている。

しかし、細根の動態は近年最も理解の進んでいない植物機能の一つとされており (Strand *et al.*, 2008)、森林生態系の炭素循環の解明に向けて、今後早急に明らかにすべき課題である。細根の生産や枯死・脱落に伴う炭素循環量を明らかにするには、細根に蓄積されている炭素の量と細根のターンオーバーの速さを明らかにする必要がある。細根のターンオーバーは、細根が一年で入れ替わる回数 (単位 year⁻¹) のことである。例えば、ある林の細根バイオマスが 500 g/m² で、そのターンオーバーが 0.5 year⁻¹ であれば、半分の 250 g/m² が 1 年間に新たなものに入れ替わることを意味する。また、細根のターンオーバーは細根の「寿命の逆数」に等しく、ある林の細根ターンオーバーが 0.5 year⁻¹ であれば、その林における細根の寿命は 2 年と考えることができる。

現在、欧州科学技術研究枠組 COST (European Cooperation in Science and Technology) の支援により、30 カ国以上が参加する共同プロジェクト『欧州森林生態系における地下部炭素ターンオーバー



図-2 欧州共同プロジェクト『欧州生態系における地下部炭素ターンオーバー』の国際ワークショップ「ターンオーバーの重要性」を講演するプロジェクト議長の I. Brunner 氏。

(Belowground Carbon Turnover in European Forests : 2009 年 – 2013 年)』が実施されている (図-2)。プロジェクトは、4つのワーキンググループ：細根、菌根菌、土壌有機物、生物地球科学モデリングに分けられ、毎年開催される国際ワークショップを通し最新の知見を共有することで、欧州森林における細根、菌根菌、土壌有機物それぞれのターンオーバーを明らかにし、それらを生態系炭素モデルの精度向上に役立たせることを主要な目的の一つとしている。これまでの全球的な森林の炭素循環モデルでは、葉の入れ替わりで明らかにされた値 (例えば、落葉広葉樹ではおよそ一年に一回入れ替わるため、ターンオーバーにすると 1.0 year^{-1}) をそのまま細根に適用したケースもある (White *et al.*, 2000)。しかし、温帯の 11 樹種で根の寿命は葉の寿命との関係性が認められないことが明らかにされていることから (Withington *et al.*, 2006)、生物地球科学モデルの精度を向上させるためには、細根のターンオーバーは葉のターンオーバーと異なるものとして扱うべきである。また、細根ターンオーバーの速さは樹種により異なるほか、測定・解析手法によるばらつきも見られる。そのため、このプロジェクトでは、これらの問題点について整理するとともに、生物地球化学モデルに対し、より適切な形で細根ターンオーバーのデータを提供することを一つの目的としている。

森林地下部生態系を扱う研究者がこのようなネットワークを作ることで、温暖化など環境変動における森林炭素循環を精度高く予測することが近い将来可能となるであろう。この欧州プロジェクトの詳細を知りたい人は下記の URL を参照していただきたい。

http://www.wsl.ch/fe/boden/projekte/cost-action/index_EN

細根ターンオーバーと影響要因

全球スケールに注目し、100ヶ所以上の林分のデータから推定された直径 2 mm 以下の細根ターンオーバー (平均値 ± 標準偏差) は、亜寒帯林で $0.77 \pm 0.70 \text{ year}^{-1}$ 、温帯林で $1.21 \pm 1.04 \text{ year}^{-1}$ 、熱帯林で $1.44 \pm 0.76 \text{ year}^{-1}$ であった (Finér *et al.*, 2011)。言い換えると、亜寒帯林の細根寿命がおよそ 474 日であるのに対し、温帯林では 302 日、熱帯林では 253 日となる。しかし、ここで見落としてはならないのは、これらの数値には大きなばらつきがあることである。

細根のターンオーバーに影響する要因は様々であるが、Finér *et al.* (2011) によると、全球スケールで見ただけでは年平均気温、年降水量、緯度といった環境要因と細根ターンオーバーとの間に有意な指数関数的関係が認められた (図-3)。これらの原因としては、温度や水分上昇に伴う維持呼吸、養分無機化速度、病原菌や植食の増加が細根の生存を短くしたことが考えられる (Gill and Jackson, 2000)。一方で、林分密度、面積あたりの胸高断面積合計、樹齢などの林分要因については、いずれも細根ターンオーバーとの明瞭な関係は認められなかった (Finér *et al.*, 2011)。

また、細根ターンオーバーは細根の直径サイズによって大きく変わることが報告されている。例えば細根 (直径 2 mm 以下の根) をさらに直径 0.5 mm 以下、0.5 – 1.0 mm、1.0 – 2.0 mm のように細かく分けると、直径の小さい細根のターンオーバーのほうが速い傾向が見

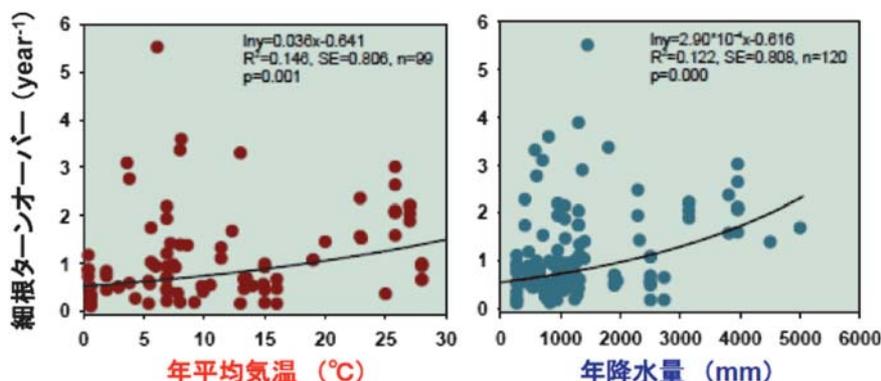


図-3 全球的な森林における細根ターンオーバーと年平均気温および年降水量との関係 (Finér *et al.*, 2011 を改変)

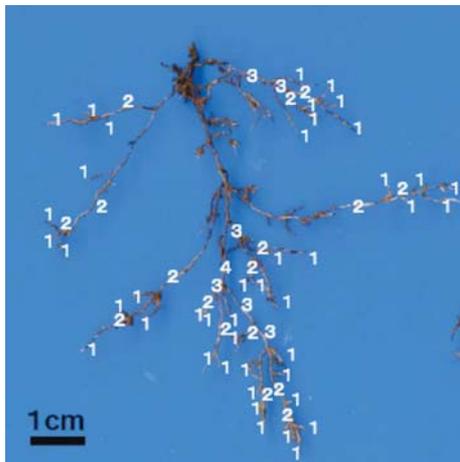


図-4 スギの細根

一般的に直径 2mm 以下を細根と定義する。直径階級による区分を用いると根端など生理活性の高い部分も根端から比較的遠い根も同質のもので同じターンオーバーを持つ根と扱われる。近年、根端を一次根 (図中 1)、一次根と一次根が交わる根を二次根 (2)、二次根と二次根が交わる根を三次根 (3) とした分枝位置による細根の区分を用いることで同じ細根でも異質のもの、異なるターンオーバーを持つ根と扱うことができる。

られる (直径の小さい細根のほうが、寿命が短い)。一方、細根は複雑な枝分かれ (分枝) 構造 (図-4 参照) を持っているが、養分吸収などの細根の生理活性は根の先端付近で高く、基部では小さい。したがって、根の生理機能とターンオーバーの関係を考えるには、直径サイズよりも分枝位置により細根を分類して扱うべきという見方もある (Guo *et al.*, 2008)。例えば、20 年生の longleaf pine の細根のターンオーバーは根端 (根の先端) に近いほど速く、一次根で 1.2 year^{-1} 、二次根で 0.9 year^{-1} 、三次根で 0.6 year^{-1} であった。このデータは、根端に近い根ほど寿命が短く、頻繁に枯死しては新たなものと入れ替わることを示している (Guo *et al.*, 2008: 図-4)。

細根ターンオーバーの測定方法

細根のターンオーバーを測定する方法として、炭素同位体比を用いる方法 (特集 12 ページ参照) や小型カメラで地中を直接観察するミニライゾトロン法 (特集 8 ページ参照) が良く知られているが、これらから推定さ

れた細根寿命には数年の開きがあり、不一致の要因が議論されている (Strand *et al.*, 2008)。この不一致の原因にはいくつかの要素が考えられるが、例えばミニライゾトロン法の場合、主に先端部に近い若い根が測定対象となるため、他の手法と比べてターンオーバーの推定値 (速さ) が大きくなることが多い。

細根ターンオーバーを計算する方法には大きく分けて次の 2 つがある。

$$\textcircled{1} \text{ 細根ターンオーバー (year}^{-1}\text{)} = \text{細根生産量 (g m}^{-2} \text{ year}^{-1}\text{)} / \text{細根バイオマス (g m}^{-2}\text{)}$$

$$\textcircled{2} \text{ 細根ターンオーバー (year}^{-1}\text{)} = 1 / \text{細根寿命 (year)}$$

①では、何らかの方法で細根バイオマスと細根生産量を求めた上で、ターンオーバーを計算する。②では、ミニライゾトロン法やスキャナ法など、細根の成長や枯死を非破壊的に追跡観察できる手法を用いて細根の寿命を求めることにより、ターンオーバーを算出する。これらの手法には、それぞれ長所と短所がある (表-1)。例えば、連続土壌コア法では、繰り返し土壌試料を採取し、その中に含まれる細根バイオマスの経時変化から細根生産量を算出する。この方法は技術的にシンプルで使う道具も安価という長所を持つ反面、繰り返し試料を採取することが、試験地の土壌をかく乱する原因になり得る。また、ミニライゾトロン法では、地中に埋設した透明管の表面に出現する細根の成長や枯死を、非破壊的に観察できるのが長所であるが、機材が高価であることや、観察管の表面で見られる根の挙動が自然状態と異なる可能性がある。現時点では、どの手法が最も優れていると言うことはできず、調査を行う際には利用する手法の特性をよく理解することが重要である。

近年、根の分解試験を併用した連続土壌コア法またはイングロースコア法 (Osawa and Aizawa, 2012) や、広い土壌断面の連続的な観察に有効なスキャナ法 (Dannoura *et al.*, 2008) など、細根動態研究のための画期的な測定手法が日本の研究者により提案されている。一方、著者らは、これまでの手法の多くが土壌かく乱を伴うことに注目し、かく乱を最小限に抑えられるルートメッシュ法の改善に取り組んでいる (Hirano *et al.*, 2009: 図-5)。ルートメッシュ法は、平面状のメッシュシートを土壌に縦方向に小さな溝を作って挿入し、一定期間の後、掘り取り、新たにメッシュシートに進入

表-1 主な細根生産量測定方法の長所と短所

| 方法 | 長所 | 短所 |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ミニライゾトロン法 | <ul style="list-style-type: none"> ・直接連続観察 ・長期間観察可能 | <ul style="list-style-type: none"> ・チューブ埋設後馴化期間必要 ・チューブによる土壌物理環境変化 ・高価 ・多量の画像処理 ・根成長がチューブをとりまく？ ・電源必要 |
| イングロスコア法 | <ul style="list-style-type: none"> ・準備が容易 ・掘り取り容易 ・安価 | <ul style="list-style-type: none"> ・土壌かく乱 ・根無し土壌が現地土壌に比べ異質 ・根無し土壌の準備に時間かかる ・根分けに時間かかる ・根成長がコア内にとどまる？ |
| 連続土壌コア法 | <ul style="list-style-type: none"> ・根成長は自然 ・安価 | <ul style="list-style-type: none"> ・破壊的 ・根分けに時間かかる |
| スキャナ法 | <ul style="list-style-type: none"> ・直接連続観察 ・観察面積大 | <ul style="list-style-type: none"> ・埋設後馴化期間必要 ・埋設時にかく乱 ・スキャナの耐久性 ・根成長はスキャナ面上 ・電源必要 ・多量の画像処理 |
| ルートメッシュ法 | <ul style="list-style-type: none"> ・準備が容易 ・安価 ・専門技術不要 ・設置時間短い ・土壌かく乱少 | <ul style="list-style-type: none"> ・掘り取り時にかく乱 ・掘り取り時に時間かかる ・サンプル持ち帰りが重い |

した根を生産量として推定する方法である（図-6）。これまでの細根生産量を調べる方法は、いずれもある程度の装置や技術を必要としたが、ルートメッシュ法は、根を専門としない研究者でも簡易的に測定できる方法である。本方法は同時期に欧州でも盛んに取り入れはじめられており、著者らによる手法改善の取り組みは、先のCOSTの国際ワークショップにおいて欧州の研究者から紹介されるなど注目を集めている。根の研究は葉など地上部の研究と比べ遅れがちであり、特に国内の細根生産量を測定した報告数はわずか10件足らずに過ぎず、欧米に比べ著しく遅れをとっている。主要造林樹種スギでさえもわずか数件の報告しかない（Noguchi *et al.*, 2007）。したがって今後、国内の主要樹木の細根ターンオーバーを明らかにすることは急務であり、これら細根動態の解明がなされた暁には、土壌炭素蓄積機構など森林生態系における炭素循環の精度の高い評価につながるであろう。

引用文献

Dannoura M., Kominami Y., Oguma H. and Kanazawa Y. (2008) The development of an optical scanner method for observation of plant root dynamics. *Plant Root 2* : 14-18.

Finér L., Ohashi M., Noguchi K. and Hirano Y. (2011) Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. *For. Ecol. Manage.* 262 : 2008-2023.

Gill R. A. and Jackson R. B. (2000) Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytol.* 147 : 13-31.

Guo D., Mitchell R. J., Withington J. M., Fan P. P. and Hendricks J. J. (2008) Endogenous and

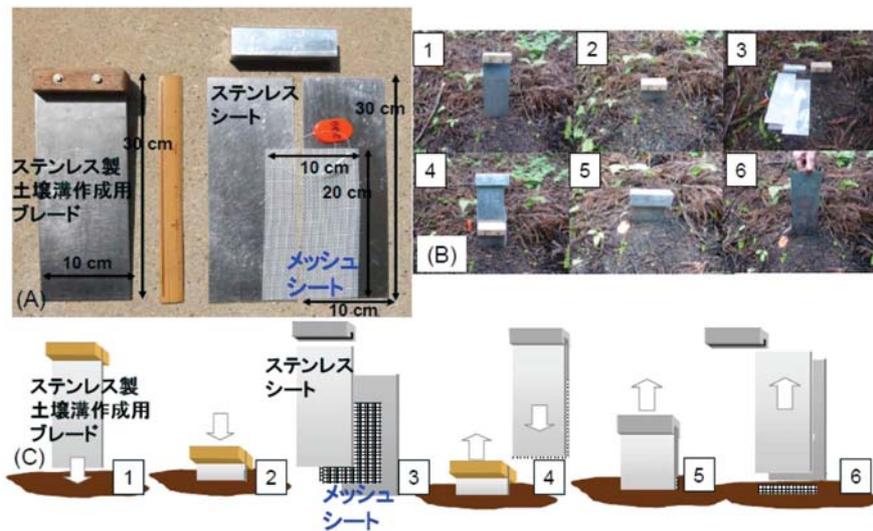


図-5 簡易的に細根生産量を測定するためのルートメッシュ法のメッシュシート設置手順
 (A) 用意する器具類。(B) および (C) 1と2: ステンレス製ブレードで土壌に溝を作成。3と4: メッシュシートを2枚のステンレスシート挟み、溝に差し込んだブレードと入れ替える。5と6: ステンレスシート1枚ずつ抜きメッシュシートを土壌内に垂直に設置する。(Hirano *et al.*, 2009 を改変)



図-6 設置一年後のメッシュシートに進入したスギ細根

exogenous controls of root life span, mortality and nitrogen flux in a longleaf pine forest: root branch order predominates. *J. Ecol.* 96 : 737-745.

Hirano Y., Noguchi K., Ohashi M., Hishi T., Makita N., Fujii S. and Finér L. (2009) A new method for placing and lifting root meshes for estimating fine roots production in forest ecosystems. *Plant Root* 3 : 26-31.

Noguchi K., Konôpka B., Satomura T., Kaneko S. and Takahashi M. (2007) Biomass and

production of fine roots in Japanese forests. *J. For. Res.* 12 : 83-95.

Osawa A., and Aizawa R. (2012) A new approach to estimate fine root production, mortality, and decomposition using litter bag experiments and soil core techniques. *Plant Soil* DOI 10.1007/s11104-011-1090-6.

Strand A. E., Pritchard S. G., McCormack M. L., Davis M. A., and Oren R. (2008) Irreconcilable differences: fine-root life spans and soil carbon persistence. *Science* 319 : 456-458.

White M. A., Thornton P. E., Running S. W. and Nemani R. R. (2000) Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. *Earth Inter.* 4 : 1-85.

Withington J. M., Reich P. B., Oleksyn J. and Eissenstat D. M. (2006) Comparisons of structure and life span in roots and leaves among temperate trees. *Ecol. Monog.* 76 : 381-397.

土の中の根をみる方法

大橋 瑞江・中野 愛子 (おおはし みずえ・なかの あいこ、兵庫県立大学環境人間学部)

平野 恭弘 (ひらの やすひろ、名古屋大学大学院環境学研究科)

様々な根系調査法

樹木にとって根は、地上部の支持、水とこれに溶けた養分の吸収と輸送、養分の貯蔵などの働きをする器官である。草本の根と異なり、樹木の根は部位によって機能が分かれている。細根と呼ばれる直径数ミリの先端部は養水分の吸収を担い、粗根と呼ばれる太い根は、地上部を支え、細根の広がりをもたらす。根の構造や動態に関する研究は地上部に比べてはるかに遅れている。その大きな原因は、根が不透明な固体である土壌中に生育することに起因する。

根の調査方法は、野外で行う方法と実験室で行う方法、土壌のかく乱や根の切断を伴う破壊的な方法と非破壊的な方法に大別できる(図-1)。実験室で行う場合、根を採取してきて、成分分析や形態解析を行う方法や、ポットや水耕栽培、根箱と呼ばれる透明な箱で苗木を育て、生きた根の生理や生態を研究する手法が挙げられる。野外で行う方法に比べてこれらの方法は、時間や労力などの縛りが少なく、高い測定精度を期待することができる。しかし一方で、ポットや根箱で行う実験では対象が苗木や幼樹に限られてしまい、根を採取して行う実験では切断や土壌環境から取り出すことで本来の生理活性が失われるといった限界もある。

野外で行う実験は、成木の全体的な生理的・生態的特性や、森林の生態的役割を解明したい場合にしばしば用

いられる。野外実験の中でも、破壊的な調査は古くからおこなわれており、根系全体を掘り上げる手法や、水圧などで土壌を取り除いて根系を洗い出す方法、土壌断面を掘り出して、露出した根を調査する方法、土壌塊を掘り出して、そこに含まれる根を調査する方法などがある。しかし、このような方法には問題も多く、たとえば土壌から根系全体を掘り上げる場合、根系を傷つせずに土中から取り出すことは難しいうえ、多くの労力を要するためデータの繰り返しが少ない。一方、部分的な掘り取りでは、ある時間断面、空間断面の状態の把握しかできない、労力的・時間的にサンプル数が限られてしまい全体像の定量的評価が難しい、などの問題点がある。さらにこれらの破壊的な方法は、生きた根の生理データや生態データを継続的に取りたい場合、土壌環境の変化や、親木から切断したりすることが後の結果に影響する可能性がある。

野外で生育する根の動態を明らかにし、根の構造や機能に関する知見を集めることは、個々の樹木の生育過程や、森林生態系における根系の役割を明らかにするためには重要である。しかし、土壌環境を変えることなく根が土中で生育する様子を観察し、データ化することは技術的に極めて難しい。これまで、野外で非破壊的に樹木の根を研究するために、いくつかの手法開発が試みられてきた。本稿では、野外で根を切断せず観察する手法について、近年、注目されているスキャナ法とレーダ法を中心に紹介する。

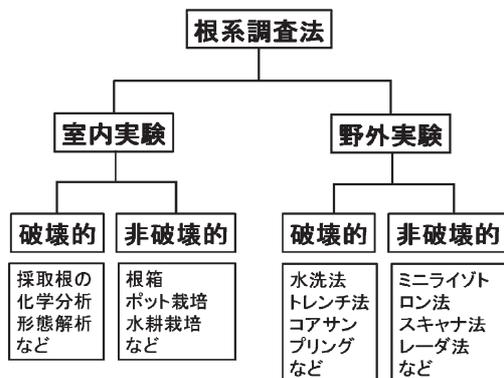


図-1 根系調査方法の分類

地面の中を撮影する

土壌内で生育する樹木の根系を観察する方法として知られてきた方法にミニライゾトロン法がある(Noguchi et al., 2005)。この方法は、土壌に埋設する透明な観察管と、管の表面を観察し記録する装置(カメラ、ファイバースコープなど)からなり、観察管に観察装置を差し込み、管の表面に見える根の位置やサイズを調べることで、根の分布や動態を調べる(里村ら 2001)。ミニラ

樹木の根

イゾトロン法は、観察管が設置できる場所ならどこでも実施が可能で、繰り返しを多数とれることから、多くの研究者に利用されてきた。しかし、ミニライゾトロン法のもつ短所として、観察面が小さく、観察対象とする根系の本数やサイズが限られること、多くの場合、観察装置の設置や記録は手作業で行われ、データの取得に手間がかかること、取得データは二次元であるため、土壌中の根量などの三次元的なデータに換算することが難しいこと、などが挙げられる。

そこで、イメージスキャナ法が檀浦らによって発表された (Dannoura *et al.*, 2008)。スキャナ法は、地面に直方体の透明容器を埋設し、その中に市販のイメージスキャナを設置することで透明容器の表面に分布する根の生育状態を観察する方法である。スキャナ法がミニライゾトロン法を上回る利点として、次の点が挙げられる。

- 1) スキャナ法で得られる画像のサイズは約 20 cm × 30 cm と、ミニライゾトロン法の 30 倍も大きい (図-2)。そのため、撮影できる根の本数が多く、根の広がり、形状、分岐の程度なども把握できる。
- 2) 外部電源やバッテリーにつなぐことで、連続的な撮影が可能である。
- 3) パソコンにつないで撮影頻度を制御することで、根の微細な動きを抽出できる。たとえば撮影頻度を 1 時間と設定すれば 1 時間おきの根の動きが、



図-2 ミニライゾトロン画像 (右上小枠) とスキャナ画像 (大枠) の比較

12 時間とすれば半日おきの根の動きを見ることが可能である。

- 4) 特殊な観察装置を必要とするミニライゾトロン法に比べて、市販のスキャナを用いることができるためコストが安い。

さらにミニライゾトロン法やスキャナ法の画像解析の作業を軽減するため、これまでいくつかのコンピュータソフトが開発されてきた。たとえば Regent 社の WinRHIZO Tron は、コンピュータに取り込んだ画像の中の根を手動でトレースすることで、ソフトが根の長さや直径、面積、体積、形状などを自動計算してくれる。さらに近年、開発された A-root (ダウンロード先: <http://www.u-hyogo.ac.jp/shse/biosys/A-root/>) は、スキャナ法で得られた画像データの解析のために考案された細根動態追跡ソフトである。このソフトでは、マウスにより細根の伸長開始点をユーザが指定すると、その点を基準として、次の画像では伸長した根の先端部を自動的に探索する (図-3)。したがって、時系列で得られた画像を用いて、根の伸長を自動的に追跡し、その伸長量、速度、方向などの情報を自動で取得することができる (Nakano *et al.*, 2012)。

スキャナデータとその解析ソフトの開発は、今後、細根の成長特性に関する知見の蓄積に大いに貢献すると期待される。細根の動態データだけでなく土壌の孔隙率などの土壌環境情報についても画像から取り出すことができれば、細根の伸長パターンを制御する環境因子が明らかとなり、



図-3 A-root による連続スキャナ画像の細根伸長追跡
左図が元の最終画像、右図が追跡ラインを加えた最終画像を示す。赤は手動追跡、青は自動追跡の結果である。黒抜きと白枠の円はそれぞれ追跡開始位置と終了位置を表す。

細根伸長モデルを構築するための様々な基礎データを提供するであろう。もし細根の成長プロセスを記述したモデルを構築することができれば、地下部の炭素循環や窒素循環に関する理解は飛躍的に進むと予想される。

地面の上から探査する

野外で土壌を非破壊的に根の広がりや動態を調べるもう一つの方法として、地面に電流や電磁波を流して根の位置やサイズを探査する方法が挙げられる。中でも近年注目されている地中レーダ法は、地中に電磁波を送信し、物性値の異なる根系からの反射波を受信アンテナで捉え、地中にある根までの深さ、位置、大きさを求める方法である(図-4)。ミニライゾトロン法やスキャナ法がもっぱら直径数ミリの細根の動態解明を目的として発達してきた手法であるのに対し、地中レーダ法は、直径が数センチの粗根を探査する方法として期待されている。レーダ法の利点には、次の点が挙げられる。

- 1) 土壌表面から土の中を探査するため、土壌を掘ることによるかく乱がない
- 2) 格子状あるいは平行にいくつもの測線を引いてレーダ探査することで、土壌中に分布する根の配置やサイズを3次元的にとらえることが可能である。

地中レーダの探知能力は、送信する電磁波の周波数の強さによって異なり、低い周波数では土壌深くまで到達し、大きな目標物を探知することができる。一方、高い周波数では浅くまでしか達しないが、より小さな物体を



図-4 地中レーダ

探知することができる。さらに土壌の含水率や土壌の性質など他にも多くの要因がレーダの探知能力に影響するため、適用できる場所は限られている。日本では砂質土壌条件下でスギの根を、海岸林でクロマツの根を明瞭に探査できることが明らかにされている(Hirano *et al.*, 2009, 2012)。

地中レーダ探査で重要なのは、信号処理と反射データの解釈である。根などの測定対象の上をレーダが通り過ぎる際にレーダの反射波は図-5のような変化を示すが、

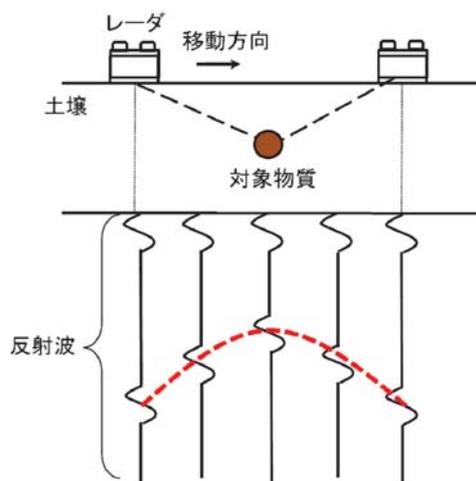


図-5 ある地点に埋まった物質(ここでは根)に対するレーダの反射波の反応

土壌中の対象物質の上をレーダが通り過ぎる際、一つの対象物からの反射波は円弧(赤い点線)を描き、この円弧の頂上にあたる場所が物体の直上にあたると認識することができる。

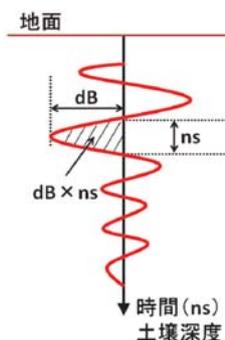


図-6 ある埋設物に対するレーダの反射波の例と波形形成パラメータ

最大反射波長が生じるまでにかかった時間が、埋まっている深さを表す。振幅(dB)、ゼロ交差が生じるときの時間差(ns)、最大振幅の領域面積($\text{dB} \times \text{ns}$)を用いて、根の直径を推定することができる。Hirano *et al.* (2009) より引用。

この変化のパターンから測定対象の位置を知ることができる。測定対象の真上ではレーダの反射波は図-6のように描かれ、最大反射波長が生じるまでにかかった時間から、測定対象が埋まっている深さを知ることができる。また、振幅などの波形をより詳しく解析することにより、根の直径など測定対象のサイズを推定することができる(図-6; Butnor *et al.*, 2011)。その他、ノイズ除去など一定のデータ処理を行うことにより、図-7のような画像を得ることも可能であり、視覚的に根の位置や直径を認識することもできる(Butnor *et al.*, 2011)。しかし、これらの解析にはまだ多くの課題が残されている。例えば、根は細長い形状をしているため、レーダが真上を通過するときの角度が異なると、算出される直径の値が変わってしまうと考えられる。

森林は炭素の貯蔵庫と呼ばれ、大量の炭素を大気中から取り込んで、生態系内に長期間保存することで、温暖化防止に役立ってきたと考えられている。地下に伸びる樹木の太い根は、巨大なバイオマスを持つ地上部を支え、自身にも大量の炭素を貯めてきた。地上からの探査により、土中に広がる樹木の根の分布や存在量を算出することができれば、森林の地下部バイオマスを精度よく簡便に求めることができるうえ、地面の中を樹木の根が張っていく様子や樹木の枯死とともに根が死んで腐っていく様子を知ることにも可能となるだろう。レーダ法の発展は、地下部の世界の動きを可視化する画期的な研究につながっていくと期待される。

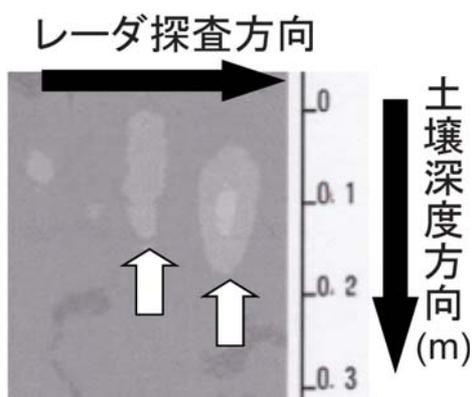


図-7 レーダを用いたある測線上の土壤スキャンデータ反射波形データに対し、フィルタリング、マイグレーション処理などのノイズ除去やデータ処理を行うことにより得られる。縦が土壌深度、横が測線の長さ、画像中に矢印で指している白く見える部分が対象物質の埋まっている場所を示す。

謝辞

この記事を書くにあたり、兵庫県立大学環境人間学部の池野英利教授に丁寧な助言をいただきました。また、ここに感謝いたします。

引用文献

- Butnor J. R., Barton C., Day F. P., Johnsen K. H., Mucciardi A. N., Schroeder R. and Stover D. B. (2011) Using ground-penetrating radar to detect tree roots and estimate biomass. In: Mancuso S. (ed) Measuring roots. Springer, 213-245.
- Dannoura M., Kominami Y., Oguma H. and Kanazawa Y. (2008) The development of an optical scanner method for observation of plant root dynamics. *Plant Root 2* : 4-18.
- Hirano Y., Dannoura M., Aono K., Igarashi T., Ishii M., Yamase K., Makita N. and Kanazawa Y. (2009) Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar. *Plant Soil* 319 : 15-24.
- Hirano Y., Yamamoto R., Dannoura M., Aono K., Igarashi T., Ishii M., Yamase K., Makita N. and Kanazawa Y. (2012) Detection frequency of *Pinus thunbergii* roots by ground-penetrating radar is related to root biomass. *Plant Soil* in press.
- Nakano A., Ikeno H., Kimura T., Sakamoto H., Dannoura M., Hirano Y., Makita N., Finér L. and Ohashi M. (2012) Automated analysis of fine root dynamics using a series of digital images. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* in press.
- Noguchi K., Sakata T., Mizoguchi T. and Takahashi M. (2005) Estimating the production and mortality of fine roots in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantation using a minirhizotron technique. *J. For. Res.* 10 : 435-441.
- 里村多香美・中根周歩・堀越孝雄 (2001) ミニライゾトロン法による樹木細根の純生産性に関する研究. 根の研究 10 : 3-12.

根をめぐる炭素循環

—炭素安定同位体ラベリングを用いたアプローチ—

檀浦 正子 (だんのうら まさこ、京都大学大学院農学研究科森林科学専攻森林生産学講座
森林利用学研究室)

森林炭素循環における根の役割とは

陸上生態系において、森林は主要な炭素の吸収源（シンク）であり、放出源（ソース）でもある。生態系全体に固定される炭素量を示す概念として、生態系純生産量（NEP）が用いられている。NEPは光合成量（GPP）から生態系全体の呼吸量を差し引いた量であるが、森林と大気間の二酸化炭素（CO₂）フラックスの観測から、平均してGPPの80%が呼吸により大気に戻ると推定されている（Law *et al.*, 2002）。また、生態系から呼吸により放出される炭素の50-70%が土壌から放出されている（Janssens *et al.*, 1996）ことから、土壌中における樹木の根やその他の生物による呼吸活動がNEPに与

える影響は極めて大きいと考えられる（Valentini *et al.*, 2000）。したがって、森林全体の炭素収支に関するより正確な値を検証するためにも、炭素固定量・放出量の変動予測を行うためにも、光合成により固定された炭素が地上部から根へ移行するプロセスを、根の動態（成長・枯死・分解など）や根の呼吸量とともに明らかにすることが重要である。

炭素はまず光合成によって葉に固定される。その一部は葉において成長や呼吸により消費され、残りの炭素は、順次、枝・幹へと送られる。枝・幹に送られた炭素の一部は、葉と同様に成長や呼吸により消費され、残りの炭素が根に送られる。根に送られた炭素は、根の成長や呼吸に使われるとともに、細根（菌根）を通じて、菌根菌の菌糸、土壌へと移動する（図-1）。つまり根は光合成で獲得した炭素を直接地下に輸送する働きを担っているといえよう。

しかし、土壌中の根の動態や呼吸など根を介した炭素の動きを調べるには、多くの場合、根を掘り取るなどの攪乱を伴う作業が必要であり、調査を行うことにより根の自然な状態を維持できなくなるというジレンマをはらんでいる。そこで、筆者らは炭素安定同位体を用いてラベリング実験を行い、根をめぐる炭素循環をより自然な状態を維持しながら解明することを目指している。

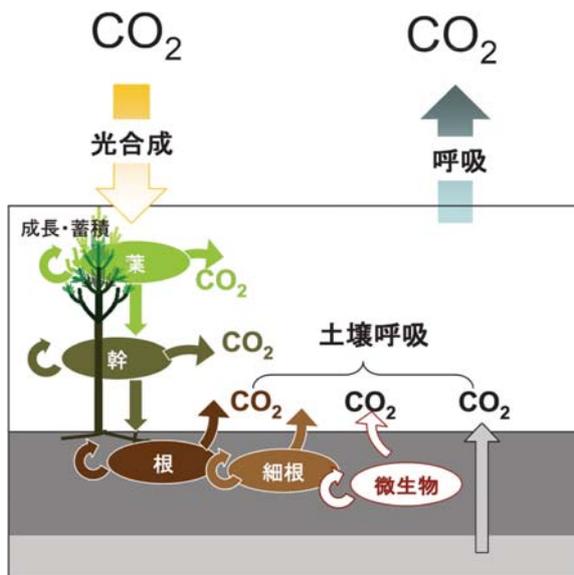


図-1 森林生態系の炭素循環
葉で固定された炭素は、一部が成長に使われ、組織に蓄積され、また呼吸として放出する。そのあと幹へ送られ、同様の過程を経て根・細根・微生物へと到達し、森林生態系内を循環していく。

炭素安定同位体ラベリングとは

ここで言うラベリングとは、目印（トレーサー）を使って目的とする物質の移動を追跡できるようにすることである。小学校で植物に色水を吸わせて水の流れを見る実験をした人がいるかもしれない。二酸化炭素に色をつけることはできないので、樹木における炭素の動きを調べるには、炭素同位体をトレーサーとして使う。この方法では、炭素安定同位体によりラベルされたCO₂を光合



図-2 同位体ラベリング実験の様子

光合成によって固定された炭素の移動を追跡するために、樹木の樹冠全体を覆う大きなチャンバーをかぶせ（写真右下）、 $^{13}\text{C}\text{O}_2$ を吸収させる。内部の温湿度や光環境をモニタリングし（写真右上）、温湿度を一定に保つために空調設備を入れ、ファンと空気を循環させるための筒で空気を循環させている（写真左）。

成により樹木に吸収させ、その後、炭素安定同位体が植物体内を移動する様子を追跡する（図-2）。

このラベリング実験・同位体トレーサー法というアイデア自体は決して新しいものではない。おそらく最も古い歴史的な実験のひとつは1940 - 50年代に、カルビンらにより行われたものであろう。いわゆるカルビン回路の発見である。このときにはトレーサーとして炭素の放射性同位体 ^{14}C が使われたが、これは ^{14}C から放出される放射線がX線フィルムに感光するため、 ^{14}C が取り込まれた有機化合物を検出するのに都合が良かったからである。また、最近では1950 - 60年代に行われた大気圏内核実験により大気中で増加した ^{14}C をトレーサーとして、土壌有機物の滞留時間や根の寿命、根の成長に使われる炭素源（新たな光合成産物 vs. 貯蔵物質）を解明する研究がなされている（Gaudinski *et al.*, 2009）。 ^{14}C は天然の存在量が極めて少なく、加速器質量分析装置（AMS）による検出感度が高いため、少量でラベリングできることが利点であるが、放射能を持つため取り扱いには様々な注意を要する。一方、炭素の安定同位体（=非放射性的の同位体）には ^{12}C 、 ^{13}C が存在し、自然状態でそれぞれ99%、1%存在する。安定同位体

^{13}C は、90年代の初めに質量分析計（IRMS）が一般に用いられるようになって以降、炭素動態研究や樹木生理研究の強力なツールとして多く利用されるようになってきた。 ^{13}C の場合は、 ^{14}C に比べてラベリングに高い濃度が必要であるため、ラベリング自体が樹木に対して何らかの生理的な影響をおよぼす可能性もある。しかし、分析費用や取り扱いの容易さの点では ^{14}C に比べ有利である。また最近では、レーザー式安定同位体比分析装置（TDLS）の発達に伴い、野外における CO_2 中の炭素安定同位体比（ $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ）の連続観測が可能になりつつあり（Wingate *et al.*, 2010）、土壌呼吸測定における独立栄養呼吸（根呼吸）と従属栄養呼吸（微生物呼吸）の分離測定など、 ^{13}C の使用による様々な研究展開の可能性が示されている（Albanito *et al.*, 2012）。

ラベリング実験で樹木根を研究する

筆者らの ^{13}C ラベリング実験では、葉へのラベリング後に初めて植物体の根や土壌から $^{13}\text{C}\text{O}_2$ シグナルが放出されるまでの時間を測定して、光合成により吸収された炭素が地下部にどのように輸送されるのかについて解析を進めてきた。炭素が幹や根（図3-1）の中を移動

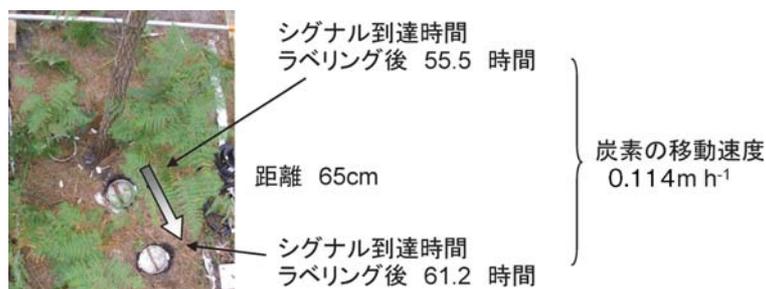


図-3 ラベリング後の根内の炭素移動速度を推定するために、根に2つの呼吸測定用チャンバーを設置し、両者のチャンバーに $^{13}\text{CO}_2$ があらわれるまでの時間を測定した一例
この時間差とチャンバー間の距離から、移動速度を計算できる。

する速度が計算され、樹種ごと、季節ごとに異なることが示された。この移動速度は概して落葉広葉樹のほうが針葉樹よりも速く、例えば、ヨーロッパナ (*Fagus sylvatica* L.) で生育期に最大 1.2m h^{-1} を観測しているが、針葉樹では $0.1 - 0.2\text{m h}^{-1}$ 程度である (Dannoura *et al.*, 2011; Högberg *et al.*, 2008)。葉で作られた光合成産物が根に到達するまでには、枝や幹を経由する必要があるため、その移動距離となる樹木の高さ、樹種や季節によって異なる炭素の移動速度に左右されることになる。

光合成により吸収された炭素は根に輸送されると、その一部は細根・菌根・菌糸へと移動し、さらに土壌有機物やそれを利用する土壌中の生物に取り込まれていく。光合成により吸収された炭素は、細根を通じて短時間のうちに土壌微生物 (菌根・菌糸、浸出物を含む) へと供給されることが観測されている (Epron *et al.*, 2011)。これら菌根菌への移動については Högberg *et al.* (2010) や Heinonsalo *et al.* (2010) に詳しい。

これらの根や微生物の働きからなる複雑な地下部炭素循環の結果、炭素はついに土壌呼吸として放出されることになる。ラベリング後、土壌からはじめて $^{13}\text{CO}_2$ 放出が検出されるまでにかかる時間は、樹高 10 m 程度のヨーロッパナとフユナラ (*Quercus petraea* Matt Liebl) ではおよそ 0.5 - 1.3 日後、カイガンマツ (*Pinus pinaster* Ait) では 1.6 - 4.4 日後であった (Dannoura *et al.*, 2011; Epron *et al.*, 2011)。また、光合成産物のうち、このように土壌呼吸として放出される炭素の割合も、樹種や季節によって変動する。例えばヨーロッパナでは 5 月には 3% であったその割合が、7 月には最大となる 18 - 21% を示し、その後減少していた。フユナラでは 7 - 11%、カイガンマツでは 7 - 10% であ

り、冬であっても 1 - 4% の炭素が地下部に配分されていることが明らかになっている (Epron *et al.*, 2011)。また Kagawa *et al.* (2006) はカラマツを対象とした実験で生育期前半から後半にかけて炭素配分が地上部から地下部へとシフトしていくことを示している。このように、樹木における光合成産物の地上部/地下部配分率は季節により変化し、そのパターンは樹種固有のフェノロジーや生育環境により異なることが明らかになってきている。私たちが森林で観測することのできる土壌呼吸は、数日前の樹木の活動の産物であるともいえる。

今後の展開

炭素同位体を用いたラベリング実験は、炭素の流れをみるための強力なツールとなりうる。特に土壌中に隠れた根系を研究するには様々な使い道があるように思う。例えば、根がどこまで張っているか、ある葉が炭素を送っている根はどれなのか、菌糸はどの樹木に依存しているのか、等々、アイディア次第でこれまで不可能だった根研究に関するブレークスルーが見込まれる。今後の研究に期待したい。

この研究の一部は科学研究費補助金 (若手研究 (B) 課題番号 22780146) により実施された。

引用文献

- Albanito F., McAllister J. L., Cescatti A., Smith P. and Robinson D. (2012) Dual-chamber measurements of $\delta^{13}\text{C}$ of soil-respired CO_2 partitioned using a field-based three end-member model. *Soil Biol. Biochem.* 47: 106-115.
Dannoura M., Maillard P., Fresneau C., Plain C.,

- Berveiller D., Gerant D., Chipeaux C., Bosc A., Ngao J., Damesin C., Loustau D. and 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.
- Epron D., Ngao J., Dannoura M., Bakker M. R., Zeller B., Bosc A., Plain C., Lata J. C., Priault P., Barthes L. and Loustau D. (2011) Seasonal variations of belowground carbon transfer assessed by in situ $^{13}\text{CO}_2$ pulse labelling of trees. *Biogioscience* 8 : 1-6.
- Gaudinski J. B., Torn M. S., Riley W. J., Swanston C., Trumbore S. E., Joslin J. D., Majdi H., Dawson T. E. and Hanson P. J. (2009) Use of stored carbon reserves in growth of temperate tree roots and leaf buds: analyses using radiocarbon measurements and modeling. *Glob. Change Biol.* 15(4) : 992-1014.
- Heinonsalo J., Pumpanen J., Rasilo T., Hurme K.-R. and Ilvesniemi H. (2010) Carbon partitioning in ectomycorrhizal Scots pine seedlings. *Soil Biol. Biochem.* 42(9) : 1614-1623.
- Högberg M. N., Briones M. J. I., Keel S. G., Metcalfe D. B., Campbell C., Midwood A. J., Thornton B., Hurry V., Linder S., Näsholm T. and Högberg P. (2010) Quantification of effects of season and nitrogen supply on tree below-ground carbon transfer to ectomycorrhizal fungi and other soil organisms in a boreal pine forest. *New Phytol.* 187 : 485-493.
- Högberg P., Högberg M. N., Gottlicher S. G., Betson N. R., Keel S. G., Metcalfe D. B., Campbell C., Schindlbacher A., Hurry V., Lundmark T., Linder S. and Nasholm T. (2008). High temporal resolution tracing of photosynthate carbon from the tree canopy to forest soil microorganisms. *New Phytol.* 177 : 220-228.
- Janssens, I. A., H. Lankreijer, *et al.* (2001). Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Glob. Change Biol.* 7 : 269-278.
- Kagawa A., Sugimoto A. and Maximov T. C. (2006) Seasonal course of translocation, storage and remobilization of ^{13}C pulse-labeled photoassimilate in naturally growing *Larix gmelinii* saplings. *New Phytol.* 171(4) : 793-804.
- Law B. E. *et al.* (2002) Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agr. Forest Meteorol.* 114 : 97-120.
- Valentini R. *et al.* (2000) Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature* 404(6780) : 861-865.
- Wingate L., Ogée J., Burlett R., Bosc A., Devaux M., Grace J., Loustau D. and Gessler A. (2010) Photosynthetic carbon isotope discrimination and its relationship to the carbon isotope signals of stem, soil and ecosystem respiration. *New Phytol.* 188 : 576-589.

樹木の根を取りまく様々な微生物

竹本 周平・山中 高史 (たけもと しゅうへい・やまなか たかし、森林総合研究所森林微生物研究領域)

片岡 良太 (かたおか りょうた、山梨大学生命環境学部)

谷口 武士 (たにぐち たけし、鳥取大学乾燥地研究センター)

1. はじめに

土壌中には様々な微生物が生育している。それらは栄養分の獲得様式から、生きたものに取り付く寄生菌や共生菌と、死んだものを分解利用する腐生菌に分けられる。樹木の成長を悪化させるものは寄生菌、成長を促進させるものは共生菌である。しかしながら、これら微生物が及ぼす樹木への影響も、同じ微生物であっても、樹種や樹齢、および土壌環境によって様々であり、必ずしも明瞭に区別できるものではない。

野外では、ある一つの樹種が多種多様な微生物と関わりながら生きているが、これらの微生物同士の間にも様々な関係がある。このような多様性や相互作用は、樹木の生育に関わる微生物の機能の多様性を示すものであり、土壌中の養分循環や森林の生産性の維持に不可欠である。

そこで、ここでは、樹木と関わり合いながら多様な機能を発揮する微生物の研究について紹介する。はじめに、樹木の根に寄生する菌類として、白紋羽病菌を紹介する。次に、樹木と共生する菌根菌群集の多様性とその機能を述べ、最後に菌根菌とその随伴細菌との関係を紹介する。

2. 根に寄生する菌—白紋羽病

樹木の根に寄生し病気を起こす菌の多くは、材部を含む根株を腐朽させる担子菌である。一方で、樹木実生や草本の根腐れを起こす菌には子のう菌や卵菌がいる。これらの病原菌は基本的には土壌中で腐生的に生活することができる。また細菌類にも、根頭がん腫病菌など、根に寄生するものがある。微生物のほかにも、線虫やダニのなかにも根に寄生するものがあり、それらは根に依存して生活史を送る。このように、根に寄生する病原体には系統的に多様なものが含まれ生活様式も多様であるが、ここでは一例として子のう菌に属する白紋羽病菌を紹介する。

1) 白紋羽病 (しろもんばびょう) とは?

白紋羽病菌 (*Rosellinia necatrix* Prill.) は、温帯を中心に国内外に広く分布している土壌菌である。白紋羽病は果樹栽培における重要病害とみなされており、林地においてもウルシに集団枯損を引き起こす (Takemoto *et al.*, 2012)。日本には同様の症状を引き起こす近縁種が *Ro. necatrix* 以外に少なくとも2種分布している (Takemoto *et al.*, 2009; 竹本ら 2009)。

樹木の地下部を冒す病原菌といえば、ナラタケやベッコウタケなどがよく知られている。これらに比べると白紋羽病菌はなじみが薄いかもしれない。白紋羽病は原因の特定されない根腐れとして見過ごされている場合もある。というのは、病気にかかった樹木からはきのこが発生するわけでもなく、比較的特徴に乏しいからである。白紋羽病菌の種レベルでの同定は子実体の形態や分子生物学的手法によるべきである。しかし実際には、罹病根の樹皮下に広がる白色の扇状菌糸束や培養菌糸の形態的特徴などから他の菌とはおおよそ識別できる。

2) 白紋羽病菌の生態と感染・発病のしくみ

白紋羽病菌は、子のう菌のクロサイワイタケ目 (Xylariales) クロサイワイタケ科 (Xylariaceae) カタツブタケ属 (*Rosellinia*) に属する。クロサイワイタケ目所属菌には、子のう菌としては例外的に木材腐朽能力が高いものが多く、森林生態系において分解者として重要なものも含まれる。白紋羽病菌にもセルロースやリグニンの分解能力があり、樹木根の内部にまで侵入して材を腐らせる。ただしリグニンの分解能力は比較的弱く、白紋羽病菌を接種して土壌中に埋設した枝でセルロースの分解が進むと本菌は死滅したことから、あまり分解の進んでいない材を好むといえる。

根部への感染時には、図-1のように菌糸が樹木根の表面を取り巻いたのち、皮層内部に侵入する。菌糸は扇状の菌糸束となって皮層組織を溶解しながら進展する。植



図-1 マルバイカイドウの地下部に感染した白紋羽病菌
白色の菌糸が表面を拡がっている。

物は傷害に対してコルク組織を形成し病変の進行は一時的に停止するが、コルク組織まで到達した菌糸束はこれを突破し健全部に侵入する。根の組織は黒く変化して壊死し、根株全体が損なわれると、その後急激に枯死する。

白紋羽病菌は森林に普遍的に生息している。白紋羽病菌はきわめて多犯性の病原菌であり、宿主植物として130種以上が挙げられる。しかし、人手の入らない森林では果樹園のように白紋羽病が激発することはない。果樹園での本病激発の一因として、粗大有機物の多投や全面的な敷わらにより土壤中の白紋羽病菌の密度が高まったことが挙げられている。このほか病気の発生の有無には、樹種による感受性の違い、植物の生理状態や他の生物との競合等が関与しており、果樹栽培では、密植や強剪定、過剰な着果、根量の制限など、樹体への過大なストレスが白紋羽病の発病につながる。

3) 白紋羽病菌と他の土壤生物との関係

白紋羽病の発生は開墾後の年数が長い果樹園で多いが、このような園地の土壌は糸状菌が少なく細菌が多い、いわゆる熟畑土壌となっている。一方、森林土壌では熟畑土壌に比べ糸状菌が多く、白紋羽病に対して拮抗作用を有するものもある。このような拮抗微生物はこれまでに多数選抜されており、これらの微生物と共存する場合には、白紋羽病菌の生育は抑制される。また、近年開発された温水による白紋羽病の治療技術においては、温水

処理と拮抗菌の存在が相乗的に働き、土壌中の白紋羽病菌の死滅程度を高めている可能性が示唆されている。このほか微生物ではないが、感染した白紋羽病菌の病原力を低下させる菌類ウイルスもいる。

その他、トピムシの一種が菌糸を摂食し土壌中での菌糸進展を妨げることで白紋羽病の発病を抑制した例がある。また、ある種の菌食性線虫は白紋羽病菌との共培養下で、白紋羽病菌に対して抑制的に作用する菌類ウイルスを媒介する(澤島ら2012)。一方、白紋羽病菌の子のう胞子は紡錘形で比較的大きく(約 $40 \times 7 \mu\text{m}$)、粘液質の鞘を有するという形態的特徴があり、土壤動物がその分散に寄与している可能性もある。しかし、白紋羽病菌の菌体や胞子の分散への土壤動物の関与については実証例がなく、研究の進展が待たれる。

3. 根に共生する菌類の多様性—菌根菌の多様性がもたらす機能

1) 多様な菌根菌群集

菌類の中には、植物の根に侵入して「菌根」と呼ばれる特有の構造を形成して共生を営むものが存在し、このような菌類は「菌根菌」と呼ばれている。菌根菌は直径数 $\sim 10 \mu\text{m}$ の菌糸を土壌中に伸ばし、土壌から吸収した水、窒素、リン、カリウム、鉄などの養分を植物に供給する。植物は光合成由来の糖類を根に転流し、その一部が菌根菌の菌糸に供給される。このような相互作用によって、植物の成長が菌根菌によって促進されることが多くの試験で示されており、植物と菌根菌との関係は、お互いにとって有益な相利共生である。

外生菌根を形成する植物は種子植物の3%にすぎないが、ブナ科、マツ科、フトモモ科、フタバガキ科、カバノキ科、ヤナギ科、一部のマメ科などの森林生態系で優占する樹木と共生するため、外生菌根は森林でよく観察される菌根タイプである(図-2右)。外生菌根菌は、菌糸や菌根の顕微鏡観察に基づく種の同定が困難である。一方で、外生菌根菌には、肉眼で観察できるキノコ(子実体)を形成するものいる(図-2左)。そのため、野外における外生菌根菌の研究は、キノコの発生生態に基づいて進められてきた。しかし最近では、分子生物学的手法の導入に伴い、地下部における菌根菌種の同定に、遺伝情報が使われるようになってきた。

森林における菌根菌種は非常に多様であり、例えば、日本で6属8樹種と共生する菌根菌を調査した研究で

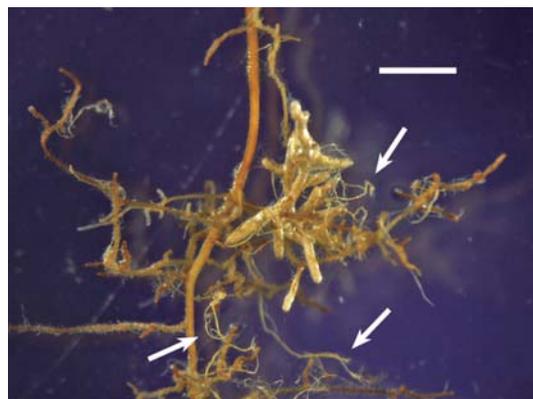


図-2 コツブタケ

左：カシ林の樹下に発生したキノコ（子実体）。右：コナラの根に形成された菌根。菌根表面から菌糸束（矢印）が伸びて土壤中を拡がり、養分や水分を効率的に吸収する。スケールは2mm。

は、300種を超える菌根菌が存在すると見積もられている (Ishida *et al.*, 2007)。また、1本の成木と共生する菌根菌種数を調べた例は少ないが、200種前後と見積もった報告がある (Bahram *et al.*, 2011)。また、菌根菌群集には希少種が多く、全種数の50%程度が希少種であると考えられている。

2) 菌根菌群集の機能

このように樹木と共生する菌根菌の種多様性は非常に高いが、樹木が多様な菌根菌と同時に共生する意義はあるのだろうか。この点については、多くの疑問が残っている。同時に共生する多様な菌根菌種の機能は相補的なのか、それとも重複したものなのか？、菌根菌群集の大きな部分を占める少数種の機能の重要性は？などである。菌根菌の機能の1つは、細胞の外へ酵素を分泌し、植物が吸収できない基質を溶かして吸収することである。この酵素活性は菌根菌の種数の増加に伴って増加する。そのため、菌種数の増加は重要であるが、同じ群集内の菌種間での機能の重複も認められている。この機能の重複する菌や多数の希少種と植物が共生している理由は、環境が変化しても植物が必要な諸機能を発揮する種々の菌根菌を確保するためではないかと推察される。菌根菌群集の変化が機能的な変化を起こした例として、マメ科樹木の存在によって土壤窒素が増加した林内での研究がある。この林分では、宿主植物と共生する菌根菌種数の減少と優占菌種の変化が認められ、土壤窒素が増加した林分で優占する菌根菌種は高いホスファターゼ活性を持っていた (Taniguchi *et al.*, 2007, 2008)。土壤窒素が増加した林分では相対的にリンが不足すると考

えられることから、リン吸収に関わるホスファターゼ活性の上昇は、このような林分における植物の適応度を高めたと考えられる。これは、優占菌種のシフトが引き起こす、環境の変化への機能的な適応と言える。一方、この林分では土壤病害が土壤窒素の増加した環境で激化していたが、菌根菌種の変化は土壤病害に対する抵抗性を高めることはなかった。菌根菌群集構造や多様性の意義については不明な点が多いが、森林生態系における菌根菌の重要性を明らかにする上で非常に重要なテーマである。

4. 菌根菌を助ける微生物—ヘルパー細菌

1) 菌根圏における微生物間相互作用

植物根の周囲で根の浸出物によって影響を受けている土壤を根圏土壌と言う。一方、糸状菌が樹木の細根に侵入して形成される菌根の周囲は根と菌糸の両方からの浸出物に影響を受けており、菌根圏土壌と言う。どちらも圏外土壌と比較して特異的な微生物が増加する。そして、このような微生物では、樹木や菌根との間だけでなく、微生物間においても様々な関係が成立している。例えば、ある種の微生物が別の微生物の生育を阻害する「拮抗」や同じ餌を求めて「競争」が起きる。逆に、ある種の微生物の生育を別の微生物が「補助」している場合もある。このような関係は、細菌は細菌、糸状菌は糸状菌という枠で大別して研究されることが多かったが、その大枠を超えた糸状菌—細菌間の相互作用に関する研究は非常に重要である。多様性に富んだ細菌—糸状菌の関係を図-3に示した。

2) 菌根ヘルパー細菌

樹木の多くと共生関係にある菌根菌（糸状菌）と細菌については、およそ30年前から研究が行われている。はじめは、室内実験によって、何種類かの菌根圏に生息する細菌が菌根菌（ホンショウロ）の生育に影響を及ぼしていることがわかり、その後、その影響は細菌の種類によって阻害的や促進的に作用することがわかった。Garbaye (1994) はそうした菌根菌に影響を与える細菌のうち、菌糸生育を促進するもの、植物との共生を促進するものを「Mycorrhiza helper bacteria (菌根ヘルパー細菌)」と名付けた。その後、様々な細菌類がヘルパー細菌として報告されてきた。Kataoka and Futai (2009) は、クロマツ菌根圏から2種のヘルパー細菌 (*Bacillus* 属菌と *Ralstonia* 属菌) を単離したが、寒天培地上での菌糸の反応と植物体を用いた菌根化に対する反応がそれぞれの細菌で異なっていた。どちらの細菌も植物体を用いた場合には菌根化を促進するが、寒天培地での対峙培養試験では、*Bacillus* 属菌は菌根菌の生育を著しく阻害したのに対して、*Ralstonia* 属菌は菌根菌の生育を促進した。このことから2種の細菌では、ヘルパー効果のメカニズムが異なると考えられる。

3) ヘルパー効果のメカニズム

では、そのヘルパー効果のメカニズムとは何か？これまで不明だったこの疑問に対する答えが最近の研究から明らかになりつつある。そのうちの一つは、細菌による促進物質の生産である。グラム陽性細菌である *Streptomyces* 属菌は、菌根菌（ベニテングタケ）の菌

糸伸長は促進するが、2種の植物病原菌 (*Armillaria obscura* と *Heterobasidion annosum*) の菌糸伸長は阻害した (Schrey *et al.*, 2005)。この菌株の培養上清からは、Auxofuran と WS-5995B、C という物質が単離されている。Auxofuran はベニテングタケの菌根化に対する促進物質ではなかったが、菌糸伸長を促進する物質であり、WS-5995B と C は植物病原菌の菌糸伸長を抑制する物質である。

ここまで、ヘルパー細菌の菌根菌に与える影響についてみてきたが、ヘルパー細菌はなぜ菌根菌を助けるのか？菌根菌から何らかの見返りをもらっているのか？という疑問が生じる。Deveau *et al.* (2010) は、ヘルパー細菌がチアミンを生産し、菌根菌（オオキツネタケ）の生育促進と生存性を高めているのに対し、菌根菌は菌糸内にトレハロースと二糖類を高濃度に蓄積し、ヘルパー細菌を誘引し、さらにはヘルパー細菌の増殖を促進していることを示した。このように、根圏や菌根圏では微生物間相互作用が色々な形で働いており、その関係は細菌-細菌間、糸状菌-糸状菌間からだけではなく、細菌-糸状菌間にも及ぶ。この相互関係の多様性は、土壤微生物群集の多様性の根幹をなしていると言ってよいだろう。

5. さいごに

以上のように、土壤中を拡がる樹木の根およびその周囲には多種多様な微生物が存在し、樹木の成長に直接的に影響を及ぼすほか、樹木-土壤間や樹木間の物質の移

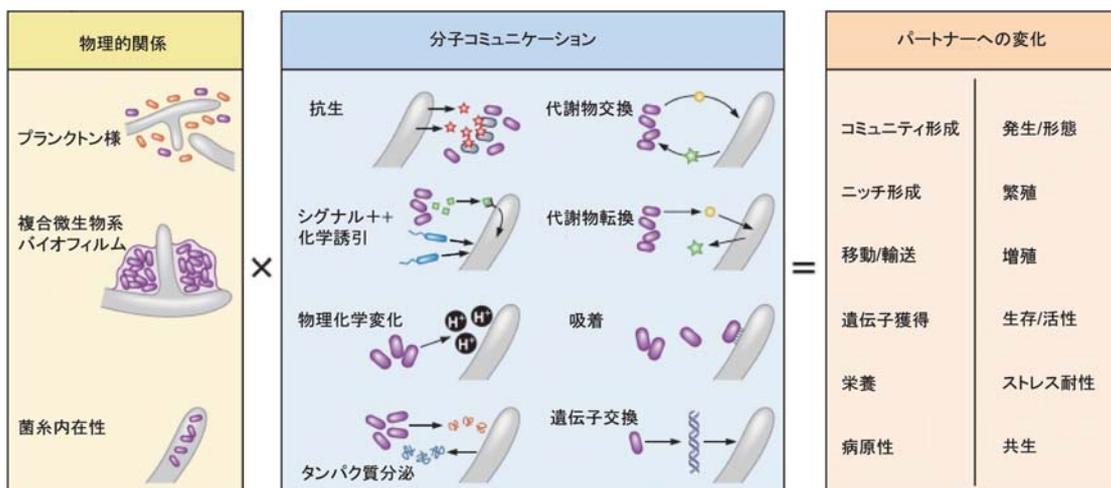


図-3 細菌-糸状菌間相互作用の概略
細菌と糸状菌間の物理関係・分子作用は、お互いに様々な結果を生じる (Frey-Klett *et al.*, 2011)。

動や変換に大きく関与している。土壌中の微生物は、その重要性が認識されているものの、大きさを μm の単位 (1 ミリの 1,000 分の 1) で表現することからわかるように、微小な生き物である。そのため微細な環境変動の影響を受けて生活を送っていると想像でき、未だ明らかにされていない生育機構が存在するであろう。そのことは、逆に、土壌微生物の研究がこれからも大きく進展することを示唆している。評価や測定手法の進歩により、今後、微生物の新たな営みの姿が明らかになることを期待する。

引用文献

- Bahram M., Pölme S., Kõlkalg U. and Tedersoo L. (2011) A single European aspen (*Populus tremula*) tree individual may potentially harbor dozens of *Cenococcum geophilum* ITS genotypes and hundreds of species of ectomycorrhizal fungi. *FEMS Microbiol. Ecol.* 75: 313-320.
- Deveau A., Brule C., Palin B., Champmartin D., Rubini P., Garbaye J., Sarniguet A. and Frey-Klett P. (2010) Role of fungal trehalose and bacterial thiamine in the improved survival and growth of the ectomycorrhizal fungus *Laccaria bicolor* S238N and the helper bacterium *Pseudomonas fluorescens* BBc6R8. *Environ Microbiol. Rep.* 2 : 560-568.
- Frey-Klett P., Burlinson P., Deveau A., Barret M., Tarkka M. and Sarniguet A. (2011) Bacterial-fungal interactions: Hyphens between agricultural, clinical, environmental, and food microbiologists. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 75 : 583-609.
- Garbaye J. (1994) Helper bacteria: a new dimension to the mycorrhizal symbiosis. *New Phytol.* 128 : 197-210.
- Ishida T. A., Nara K. and Hogetsu T (2007) Host effects on ectomycorrhizal fungal communities: insight from eight host species in mixed conifer-broadleaf forests. *New Phytol.* 174 : 430-440.
- Kataoka R. and Futai K. (2009) A new mycorrhizal helper bacterium, *Ralstonia* species, in the ectomycorrhizal symbiosis between *Pinus thunbergii* and *Suillus granulatus*. *Biol. Fertil. Soil.* 45 : 315-320.
- 澤島拓夫・佐々木厚子・中村 仁・岡田浩明・兼松聡子 (2012) 菌食性線虫 *Filenchus discrepans* との共培養下における白紋羽病菌菌株間のマイコウイルス伝搬. 平成 24 年度日本植物病理学会大会講演要旨集 p.156.
- Schrey D. S., Schellhammer M., Ecke M., Hampp R. and Tarkka T. (2005) Mycorrhizahelper bacterium *Streptomyces* AcH 505 induces differential gene expression in the ectomycorrhizal fungus *Amanita muscaria*. *New Phytol.* 168 : 205-216.
- Takemoto S., Nakamura H., Sasaki A. and Shimane T. (2009) *Rosellinia compacta*, a new species similar to the white root rot fungus *Rosellinia necatrix*. *Mycologia* 101 : 84-94.
- Takemoto S., Nakamura H., Tabata M., Sasaki A., Ichihara Y., Aikawa T. and Koiwa T. (2012) White root rot disease of the lacquer tree *Toxicodendron vernicifluum* caused by *Rosellinia necatrix*. *J. Gen. Plant Pathol.* 78 : 77-79.
- 竹本周平・出川洋介・中村 仁 (2009) 神奈川県下で発見された白紋羽病菌類似の未記載種. 樹木医学研究 13 : 79-80.
- Taniguchi T., Kanzaki N., Tamai S., Yamanaka N. and Futai K. (2007) Does ectomycorrhizal fungal community structure vary along a Japanese black pine (*Pinus thunbergii*) to black locust (*Robinia pseudoacacia*) gradient? *New Phytol.* 173 : 322-334.
- Taniguchi T., Kataoka R. and Futai K. (2008) Plant growth and nutrition in pine (*Pinus thunbergii*) seedlings and dehydrogenase and phosphatase activity of ectomycorrhizal root tips inoculated with seven individual ectomycorrhizal fungal species at high and low nitrogen conditions. *Soil Biol. Biochem.* 40 : 1235-1243.

細根と土壌動物の相互作用

藤井 佐織 (ふじい さおり、同志社大学大学院理工学研究科)

1. はじめに

森林土壌には非常に多くの土壌動物が生息している。土壌動物は、枯死植物等の土壌有機物をエネルギー源とし、食う-食われるの関係で複雑につながった土壌食物網を形成している。落葉などの有機物はこの食物網を通ることによって分解され、炭素は二酸化炭素として大気中に、窒素等は無機態養分として土壌中に放出される。このように、土壌動物は摂食活動を通して森林生態系の物質循環に深く関与している。したがって、森林生態系における土壌動物の機能を明らかにするために、土壌動物と土壌有機物の相互作用について盛んに研究が行われてきた。土壌有機物は、落葉、落枝、枯死根等の枯死リター、生根から放出される滲出物、動物遺体・排泄物等

様々であるが、これまでの研究では、主に落葉ばかりが注目されてきた。そこで、ここでは土壌動物の資源として考慮されることが少なかった植物細根と土壌動物の関係に焦点を当て、これまでの研究により分かってきたことについて概説する。

2. 土壌動物の紹介

土壌動物には様々な分類群があるが、一般に体サイズや機能によって分類されることが多い。体サイズによる分類では、一般に体幅 0.1 mm 以下のものを小型土壌動物、0.1 - 2 mm のものを中型土壌動物、2 mm 以上のものを大型土壌動物という (図-1)。一方、機能による分類では、動植物遺体の分解に関わる3つの機能群で

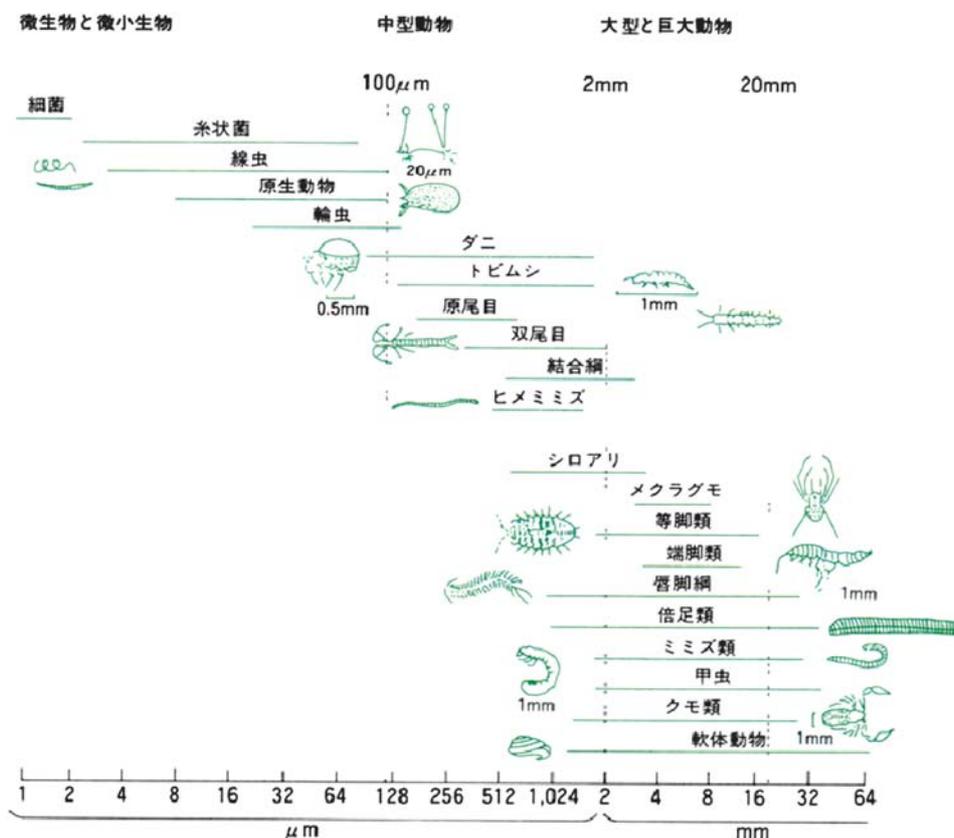


図-1 土壌生物の体サイズによるグループ分け (武田 1992)

ある、微生物食者、落葉変換者、生態系改変者と、捕食者、根食者に分けられる。土壤動物の機能は摂食活動の種類によって決まるので、体サイズによる分類と機能は深く関連している。例えば、小型土壤動物には土壤水中に生息する原生動物やセンチュウ、クマムシが含まれる。これらの動物は主に細菌を摂食するといわれ、機能分類では微生物食者に相当する。また、中型土壤動物には土壤孔隙中に生息するトビムシ、ササラダニなどの小型節足動物やヒメミミズが含まれる。これらの動物は菌や落葉、腐植を摂食すると言われ、微生物食者と落葉変換者の両機能群を含む。大型土壤動物にはミミズ、ヤスデ、シロアリ、ムカデ、クモ、双翅目の幼虫等が含まれ、これらは落葉変換者、生態系改変者、捕食者に相当する。

土壤にはこれらの多岐にわたる動物が想像以上に多く生息している(図-2)。青木(1983)によると、明治神宮の森における片方の靴の下にはセンチュウが約75,000個体、ダニが約3,000個体、ヒメミミズが約2,000個体、トビムシが約500個体、双翅目の幼虫が約100個体、クマムシ、ワラジムシが約10個体、ムカデ、クモ、ミミズ、ヤスデ等が0-2個体生息している。

これまでは植物細根と関連のある土壤動物ということ、根食者である一部のセンチュウや、双翅目やコウチュウ目の幼虫を指すことが多かった。しかし、最近の研究に

より、それ以外の分類群も含め土壤動物と細根の相互作用が明らかになりつつあり、その関係に注目が集まっている。

3. 細根由来資源の重要性

土壤有機物はほとんどが植物由来のもので、土壤食物網はエネルギー源の大半を植物由来有機物に依存している。そのため、土壤の養分供給量や腐植形成過程を明らかにするために、落葉などの植物リターの供給量や分解速度に関する研究が半世紀にわたって盛んに行われてきたが、これらの研究では細根が着目されることは少なかった。しかし、枯死細根に含まれる養分含量は落葉に含まれるものと同程度あり、かつ細根の年間枯死量は落葉量に匹敵することから、近年になり細根リターの重要性が広く認識されてきた(Berg and McLaugherty, 2003)。一方、細根は生存時も単糖類やアミノ酸を含む易分解性の根滲出物や、根表皮の脱落細胞、ムシゲルなどの有機物を排出している。これらの有機物は、排出されると即座に細菌等によって利用されるために実態が把握されにくかったが、量として光合成による一次生産量の10-25%を占めるであろうことが分かり、最近注目されている(Lavelle and Spain, 2005)。このように、細根由来の有機物は枯死細根由来のものと生細根由来のもの2種類あり、落葉由来有機物と比較して量的に

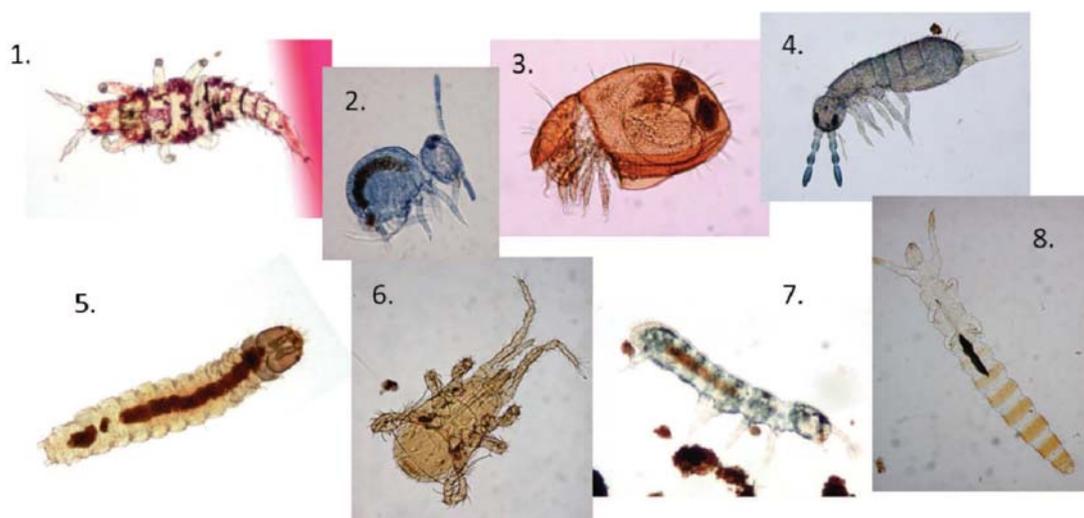


図-2 様々な中型土壤動物のプレパラート写真

1. アザミウマ目、2. トビムシ目 (*Sphaeridia tunicata*)、3. ササラダニ亜目、4. トビムシ目 (*Desoria sensibiris*)、
5. コウチュウ目の幼虫、6. トゲダニ亜目、7. トビムシ目 (*Folsomia octoculata*)、8. カマアシムシ目

無視できないものである。

これまでの落葉由来有機物と土壤動物に関する研究から、落葉の質や量が土壤動物群集形成に作用することが明らかになってきた。加えて、土壤動物の機能は利用・摂食する有機物の種類により決定されることが明らかにされてきた。細根由来の有機物は、落葉由来の有機物と大きく質が異なる。したがって、細根を土壤動物の資源として考慮することにより、土壤動物の群集形成や機能のより正確な理解につながることを期待できる。

4. 細根と土壤動物の相互作用

植物細根の周りで分解者としての機能をもつ土壤動物の個体数密度が高くなることは多くの研究で観察されてきた(例えば Parmelee *et al.*, 1993)。しかし土壤動物にとって細根由来資源がどの程度重要か、細根資源を利用するといっても枯死細根と生細根のどちらを利用しているか、また、土壤動物が根圏でどのような機能をもつかといったことに対して、解明されていることは驚くほど少ない。ここでは土壤動物と枯死細根、生細根に関する研究をそれぞれ紹介する。

4.1 枯死細根との相互作用

一般に、細根は葉に比べてリグニンやスベリン等の難分解性画分が多く、枯死細根の分解速度は落葉に比べて遅い(Berg and McClaugherty, 2003)。難分解性で微生物による分解が進行しにくい落葉では、土壤動物の寄与が大きくなることが知られていることから(Seastedt, 1984)、土壤動物は細根分解に対しても大きく寄与する可能性がある。実際に、殺虫剤を用いて土壤動物の量を操作し、有機物分解に対する土壤動物の寄与を調べた研究では、落葉よりも枯死細根の分解において土壤動物の寄与が大きいことが示されている(Parker *et al.*, 1984)。細根の内部組織はスベリン等難分解性画分を多く含んだ外皮に包まれているため、細根の分解には、土壤動物による物理的な粉碎が重要になるかもしれない。

筆者らは、ヒノキの針葉と細根の分解に関与する中型土壤動物群集を調べた。その結果、針葉と細根を利用している群集は異なり、また細根を利用する個体数が多いことが明らかとなった。これは主に場所の違い、つまり針葉の分解が地表面で始まるのに対し、細根の分解が最初から土壤中で進むことによるものと思われたが、葉と細根の質の違いも影響していることが示された(Fujii

and Takeda, in press)。トビムシとササラダニを比較すると、個体数がリターの質の影響をより大きく受けたのはササラダニであった。ササラダニには難分解性の針葉や木材の中に潜り込んで内部から摂食するタイプのものが知られており(金子ら 1990)、このような働きをもつササラダニが難分解性の外皮をもつ細根の分解に大きく寄与しているのかもしれない。

また、この研究におけるトビムシ群集解析の結果、細根リターに選好性をもつ種がいることが明らかにされた。従来の落葉分解研究では土壤中に生息する土壤動物は分解後期過程に関与すると考えられてきたが、細根リターに選好性をもった種は土壤中に生息するにもかかわらず分解初期のリターを好むという性質をもった。土壤中にある落葉由来有機物は、易分解性画分の分解が進行し、養分も溶脱した後のものであるが、枯死細根は土壤中に分解初期の栄養価の高いリターとして供給される。したがって細根は、葉リターに比べて難分解性であるとはいえ、葉と異なる空間に供給されることで土壤中深くに生息する土壤動物の重要な資源として機能していると考えられた。

4.2 生細根との相互作用

従来、生細根と関連のある土壤動物という根食者である一部のセンチュウや双翅目・コウチュウ目の幼虫を指すことが多かった。しかし近年、根食のような直接的な関係ではなく、微生物を介した細根と土壤動物の相互作用に注目が集まっている。生きている細根の周りでは、根滲出物などの有機物により細菌や菌の成長が活性化し、微生物の密度が高くなっている。特に、細菌の密度が顕著に高くなることにより細菌食者である原生動物やセンチュウの密度が高くなることが知られてきた(Zwart *et al.*, 1994)。原生動物やセンチュウは、細菌の活性や群集組成に影響を与えることにより、植物の養分吸収や成長に影響を及ぼす(Bonkowski *et al.*, 2000)。その一つの理由は、土壤の養分利用において、細菌と植物の間に競争があるためである。一方、これらの土壤動物は細根の形態にも影響を及ぼす。特に、原生動物の存在により細根の分岐が増えることが知られており、これは土壤中の養分濃度の変化だけでなく、植物ホルモンへの作用によると考えられている(Bonkowski, 2004)。例えば、原生動物の摂食活動がオーキシンを生産する細菌の成長を促し、側根の生産が増大することが報告されている(図-3)。このような原生動物の活動に

よる細根形態の変化も最終的には植物の養分吸収や成長に影響を及ぼすと考えられる。

また最近では、炭素の安定同位体や放射性同位体を利用した研究により、植物リターの分解に寄与するトビムシやダニ等の土壤動物も、エネルギー源として生根由来の炭素に依存していることが明らかになっている (Pollierer *et al.*, 2007)。特に、トビムシは生根由来の炭素に強く依存している可能性があり、生根の有無により炭素源を落葉と生根の間で切り替えることなどが示されている (Endlweber *et al.*, 2009)。トビムシはクモや捕食性ダニ等多くの捕食者の餌であるので、トビムシの生根依存率の解明は、土壤食物網全体の炭素源の解明につながると考えられる。しかし、トビムシが何を摂食することで生根由来炭素を取り込んでいるかについてはまだ明らかになっていない。従来菌食と考えられてきた通りに、根圏で細菌増殖に続いて増殖する菌を摂食しているのか、根に炭素源を依存している菌根菌を摂食しているのか、それとも細菌を摂食しているのか、滲出物やムシゲルなどの根圏集積物を直接こしとって食べているのか、根を生食しているのか等、生根由来の炭素を取り込む経路は多く考えられる。

根圏におけるトビムシの機能は、菌根菌や腐生菌の摂食により根圏の微生物組成 (菌根菌：腐生菌比など) や菌根共生に影響を与えて、植物への養分可給性を変化さ

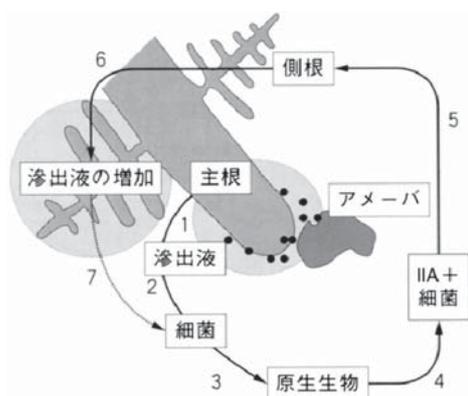


図-3 小型土壤動物がホルモンを介して根に及ぼす効果 (金子 2007)

1. 根による滲出物の放出、2. 多様な細菌群集の成長促進、3. 細菌食の原生動物の増殖、4. 原生動物の選択的摂食によるオーキシシン (IAA+) を生産する細菌の増殖、5. IAA+ の放出による側根成長の促進、6. 側根増加による滲出物量の増加

せることであると考えられてきた。一方で、細根形態にも影響を及ぼすことが知られてきたが、この細根形態の変化に土壤養分濃度や菌根化率の変化が対応していない場合が多く、はっきりとしたメカニズムは解明されてこなかった (Endlweber and Scheu, 2007)。トビムシが根圏で何を直接摂食しているのか特定できれば、このような謎は解明される可能性が高い。また、得られる知見によっては、トビムシより高次栄養段階の食物連鎖についての認識が改まる可能性がある。トビムシが腐生菌を摂食しているならトビムシより高次栄養段階の食物連鎖は分解者系であると考えられるが、トビムシが根を生食しているならトビムシは一次消費者であり、それを起点とした食物連鎖は分解者系であるとは言い難くなるかもしれない。

5. まとめ

先にも述べたように、土壤動物の生態系機能は、土壤動物が何を摂食しているかによって大きく決まっている。ここまで紹介してきたように、落葉分解者と考えられてきた土壤動物が、細根由来炭素にエネルギー源を大きく依存していることは明らかである。これまで餌資源として認識されてこなかった細根資源との関係がさらに細かく解明されることによって、これら土壤動物の生態系機能もこれまで信じられていたものから変わってくると考えられる。細根資源を利用する土壤動物は、細根や根圏環境に対し特に強い作用を持っていると考えられ、これら土壤動物と細根の関係が明らかになっていくにしたがって、土壤生態系と植物の相互作用系の解明が大きく前進すると考えられる。

参 考 文 献

青木淳一 (1983) 自然の診断役 土ダニ. NHK ブックス, 東京.

Berg B. and McClaugherty C. A. (2003) Plant litter, decomposition, humus formation, carbon sequestration. Springer-Verlag, Berlin.

Bonkowski M. (2004) Protozoa and plant growth: the microbial loop in soil revisited. *New Phytol.* 162 : 617-631.

Bonkowski M., Cheng W., Griffiths B. S., Alpehi J. and Scheu S. (2000) Microbial-faunal interactions in

- the rhizosphere and effects on plant growth. *Eur. J. Soil Biol.* 36 : 135-147.
- Endlweber K., Ruess L. and Scheu S. (2009) Collembola switch diet in presence of plant roots thereby functioning as herbivores. *Soil Biol. Biochem.* 41 : 1151-1154.
- Endlweber K. and Scheu S. (2007) Interactions between mycorrhizal fungi and Collembola: effects on root structure of competing plant species. *Biol. Fertil. Soils* 43 : 741-749.
- Fujii S. and Takeda H. (in press) Succession of collembolan communities during decomposition of leaf and root litter: effects of litter type and position. *Soil Biol. Biochem.*
- 金子信博 (2007) 土壤生態学入門. 東海大学出版会, 神奈川県.
- 金子信博, 片桐成夫, 三宅登 (1990) ササラダニによるスギ落葉の分解過程. *日本林学会誌* 72 : 158-162.
- Lavelle P. and Spain A. V. (2005) *Soil Ecology*. Springer, Netherlands.
- Parker L. W., Santos P. F., Phillips J. and Whitford W. G. (1984) Carbon and nitrogen dynamics during the decomposition of litter and roots of a Chihuahuan Desert Annual, *Lepidium Lasiocarpum*. *Ecol. Monogr.* 54 : 339-360.
- Parmelee R. W., Ehrenfeld J. G. and Tate R. L. III (1993) Effects of pine roots on microorganisms, fauna, and nitrogen availability in two soil horizons of a coniferous forest spodosol. *Biol. Fertil. Soils* 15 : 113-119.
- Pollierer M. M., Langel R., Körner C., Maraun M. and Scheu S. (2007) The underestimated importance of belowground carbon input for forest soil animal food webs. *Ecol. Lett.* 10 : 729-736.
- Seastedt T. R. (1984) The role of microarthropods in decomposition and mineralization processes. *Ann. Rev. Entomol.* 29 : 25-46.
- 武田博清 (1992) 森林土壌の生物: 林野庁監修 森林インストラクター入門. 社団法人 全国林業改良普及協会, 東京.
- Zwart K. B., Kuikman P. J. and Van Veen J. A. (1994) Rhizosphere protozoa: their significance in nutrient dynamics. in Darbyshire JF, ed. *Soil Protozoa*. CAB International, Wallingford.

福島原発事故の森林生態系への放射能汚染影響を考える

第123回日本森林学会関連研究会

研究会の概要

大久保 達弘 (宇都宮大学)、金子 真司 (森林総合研究所)
金子 信博 (横浜国立大学大学院)、田中 浩 (森林総合研究所)

背景

東日本大震災後の福島原発事故から1年が経過し、影響は急性期から長期継続期へと徐々に移行しつつあります。また除染も教育施設・居住地域・農地から森林へ変わりつつあります。17都県の汚染地域の土地利用は森林が優占しており、森林生態系の非生物環境（森林土壌、流出水など）とともに広範な生物相〔樹木（葉、樹皮、材）、林床植物（山菜）、菌類、動物（土壌動物、野生獣）〕への生態プロセスを通じた直接的影響と今後の人体への間接的影響が懸念されています。

当初、森林は大気浄化フィルターとして都市や農地を放射能汚染から守ったと考えられますが、今後は森林に蓄積した放射性核種がどのくらいの時間、どのような経路で周辺生態系へ影響を及ぼすかが重要になってきます。現在、森林生態系サービス関連産業である林業・木材産業への放射能汚染被害（腐葉土の生産流通販売規制、椎茸用原木・おが粉の規制、調理用薪・木炭使用の規制、野生きのこ・山菜・野生獣肉の流通規制）・風評被害（京

都五山送り火・被災松問題ほか）が顕在化しています。さらに、汚染地域の森林は周辺に農地、水辺等が広がりモザイク構造（里山景観）を形成していることから、森林から周辺生態系（農地・水辺）および関連産業（農業・水産業）への影響が懸念されます。

原発事故による森林の放射能汚染に対して、現在多くの研究者が取り組んでいます。ただ、その成果の社会への提供は十分にされているとは言えない状況です。福島原発事故は緊急課題ゆえに関連研究者、行政担当者、一般市民の方々への国内外の情報提供とその共有が現在急務となっています。また、今後の研究やリスク管理の方向性に関して情報交換が必要とされていますが、森林の放射能汚染影響に関連した公開シンポ等の場はこれまで多くありません。今回事故後1年間に得られた情報の共有化と今後の観測体制や除染への考え方を議論することを目的として、第123回日本森林学会（宇都宮大学）において、公開研究会を下記の学会会員有志により開催しました。プログラムは以下の様に3部から構成さ

れ、第1部では国内外の先行研究としてチェルノブイリ原発事故（ウクライナ）と福島原発事故以前の日本での研究についての報告、第2部では福島原発事故後の福島県と周辺地域での最新観測の成果の報告、そして第3部ではこれまでの研究総括と今後の課題についてパネル討論を実施しました。当日の参加者は167名でした。ここではその概要を記録として公表します。Sergiy Zibtsev（セルゲイ・ツィブツェフ）氏の口頭発表は英語、質疑応答は日本語訳（担当：田中、大久保）で行われ、要旨は英語原文を日本語訳（担当：大久保、田中）しました。

研究会の開催にあたり、この場を提供していただいた日本森林学会、同大会運営委員会、Zibtsev氏の招へいにあたり資金的援助をいただいた財団法人放射線影響協会、協賛していただいた森林立地学会、パネル討論会の記録のテープ起こしでお世話になった小岩史子氏（筑波大学）、通訳でお世話になった木村穰氏（森林総合研究所）、会場係でお世話になった宇都宮大学農学部森林科学科学生諸氏にお礼申し上げます。

当日のプログラム

表題：第123回日本森林学会関連研究会「福島原発事故の森林生態系への放射能汚染影響を考える」
主催：「福島原発事故の森林生態系への

放射能汚染影響を考える」研究会
後援：財）放射線影響協会、協賛：森林立地学会
発起人：大久保直弘・金子真司・金子信博・田中浩（学会会員有志）
日時：2012年3月29日（木）PM1:30-

PM5:30
場所：宇都宮大学峰キャンパス
趣旨説明：大久保達弘、総合司会：田中浩
I. 国内外の先行研究の紹介
基調講演1：Sergiy Zibtsev（セルゲ

イ・ツィプツェフ) (国立ウクライナ生命・環境科学大学)
 「Twenty-five years of research into the effects of radiation on forests contaminated after disaster on the Chernobyl Nuclear Power Plant: overview」(チェルノブイリ原発災害後の汚染森林での25年間の放射線影響研究の概説)

基調講演2: 吉田 聡 (放射線医学総合研究所) 「森林生態系での放射性物質の動態—過去の研究事例から予測される状況と課題—」

II. 最新知見の紹介
 基調講演3: 恩田裕一 (筑波大学) 「森林から土壌・水圏への放射性物質の移行」
 話題提供1: 金子真司 「森林における放射能汚染調査」

話題提供2: 大久保達弘 「栃木の落葉広葉樹林林床の放射性物質の蓄積」

III. パネル討論
 「森林生態系への放射能汚染影響研究とリスク管理の方向性」
 パネリスト: 吉田 聡、恩田裕一、金子真司 座長: 大久保達弘

I. 国内外の先行研究の紹介

基調講演1: チェルノブイリ原発災害後の汚染森林での25年間の放射線影響研究の概説

Sergiy Zibtsev

(セルゲイ・ツィプツェフ、国立ウクライナ生命環境科学大学)

Valerii Kashparov, Vasyl Yoschenko

(ヴァレリー・カシュパロフ、ヴァジル・ヨシエンコ、ウクライナ農業放射線科学研究所)

表-1 EU、ウクライナ、日本における事故後の食品での放射性核種の許容値の比較 (Bq・kg⁻¹)

| 核種グループ / 同位体 | 許容値 | 比放射能 (Bq・kg ⁻¹ , Bq・L ⁻¹) | | |
|---------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------|------------|------------|
| | | 幼児食品 | 乳製品 | その他の食品 |
| I/ ¹³¹ I | EC (89) | 150 | 500 | 2000 |
| | Ukraine (NRBU-97) | (100-200) | (400-1000) | (800-2000) |
| | Ukraine (87) | | (3700) | |
| | Japan | | 300 | |
| 半減期 >10 日 ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs | EC (89) | 400 | 1000 | 1250 |
| | Ukraine (NRBU-97) | | (100-400) | (200-800) |
| | Ukraine (87) | | (370) | (370-3700) |
| | Japan | | 200 | |
| Sr/ ⁹⁰ Sr/ | EC (89) | 75 | 125 | 750 |
| | Ukraine (NRBU-97) | (5-50) | (20-200) | (40-400) |
| α 同位体, ²³⁹ Pu/ ²⁴¹ Am | EC (89) | 1 | 20 | 80 |
| | IAEA (TRS 364) | 1 | 1 | 10 |

EC(89):EU加盟国衛生許容値 (1989年欧州委員会により設定)

Ukraine(NRBU-97):ウクライナ放射線安全基準 (1997年)

Ukraine(87):ソビエト放射線安全暫定基準 (チェルノブイリ事故後1987年にソビエト連邦により設定)

IAEA (TRS 364):IAEA Technical Report Series No.364, "Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments" による。

1986年4月26日に発生したチェルノブイリ原発事故により350万ha以上のウクライナ国土が汚染された。壊れた4号炉心部からの放射性核種は10日間(4月26日~5月6日)環境中に放出した。全ての汚染地域は、災害後の政

府指示により等放射線量、土壌汚染密度に基づいて、4つの放射性核種汚染地域に区分された^(1,2)。第1および第2地域:チェルノブイリ排除ゾーン(全員退避)、第3地域:住民移転保証地域(実効線量(Deff) >1 mSv・yr⁻¹)、第4地域:

放射線規制拡大地区(実効線量(Deff) >0.5 mSv・yr⁻¹)。汚染地域内の農地からの全生産物に対する許容衛生レベルがウクライナ厚生省により設定された(乳製品に対する¹³⁴Cs/¹³⁷Cs:100-400, ⁹⁰Sr:20-200 Bq・kg⁻¹もしくはBq・L⁻¹を含む)(表-1)。

汚染された森林生態系の動態や健全性、林産物利用の現状については多くの総説、論文として公表された。高放射線による樹木に対する重大な生物学的影響は、1986-1987年の期間、反応炉周辺5-6km以内の地域に限られており、それは燃料粒子による直接的な樹冠への影響であった(図-1)⁽³⁾。災害後25年経過した現在、同様の放射線生物学的影響は、1986年に放射性廃棄物が土壌の深さ1-2mに投棄された場所に生育するヨーロッパアカマツで認められる。樹木の根系は汚染土壌層に達しており、廃棄物から放射性核種が集中的に吸収されている。0.01~6 Gy・yr⁻¹の線量下でのヨーロッパアカマツの頂芽優勢の停止およびいわゆる「変形(morphoses)」は最も典型的な形態学的変化である。ヨシエンコらの研究⁽³⁾によれば、ERICA Toolによるスクリーニング値10 mGy・yr⁻¹では約32%の頻度で形態の変化が認められる。

チェルノブイリ原発から西側350km、南東側100kmの範囲では、放射性エアロゾルやガスの汚染による樹木の成長や生理過程への影響はなかったが、林産物

利用に影響を及ぼした^(4, 5)。汚染された林産物（木材、キノコ、ベリー類、狩猟獣肉、干し草や葉草）の使用は、森林近隣に住む地域住民に最も重大な追加的内部被曝線量（総線量の70%以上）を生じさせた。一般人や林業従事者は彼らが入林する際に森林生態系表層部に沈着した放射性核種から追加的外部被曝線量を受けた。災害25年後の環境中の¹³⁷Csと⁹⁰Srの量は1.7分の1、²³⁸Pu、²³⁹⁻²⁴⁰Puは1.2分の1に減少し、²⁴¹Amは25倍に増加した。後3種類の核種はチェルノブイリ原発周辺10km内だけに認められた（図-2）^(6, 7)。

汚染地域内の持続的森林利用のために、多くの対策がウクライナ政府により実行された。排除ゾーン外で総汚染密度37～555 kBq・m⁻²のすべての汚染森林は3つのゾーンと7つのサブゾーンに分けられ、植林、地拵え、間伐、収穫伐採、森林作業、山火や病害虫管理などすべての林業活動は、林業従事者個人の放射線防護のために適正に規制され、林産物生産はウクライナ厚生省の衛生基準に従った（表-2）⁽⁵⁾。

大縮尺の森林土壌汚染詳細地図が林産物汚染予測のための基盤として作成された。森林での初期の大きな汚染変動とモザイクパターンは林業における放射線規制をより複雑にしている。たとえば、ひとつの林班内（500×500m）で、土壌汚染密度は、そこから得られる林産物に要求される放射線規制値の3-5倍もしくはそれ以上の変動を示す。研究結果は、災害一ヶ月後の森林では開放景観と比較して¹³⁷Csと⁹⁰Srの総量が25-200%の沈着量を示した^(5, 8, 9)。放射性核種の大きな水平移動は、土壌浸食のある景観でも、平地が卓越する汚染ゾーンと同様に認められなかった。根系を通した放射性核種の植生への大きな蓄積は、災害後1-2年で開始し、同時に可給態の化学形態として土壌根系層に達した。腐植含量の少ない砂土および砂壤土は放射性核種を吸収せず、樹木への¹³⁷Cs移行率は高かった^(8, 9, 10, 11)。災害25年後では、ヨーロッパアカマツが優占するウクライナ



図-1 壊れた反応炉から5-6 km圏内で見られる樹木成長への放射線影響
1986年に堆積した高放射線廃棄物上（深さ1.0-1.2m）で育つマツ。
（撮影：V. Yoschenko 博士）

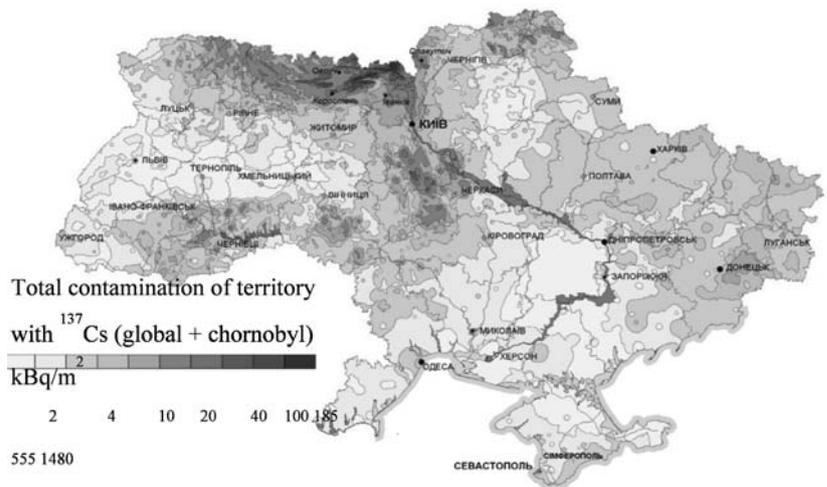


図-2 2006年のウクライナ国内の¹³⁷Cs汚染状況 [ウクライナ非常事態省のチェルノブイリ20年後の報告 (2006) ⁽⁶⁾より]

表-2 ¹³⁷Cs土壌汚染密度にもとづいた森林のゾーニング別の林業活動の規制

| ゾーン | 汚染密度 (kBq・m ⁻²) | 規制内容 |
|---------|-----------------------------|------------------------------------------------------|
| 第1ゾーン | > 555 | 特別な林業管理形態の展開、作業時間の制限 |
| 第2-cゾーン | 370-555 | 人に使用する木材利用の制限 |
| 第2-bゾーン | 259-370 | 燃料用、国産品製造用、食料保存設備用としての木材利用の禁止 |
| 第2-aゾーン | 185-259 | 燃料、間伐小径材および野生獣肉の利用制限、魚卵の捕獲禁止、野生ベリー類および薬用植物の採取禁止 |
| 第3-bゾーン | 74-185 | 野生ベリー類およびキノコの消費禁止、薬用植物と野生獣の利用制限（制限種類リストによる、また総量規制あり） |
| 第3-aゾーン | 37-74 | キノコ、野生ベリー類、数種の薬用植物の制限付き利用（製品検査必要とする） |
| | < 37 | 林産物の利用制限なし |

北部の森林地帯では、森林生態系での土壌と植生での放射性核種の循環はいまだに続いているが、地下水への放射性核種の重大な移行は山火事、強風、病害虫などによる強度の攪乱がない限り検出されなかった。土壌における粘土粒子や腐植の増加に伴って、放射性核種の樹体への移行は減少する。この事実は低汚染下にある国内中部での農業生産でのチェルノブイリ災害の影響の低さを決定づけている。

集中して行われた研究の成果として、森林利用の適応的技術、法的規制、森林および森林火災管理、放射線モニタリングシステム、林業対策システムが開発された^(5, 7, 12, 13)。林産物における許容値は、薪の $600 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ (^{90}Sr の場合は $60 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$) から皮なし丸太の $1,500 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ まで幅があり、それらは林業研究者と医学研究者の協力により設定され、ウクライナ厚生省によって許可された。知識の普及の重要な手段として、汚染地域で森林作業に携わる全ての管理者のために、放射線学、放射線生物学、放射線生態学および放射能汚染下での森林利用に関する基礎的トレーニングプログラムが、複数の大学で組織化された。

被爆線量検査は、汚染地域における森林利用と管理のための戦略開発の中で、最も重要な部分であった⁽⁷⁾。森林からの食料(キノコ、ベリー類、野生獣肉、牧畜用干し草、林内放牧牛のミルクと食肉)は、森林地帯における人間への最も顕著な放射性核種のフローとなる。農業生産分野とは反対に、林業の復旧においては被爆線量の軽減についてほとんど成功し

ていない。森林近隣に居住し、林産物(キノコ、野生ベリー類、ハーブ、狩猟獣肉、ミルク、牛乳)を利用する住民の内部被曝量は、同齡住民の総被曝量の70%に達している(図-3)^(4, 7)。

数多くの要因が樹木やその器官への放射性核種の蓄積を決定していることを、放射線生態学の成果は示している^(4, 5, 8, 14, 15, 16)。すなわち、初期汚染の化学的物理的形態、放射性核種のタイプ、地形、土壌型、水分条件、樹種の生理的特徴、生態的条件に対する樹種要求の適合性、林分構造、個々の樹木の樹体形成、樹高、樹齡などの要因である。森林モニタリングシステムの開発にあたっては、これらすべての要因が考慮されている。森林における放射性核種の長期挙動モニタリングでの基本ルールは、サンプリング方法(統計的信頼限界を含む)、輸送方法、サンプル準備、実験室での汚染レベルの測定およびサンプル利用に及んでいる^(8, 12, 13, 17)。

積極的に除染処置が実施されなかった森林の修復プロセスは、主としてその自己修復の動きによって決定される。たとえば、汚染に必要な期間は放射性核種の半減期に相当する^(5, 18)。積極的な修復措置の中で、最も有効な地上部バイオマスの除染方法の一つが、放射性核種の根への吸収を削減することで、これは結果的に木材、枝および葉における比放射能の減少やリターの自己洗浄につながる。これらの措置としては、主としてカリウムなどの無機肥料の使用、たとえば排水良好な土壌(斜面上部から中部)では4-5年に1回の適用が考えられる。湿地

土壌(湿原、斜面下部)では地下水位レベルの制御が適用できるだろう。

チェルノブイリ事故による汚染地域での持続的な林業活動を行うために、組織的、技能的、技術的、制限のないし情報的という4つのグループの対策戦略が開発された^(4, 5, 7, 19)。その中で最も重要事項は、長期放射線生態学的モニタリングの確立、林産物と被爆線量の制御、汚染地域からの林産物の使用ルールについての周知、汚染地域への立ち入り制限、林産物の汚染証明と許容値受け入れとその更新、森林作業技術、森林管理戦略、特別な山火管理アプローチ、病虫害管理、トレーニング、普及活動や他の方策を通じた知識普及などである。

25年にわたるチェルノブイリ原発災害処理の経験から、汚染森林の修復において次のような優先すべき段階的処置が考えられる。

1. 政府、省、大学、研究所、NGOなどの組織間で汚染地域に関連するすべての取り組みのコーディネートについて全国レベルのセンター(機関)の組織化
2. 人間への放射線量測定や放射性核種の環境でのふるまいを明らかにするために、異なるレベルの生物体(遺伝子、個体から生態系)について景観レベルで共通の調査地での学際的研究の組織化
3. 許容レベル以下の放射線量を維持するために汚染地域内で適用される立法、指導、許容値設定、ゾーニングの展開
4. 許容値以上の放射線量を受ける住民に対する、組織的、全体的で、社会的バランスのとれた、経済的に実行可能な対策の開発と実行
5. メディア印刷物出版物等のメディア、公開討論会、ワークショップ等を通じて、人々の関心、(情報の)透明性、地域や全国レベルの責任機関から住民に向けた勧告の高い信頼性を維持すること
6. 健全な森林や自然資源管理に対する実質的提案の開発

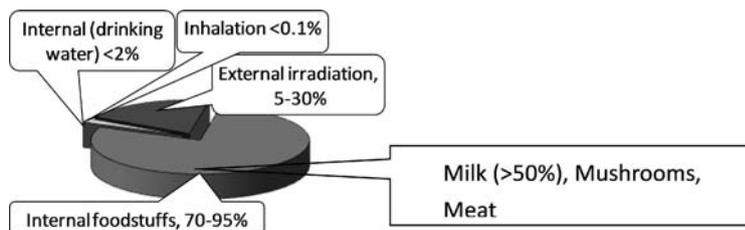


図-3 ウクライナの放射性核種汚染地域の第3、第4地域での森林近隣に居住し、林業に従事し、林産物利用する人々における実効線量の内訳[内部被曝(飲用水)<2%、吸入<0.1%、外部被曝5-30%、内部被曝[(ミルク(>50%)、キノコ、肉]70-90%)]

7. 管理者、学生、人々に対する幅広い教育ならびにトレーニングの組織化
8. 汚染森林地帯における長期モニタリングの確立

引用文献

- 1) The Law of Ukraine "On Status and Social Protection of Population Suffered from Chernobyl Catastrophe". Decree of Verkhovna Rada of Ukraine 796-XII from 28.02.91.
- 2) The Law of Ukraine "About legal regime of the territory that were contaminated after Chernobyl disaster". Decree of Verkhovna Rada of Ukraine N 791a-XII from 27.02.91.
- 3) Yoschenko V. *et al.* (2011) Chronic irradiation of *Pinus sylvestris* in the Chernobyl exclusion zone: dosimetry and radiobiological effects. *Health Phys.* 101: 393-408.
- 4) Ipatiev V. F. *et al.* (eds) (2005) *Forest. Human. Chernobyl. The elements of radio ecological forestry* (in Russian). Forest Institute of NAS of Belarus. 535 p. ISBN 985-6768-05-6.
- 5) Krasnov V.P. *et al.* (2007) *Applied radioecology of forests. Polissia.* 680 p. ISBN 978-966-266-5.
- 6) Anspaugh, L., Balonov M. (ed) (2006) *Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience.* Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment'. Radiological assessment reports series, IAEA. STI/PUB/1239. 166 p.
- 7) Ministry of Emergencies of Ukraine. (2011) *Twenty-five Years after Chernobyl Accident: Safety for the Future.* National Report of Ukraine. KIM publishing. 328 p.
- 8) Perevolotskiy A.N. (2005) *Distribution of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in forest biogeocenosis.* Institute of radioecology. 255 p. ISBN 985-6765-18-8.
- 9) Scheglov A.I. (2000) *Biogeochemistry of technogenic radionuclides in forest ecosystem.* Science Publishing. 268 p.
- 10) Zibtsev S. (2004) *Impact of forest site type features on migration of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in forest ecosystem.* Problems of ecology of forests and forest use in Polissia of Ukraine. *Zhytomy.* 6: 124-133.
- 11) Zibtsev S., Kuchma M.D., Francevich L.I. (1996) *Forest and ecological characteristic of growth and dynamic of forests in the Chernobyl exclusion zone.* Bulletin of ecological state of the Chernobyl exclusion zone. *ChernobylInterInform.* 5: 25-33.
- 12) Zibtsev S. *et al.* (1997) *Methodology of radio ecological monitoring of forests in the Chernobyl exclusion zone.* Chernobyl. 50 p.
- 13) Zibtsev S., Gavriley V. (1998) *Results of monitoring of forests in Chernobyl exclusion zone during 1995-1997.* Proceedings of International Conference: Science. Chernobyl-97, Ministry of Chernobyl Affairs. 122-129.
- 14) IAEA (2009) *Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments* IAEA. 622p. ISBN 978-92-0-104509-6.
- 15) Yoschenko V.I. *et al.* (2006) *Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone: part II. Modeling the transport process.* *J. Env. Radioact.* 87: 260-278.
- 16) Zibtsev S. *et al.* (1997) *Accumulation and allocation of ¹³⁷Cs in ecosystem of pine forest under different level of contamination of soil.* Proceedings of International Conference: Science, Chernobyl-97, Ministry of Chernobyl Affairs. 485-492.
- 17) Ulanovsky A. *et al.* (2011) *ReSCA: decision support tool for remediation planning after the Chernobyl accident.* *Radiation and Environmental Biophysics.* 50:67-83.
- 18) *Strategies of decontamination. EC-Experimental collaboration project N 4. Final report.* UR 16530 en. 1996. ISBN 92-827-5195-3.
- 19) Hohl A. *et al.* (2012) *The Human Health Effects of Radioactive Smoke from a Catastrophic Wildfire in the Chernobyl Exclusion Zone: A Worst Case Scenario.* *International Scientific Electronic Journal Earth Bioresources and Quality of Life.* 1: 1-34. In: <http://gchera-ejournal.nubip.edu.ua/index.php/ebql/issue/view/2>.

基調講演2：森林生態系での放射性物質の動態—過去の研究事例から予測される状況と課題—

吉田 聡

(放射線医学総合研究所)

はじめに

日本の国土は森林の割合が高く、福島県は71%が森林である。すなわち、福島第一原子力発電所の事故（以下、福島原発事故）によって大気中に放出された放射性物質の多くは森林に存在しており、森林における放射性物質の行く末は、環境全体における放射性物質の将来の状態を大きく左右する。また、森林は多くの生物が共存する代表的な生態系の一つであり、人にとっては、木材、食料、水、燃焼等の供給源として重要である。放射性物質による森林の汚染は今回が初めてのことでなく、大気中核実験やチェルノブイリ原子力発電所の事故（以下、チェルノブイリ事故）等における先行事例がある。特に、チェルノブイリ事故後はヨーロッパを中心に多くの分析データが収集され、森林での放射性セシウムの動きに加えて、キノコ（菌類）のように放射性セシウムを特異的に取り込む生物が存在し、土壌への蓄積にも関与していること等が明らかとなっている。食物連鎖による核種移行の重要性も明らかになった。これらの知見は、国際会議のプロシーディングを始め、多くが出版物としてまとめられている^(1,2)。

ここでは、被ばく線量の観点から現在最も重要である放射性セシウムに注目し、森林に関して福島原発事故以前に得られていた知見を整理すると共に、事故後の状況と対策について考察する。

放射性セシウムの沈着と林内での動き

森林の樹冠は表面積が大きく、ガスや粒子状の放射性物質を捕集する。また、雨などと共に降下する放射性物質の一部も樹冠に捉えられ、その割合は、放射性物質の化学的形態および樹種や樹冠の状態によって異なる。福島原発事故が発生した2011年3月11日当時は、落葉樹

林は樹冠に葉がなく、大部分の放射性セシウムが直接林床に到達した。一方で、スギなどの常緑樹林は一旦樹冠に捕らえられた割合が大きい。

樹冠に沈着した放射性セシウムは、降雨による洗い落としや、その後のリターフォールと共に、次第に林床に移行する。林床最上部のリター層に集積した放射性セシウムは、リターの生物分解やリターからの溶脱によって下層に移行する。しかし、チェルノブイリ事故後のデータによると、そのままより下層に抜けてしまうのでは無く、有機物層と鉱質土壌の境界付近をピークとして蓄積し、長期間保持される傾向がある⁽³⁾。同様の傾向は、主として1950–1960年代に行われた大気中核実験由来の放射性セシウムでも確認されている⁽⁴⁾。福島原発事故以前の日本の環境中には大気中核実験由来の放射性セシウムが存在していた。近年では半減期の長いセシウム137のみが残っている状態であるが、事故前の森林の表層土壌では、数100 Bq·kg⁻¹というセシウム137の濃度も珍しくなかった。福島原発事故の影響を調査する際も、汚染が少ない地域では元々存在するセシウム137を考慮する必要がある。

土壌表層付近への放射性セシウムの保持に強く関わっているのが、森林生態系における栄養塩サイクルである。セシウムは、栄養塩であるカリウムと同じアルカリ元素であるため、その動きは非常にダイナミックである⁽⁵⁾。即ち、土壌中の放射性セシウムが植物の経根吸収で葉に至り、これが再び葉からの溶脱やリターフォールと共に林床最上部に戻るとい、ポンプの様なりサイクル作用が働いている。また、キノコ（菌類）のように放射性セシウムを特異的に取り込む生物が存在し、これらに保持されることによっても放射性セシウムは下層に移動し

にくくなる⁽⁶⁾。

農耕地等の場合は、土壌中の粘土鉱物等に放射性セシウムが強く吸着（固定）されることが分っている。この強い吸着は、土壌の深さ方向への移動と同時に、生物への吸収も抑制する。森林では、生物学的な物質循環の中で、放射性セシウムは植物等に利用されやすい形態（可吸態）を維持し、その結果、森林のキノコや植物中あるいは野生動物中の放射性セシウムは比較的高濃度に維持される。放射性セシウムは森林の中で「動きながら留まっている」と言える。

林産物の汚染

森林は林業の場であると同時に、燃料や堆肥、キノコや山菜等の供給源である。森林の汚染は、これらの林産物を利用する生活や産業に大きな影響を与える。

福島原発事故の影響を受けた樹木は、現在、主として樹冠（葉と枝）が汚染している。また、木材として利用する場合には樹皮の汚染に注意すべきである。樹皮は、事故時に沈着した放射性セシウムで直接汚染したことに加え、その後樹冠から流れてくる樹幹流によっても汚染している。樹木表面の放射性セシウムの一部は、表面から直接吸収されて樹体内に取り込まれ、内部で移動していると考えられる（表面吸収と転流）。今後、樹木において注視しなければならないのは、土壌からの経根吸収である。林床表面のリターの分解が進むにつれて、経根吸収される量は増えると予測される。

土壌からの経根吸収を予測するために、「移行係数」が用いられる。農作物の場合は、農作物（可食部）中濃度と土壌（作土）中濃度の比である。森林の植物の場合はこの移行係数をそのまま適用することが困難である。これは、農耕地の作土層が比較的均一に混合されているのに対して、森林土壌中の放射性セシウムの分布が深さ方向に不均一である上、植物の根も種によってその深さが異なるためである。そこで、利用されるのが、土壌の単位面積あたりの沈着量を分母にする移行係数 T_{ag} (aggregated transfer

coefficient) であり、下記で定義される。

$$T_{ag} (m^2 \cdot kg^{-1}) = \frac{\text{植物中の放射性核種の濃度 (Bq} \cdot \text{kg}^{-1})}{\text{土壌への総沈着量 (Bq} \cdot \text{m}^{-2})}$$

IAEA (国際原子力機関) の技術レポート (IAEA: TRS472)⁽⁷⁾ には樹木への T_{ag} がまとめられている。例えば、土壌への放射性セシウム沈着量が $100 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$ の場所では、マツの木部への移行係数 $1.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{dry}$ を用いると、マツの木部の濃度が $0.17 \text{ kBq} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{dry}$ と予測される。

ただし、これらの値は定常状態を仮定したものであることに注意が必要である。福島原発事故で汚染した現在の森林内では、放射性セシウムが森林内の各部位に分散し、かつ、リターなどと共に急速に移動しており、この状態で T_{ag} を用いた評価をすることは大きな誤差を伴う。森林に沈着した放射性セシウムが定常状態になるまでには数十年を要するとの記述もある⁽⁵⁾。この定常状態を判定するためには、事故で沈着した放射性セシウムと森林に元々存在した安定セシウムを同時に分析し、その混合状態を見極める事が有効である⁽⁸⁾。

植物中に取り込まれた放射性セシウムの体内分布は非常に不均一である。例えば、チェルノブイリ事故によって汚染されて12年経ったベラルーシの松林では、ヨーロッパアカマツ個体中の放射性セシウムは、若い葉や、樹幹の形成層付近で濃度が高いことが確認されている⁽⁹⁾。安定セシウムやカリウムも同様の分布であり、植物の生長が盛んな部位に栄養塩のカリウムが集まり、それと同様にセシウムも移動していると考えられる。安定セシウムやカリウムの分布を調べる事で、福島原発事故によってもたらされた放射性セシウムの将来の分布を推測する事が可能である。

チェルノブイリ事故以降、キノコやベリー等の産物に高い放射性セシウムの濃度が報告された。特にキノコに関しては、特異的に高い値が多数報告されて被ばく線量を管理する観点からも注目された。

福島原発事故以前の日本でも、野生キノコの放射性セシウム濃度 (大気中核実験由来) が比較的高いことは知られていた⁽¹⁰⁾。1989年から1991年にかけて採取された非食用も含めた日本産野生キノコ124種 (284試料) の分析結果は大きな幅を示し、 $1,000 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{dry}$ を越えるものも幾つか見つかった⁽¹¹⁾。全試料の中央値は $53 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{dry}$ であった。

福島原発事故後は、野生キノコや一部の栽培キノコ (原木しいたけ等) に基準値を超える放射性セシウムが見つかり、出荷制限や採取の自粛が行われている。野生キノコ中の放射性セシウム濃度を左右する因子は、1) その場所への放射性セシウムの沈着量、2) 土壌中での放射性セシウムの深さ方向の分布、3) 菌糸の位置、4) キノコの種類等である。土壌中の放射性セシウムの分布が時間 (年) と共に変化すると、キノコ中の濃度も変化する事が報告されている。すなわち、今年大丈夫であったキノコでも、来年や数年後に大丈夫であるという保証は無い (図-4)。

また、シダ植物に高い放射性セシウム濃度が見られる場合が多いことも知られている。データは多くないが、日本人が山菜として好む植物の一部はシダ植物であり、福島原発事故に伴って濃度が高くなる可能性がある。

キノコやシダ植物では、従来からセシウム137濃度が高い傾向にあるため、福島原発事故の影響が小さい地域でも、比較的高いセシウム137が検出される可

能性がある。半減期が短いセシウム134は事故以前にはほとんど検出されていなかったことから、セシウム137とセシウム134の比を調べることにより、福島原発事故由来の放射性セシウムか否かを判定することができる。

福島原発事故後、イノシシ等の野生動物で高い濃度の放射性セシウムが報告されている。チェルノブイリ事故の後、汚染されたヨーロッパの国々で野生動物中の高い放射性セシウムが報告され、動物の食性が放射性セシウムの濃度を大きく左右していることも明らかになっている。例えば、ノロジカ中の放射性セシウムの濃度が秋に高くなること、およびそれがキノコを食べることに起因していることが報告されている⁽¹²⁾。食物連鎖の上部に位置する野生動物は、森林生態系の汚染を総合的に判断する指標として優れている可能性がある。

森林からの流出

森林に沈着した放射性セシウムの森林外への流出は、二つの観点から重要である。一つは、飲料水等の安全性であり、もう一つは森林を源とする環境の再汚染の可能性である。これらに関しては、現在、各方面での調査研究が進んでいる。森林生態系は基本的には沈着した放射性セシウムを長期間保持して、あまり外に出さない系である。上述の様な生態系としてのセシウムの保持機能に加えて、地下に浸透した場合には土壌への吸着も期待できる。しかし、地形が急峻である日

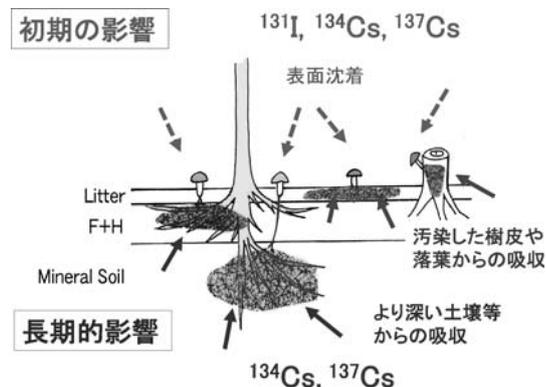


図-4 野生キノコの汚染経路：時間とともに汚染の経路は変化し、それに伴って汚染するキノコ (菌) の種類も変化する

本の森林では、雨量の多い時に、放射性セシウムを吸着した表面土壌が直接流出する可能性があり、その水を利用する場合には十分な配慮が必要である。これまでも、沢や河川の堆積物や懸濁物の中には放射性セシウムが相当量含まれていることが明らかになっている。

森林汚染の対策

森林汚染の対策は、管理的手法と技術的手法の二つに大別できる⁽³⁾。管理的手法は、樹木伐採の延期、狩猟の禁止、キノコ狩りの禁止、立ち入りの禁止、森林火災の防止等である。技術的手法は、肥料や石灰の投与、土壌改変、樹木の伐採と再生等である。

農林水産省⁽¹³⁾と文部科学省⁽¹⁴⁾は、福島原発事故で汚染された森林における放射性セシウムの分布を調査し、現時点では、放射性セシウムの存在量が大きいリターを含む有機物層を除去することで、森林全体に含まれる放射性セシウムの多くを取り除くことができるとしている。また、農林水産省は、住宅に隣接する森林については、境界から森林内に向かって20 mの範囲の有機物層を除去することを提案し、福島県内ではこれに基づいた除染作業も開始されている。しかし、この対策はあくまでも周辺的生活空間の空間線量率を減らすことを目的としており、森林そのものの放射性セシウムを除去して、将来共に健全な状態に戻すまでには至らない。

森林は面積が広大で、その除染には膨大な、労力と時間、そして費用が必要である。しかも、その効果は明確には見えにくい。除染作業者の放射線被ばくも考慮する必要がある。優先順位に基づいた戦略が必要である。

まとめ

セシウム134の物理的半減期は2年であり数年で放射能が低下する。一方、セシウム137のそれは30年であり減少は緩やかである。放射性セシウムが森林に保持され、しかも森林内での汚染の状況が年と共に変化することを考えると、長期間にわたる調査と対策が必要になる。

また、チェルノブイリ事故の後、30 km圏内を中心に環境中の生物に放射線の影響が見られた。福島原発事故についても、環境放射能のモニタリングデータからの推測として、環境中の生物への影響の可能性が指摘されている⁽¹⁵⁾。スギやマツなどの針葉樹が放射線に対して比較的高感受性であることや、多くの生物が棲息している森林土壌表層部に放射性セシウムが蓄積しやすいことを考えると、森林の生物や生態系そのものに対する放射線の影響も注視していく必要がある。

引用文献

- 1) Desmet, G. *et al.* (eds.) (1990) *Transfer of Radionuclides in Natural and Semi-Natural Environments*. Elsevier Applied Science.
- 2) Linkov, I. Schell W.R. (eds.) (1999) *Contaminated Forest*. Kluwer Academic Publishers.
- 3) IAEA (2006) *Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience*, Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment'. Radiological Assessment Reports Series.
- 4) Yoshida, S. Muramatsu Y. (1994) *Sci. Total Environ.* 157:197.
- 5) Schell W.R. *et al.* (1996) *Health Physics*, 70, 318.
- 6) Steiner, M. *et al.* (2002) *J. Environ. Radioactivity.* 58:217.
- 7) IAEA (2010) *Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environment*. Technical Reports Series No. 472.
- 8) Yoshida, S. *et al.* (2004) *J. Environ. Radioactivity.* 75:301.
- 9) Yoshida, S. *et al.* (2011) *Radiat. Protect. Dos.* 46:326.
- 10) 吉田 聡, 村松康行 (1996) *日菌報* 37:25.
- 11) Yoshida, S. Muramatsu Y. (1994) *Environ. Sci.* 7:63.
- 12) Zibold, G. *et al.* (2001) *J. Environ. Radioactivity.* 55:5.
- 13) 農林水産省：森林内の放射性物質の分布状況調査結果について（第二報）（平成23年12月27日発表），http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/hozen/111227_2.html.
- 14) 文部科学省：文部科学省による放射性物質の分布状況等に関する調査研究（森林内における放射性物質の移行調査）の結果について（平成23年9月14日発表），http://radioactivity.mext.go.jp/ja/distribution_map_around_ukushimaNPP/0002/5600_091412.pdf.
- 15) Garnier-Laplace, J. *et al.* (2011) *Environ. Sci. Technol.* 45:5075.

II. 最新知見の紹介

基調講演3：森林から土壌・水圏への放射性物質の移行

恩田 裕一
(筑波大学)

はじめに

福島第一原発から放出された放射性物質の森林環境への蓄積状況と移行状況を確認するため、福島県伊達郡川俣町の山

木屋地区をモデル地域として、スギ若齢林、スギ壮齢林及び広葉樹混交林内外の高さ別の空間線量率の傾向の確認と、林床表面の放射性セシウム沈着量の測定

を実施した。また、高度別に葉・林内雨・樹幹流・落葉等の放射能濃度を測定し、森林内の放射性セシウムの分布状況と移行状況の調査を実施した。

調査地および調査方法

調査対象地点として、福島県伊達郡川俣町の山木屋地区のスギ林からなる針葉樹林サイト2地点と、ナラガシワ等が生育している広葉樹混交林1地点を選定した。本調査地点は、図-5に示すように、調査対象地点の¹³⁷Csの沈着量は300～600 kBq・m⁻²であることが確認されている。本調査では、ポータブルゲルマニウム半導体検出器を用いて、森林内外の高さ別の空間線量率の傾向を確認するとともに、林床表面の放射性セシウムの存在量を測定した。また、森林内にタワー（やぐら）を設置し、森林の高さ別の葉を採取するとともに、林内雨・樹幹流及び落葉等を採取し、森林内の放射性物質の分布状況と時間の経過に伴う放射性物質の移行状況について調査を実施した。

結果および考察

リター層と土壌を分別して測定したところ、スギの壮齢林では、地表面に沈着した放射性セシウムの総存在量の約50%が、スギの若齢林、及び広葉樹混交林では約90%が地表に集積したリター層などに吸着されていることがわかった。また、リター層と土壌を分別して測定したところ、畑地や採草地では、地表面に沈



図-5 調査地点の位置とタワー（やぐら）の設置状況

表-3 林外雨および林内雨に含まれる放射性セシウムの濃度

| 期間 | スギ壮齢林の林内雨 | | スギ若齢林の林内雨 | | 広葉樹混交林の林内雨 | | スギ林サイトの林外雨 | | 広葉樹混交林サイトの林外雨 | |
|------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| | ¹³⁴ Cs 濃度 (Bq・L ⁻¹) | ¹³⁷ Cs 濃度 (Bq・L ⁻¹) | ¹³⁴ Cs 濃度 (Bq・L ⁻¹) | ¹³⁷ Cs 濃度 (Bq・L ⁻¹) | ¹³⁴ Cs 濃度 (Bq・L ⁻¹) | ¹³⁷ Cs 濃度 (Bq・L ⁻¹) | ¹³⁴ Cs 濃度 (Bq・L ⁻¹) | ¹³⁷ Cs 濃度 (Bq・L ⁻¹) | ¹³⁴ Cs 濃度 (Bq・L ⁻¹) | ¹³⁷ Cs 濃度 (Bq・L ⁻¹) |
| 2011/07/03～07/10 | 34.5 | 47.5 | 14.8 | 17 | 37.3 | 49.2 | 0.7 | 1.4 | 0.3 | 0.3 |
| 2011/07/10～07/23 | 242.2 | 327.3 | 145.4 | 183.8 | 24.5 | 29.5 | | | | |
| 2011/07/23～08/01 | 65.3 | 82.9 | 60.5 | 72.6 | 11.9 | 14.2 | 0.5 | 0.5 | 0.1 | 0.2 |
| 2011/08/01～08/06 | 73.4 | 87.6 | 77.5 | 98.1 | 30.8 | 39.1 | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| 2011/08/06～08/12 | 104.8 | 139.2 | 81.9 | 106.2 | 67 | 86.2 | | | | |
| 2011/08/12～08/19 | 243.2 | 309.7 | 73.7 | 88.6 | 32 | 39.5 | | | | |
| 2011/08/19～08/23 | 126.5 | 171.9 | 48.5 | 66.7 | 8.1 | 12.2 | | | | |

着した放射性セシウムの総存在量（インベントリー）の約40～70%が地表のリター層に吸着していることが確認された。

ポータブルゲルマを用いた空間線量及び放射線核種の高度別計数率を測定したところ、スギ若齢林及び壮齢林では、樹冠上部で空間線量率、¹³⁷Csの計数率が最も高く、樹冠の下端に向かって減少していることが確認された。また、これらの値は地表面付近に近づくにつれて再び高くなる傾向が確認された。これに対し、広葉樹混交林では、樹冠の空間線量率、及び¹³⁷Csの計数率はほぼ一定で、地表に近づくにつれて高くなる傾向が確認された。

さらに、時間経過に伴って、スギ林（若齢林・壮齢林）では、樹冠上部において、9月と10月の空間線量率及び、¹³⁷Csの

計数率が減少しているが、地表面付近では変化が無いが、やや増加傾向であることが確認された。また、広葉樹混交林においては、時間が経過するにつれて、樹冠部で空間線量率及び¹³⁷Csの計数率が減少し、地表面付近で増加している傾向が確認された。

それぞれの森林における雨水に含まれる放射性核種濃度を表-3に示す。林外雨は、1Bq・L⁻¹以下であった。これに対し、7月3日～23日、及び7月23日～8月19日の期間に雨水サンプルで得られた樹幹流中の¹³⁷Csの放射能濃度は、平均70Bq・L⁻¹、スギ若齢林では43Bq・L⁻¹、広葉樹混交林では、42Bq・L⁻¹であった。

一方、林内の7地点（広葉樹混交林のみ5地点）で採取した林内雨の放射性セシウムの放射能濃度を捕捉水量によ

て加重平均した値を表-3に示す。これによると、スギ壮齢林について、7月3日～8月23日の期間に雨水サンプルで収集した林内雨中に含まれる放射性セシウムの放射能濃度は、¹³⁷Csで47.5～327.3Bq・L⁻¹、スギ若齢林では17.0～183.8Bq・L⁻¹、広葉樹混交林では12.2～86.2Bq・L⁻¹であった。これらのことから、森林内の地表面の放射性セシウムの存在量の増加要因は、葉に付着した放射性セシウムの降雨を通じた移行の寄与が大きいものと考えられる。

これらの結果から、スギ林内の土壌中における放射性セシウムの蓄積量は、落葉の堆積や、葉に付着した放射性セシウムが降雨により森林内の地表面に移行することなどに伴い、現状でも徐々に増加してきているものと考えられる（図-6）。

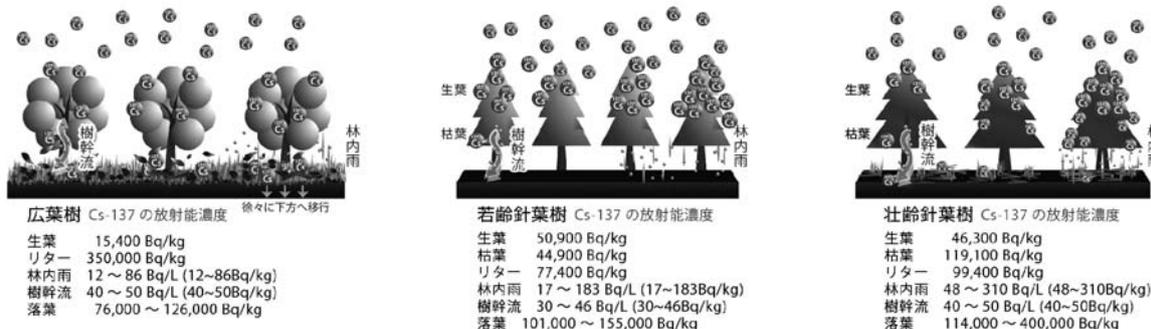


図-6 森林内の放射性核種移行調査のまとめ

話題提供1：森林における放射能汚染調査

金子 真司
(森林総合研究所)

はじめに

東京電力福島第一原発事故によって放出された放射性物質は放射性プルームとして大気中を移動し、周辺の森林の放射能汚染をもたらした。今回の事故で放出された放射性ヨウ素 (¹³¹I)、放射性セシウム (¹³⁴Cs、¹³⁷Cs)のうち、¹³¹Iは半減期が8日と短いに対して、¹³⁴Cs、¹³⁷Csはそれぞれ半減期が2年、30年と長い。セシウムは土壌中の粘土鉱物によって固定され、一部は根によって吸収

されて森林生態系の内部循環に取り込まれることから、森林の放射能汚染は長期間続くと予想される。ここでは森林総合研究所が行った森林の放射能汚染に関わる調査・研究から、「森林の放射性物質の分布調査」、「生活圏周辺の森林の除染」、「スギ花粉中の放射性セシウム」、「ミミズのセシウム濃度」についての成果を紹介する。

森林の放射性物質の分布調査

2011年8月から9月にかけて、福島県内の3箇所の国有林（川内村スギ林、大玉村スギ林・アカマツ林・落葉広葉樹林、只見町スギ林）に、調査プロットを設けて毎木調査からバイオマス量を推定するとともに林内の空間線量率を測定した。さらにプロット近傍から調査木3本を選定し（落葉広葉樹林ではコナラを選定）、調査木周囲の落葉層（堆積有機物）と表層土壌を採取した後に、調査木を伐採して葉、枝、樹皮、辺材、心材を採取した。採取試料は乾燥後にゲルマニウム半導体分析装置でセシウム (¹³⁴Cs、¹³⁷Cs)濃度を測定した。プロットの空間線量率は川内スギ林が3.11μSv・hr⁻¹、大玉3林分は0.33-0.34μSv・hr⁻¹、只見ス

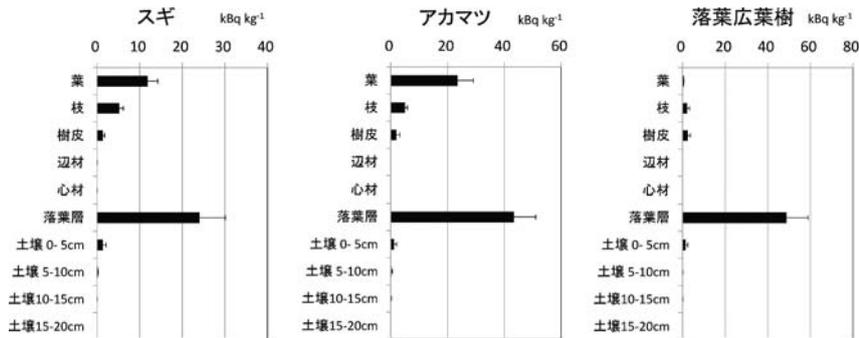


図-7 大玉村のスギ林、アカマツ林、落葉広葉樹林(コナラ)の樹木と土壌のCs濃度

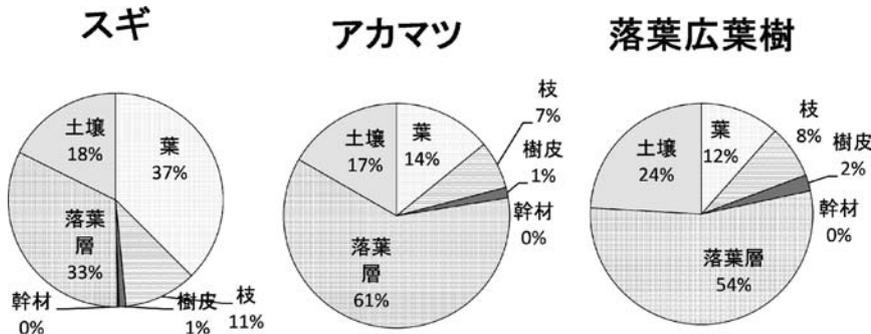


図-8 大玉村のスギ林、アカマツ林、落葉広葉樹林(コナラ)におけるCs分布の割合

注) 図7、図8とも林野庁発表(平成23年12月27日)では、落葉層と土壌の各林分の繰り返し数は3であったが、その後の測定値を加えてここでは繰り返し数が12となっている。このため林野庁発表とやや異なる結果になっている。

ギ林が $0.11\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$ であり、樹木および土壌の各部位の ^{134}Cs と ^{137}Cs を併せたセシウム(Cs)濃度は空間線量率の高低に対応して、川内スギ林で高く、只見スギ林で低く、大玉3林分はその中間の値を示した。樹木の各部位のCs濃度を比較すると、スギやアカマツでは葉>枝>樹皮の順であり、辺材や心材のCs濃度は低かった。それに対してコナラでは枝や樹皮のCs濃度が最も高く、葉のCs濃度はスギやアカマツの1/10以下と低く、辺材や心材の濃度はさらに低かった(図-7)。落葉層のCs濃度はいずれの林分でも高く、特にコナラ林では高かった。土壌表層(0-5cm深)のCs濃度は落葉層の1/10以下であり、土壌の深さが増すにつれてCs濃度は急激に低下していた(図-7)。単位面積当たりのCs量から森林内におけるCsの分布割合を求めた。スギ林はCsの約半分が樹木に存在していたのに対して、アカマツ林や落葉広葉樹林ではCsの多くは落葉層や土壌

に存在していた(図-8)。以上より、事故の起きた3月に着葉していたスギやアカマツではCsが樹冠部に多く付着したのに対して、落葉広葉樹林は新葉の展開前だったためCsの多くは林床に沈着したといえる。アカマツも常緑樹であるが、葉量や形状の違いから樹冠への付着量は少なかったと推定される。また辺材、心材、およびコナラ葉からCsが検出されたことは、事故から5、6か月後にすでに樹体内部へのCsの取り込みが始まっていることを示している。

生活圏周辺の森林の除染

福島県林業研究センターの多田野試験地(郡山市)の常緑針葉樹林と落葉広葉樹林にそれぞれ $20\times 20\text{m}$ のプロットを設けて、中心部から下草と落葉(堆積有機物)を除去して、プロット内の空間線量率の変化を調べた。下草と落葉の除去によって、調査区中心の空間線量率(高さ1m)は、常緑針葉樹林では除去前の

$0.77\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$ から $0.57\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$ まで約7割に、落葉広葉樹林では $1.22\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$ から $0.77\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$ まで約6割になった。プロット全体の空間線量率の平均は、常緑針葉樹林では除去前に比べて $12\text{m}\times 12\text{m}$ 除去で94%に、 $20\text{m}\times 20\text{m}$ 除去で83%に低下した。一方、落葉広葉樹林では $12\text{m}\times 12\text{m}$ 除去では除去前の87%に、 $20\text{m}\times 20\text{m}$ 除去で72%に低下した。このように常緑針葉樹林と落葉広葉樹林では林内におけるCsの分布が異なることから落葉除した場合の空間線量率の低下が異なることが明らかになった。この結果に基づき、生活圏周辺の森林の除染についての指針が出された(平成23年9月30日原子力災害対策本部)。

スギ花粉中の放射性セシウム

春先のスギ花粉の飛散とともに、放射性物質の飛散が心配される。そこで福島県および周辺の182ヶ所の森林で雄花に含まれるCs濃度を調査した。雄花のCs濃度はスギ林の空間線量率に応じて高く、最大で $253\text{kBq}\cdot\text{kg}^{-1}$ であった。また、これとは別に行った調査から、花粉のCs濃度は事故当時に着葉していた旧葉の約1/10であり、雄花や新葉とほぼ同程度の濃度であることが確認された。本調査で観測された最高濃度のCsを含む花粉が飛散した場合における花粉吸引による内部被ばく量を計算した結果、人体への影響はごくわずかであることが示された(平成23年12月27日林野庁発表)。

ミミズのセシウム濃度

森林の放射性物質の分布調査を行った川内村、大玉村、只見町のスギ林でミミズを捕獲してCs濃度を測定したところ、 $289\sim 19,500\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (値は湿重あたり、各地点10-20個体の平均値、消化管内容物を除去せず)のCsが検出された。ミミズのCs濃度は落葉層と土壌層(0-5cm)の濃度の中間の値であり、生息地の汚染度に対応することから、高濃度汚染地域ではミミズの捕食者への影響が懸念される。

話題提供2：栃木の落葉広葉樹林林床の放射性物質の蓄積

大久保 達弘
(宇都宮大学)

はじめに

筆者が近年宇都宮大学農学部附属里山科学センター協力教員の地域支援活動として取り組んでいる中山間地の落葉採取林の再生による林地と農地の一体的利活用の取り組み、その最中に発生した林床の落ち葉への放射線影響、また全国有数の腐葉土生産への影響について栃木県での事例を紹介したい。

里山における林地と農地の一体的利活用への支援

地域の林地と農地の一体的利活用への支援として、大学主催の公開講座において、栃木県東部南那須地域の棚田景観が広がる中山間地で受講生、地元の篤農林家、大学のインターンシップ・ボランティア学生および教員が協力して、数年来棚田周辺に広がる斜面地の落葉広葉樹林で落ち葉さらいを実施してきた。伝統農法に沿って落ち葉を直接または堆肥化させ



図-9 原発事故前の落ち葉かきの様子(栃木県南那須地域)(2010年1月撮影)



図-10 原発事故前の落ち葉の冬季湛水水田への投入の様子(栃木県南那須地域)(2010年1月撮影)

て冬季湛水田に投入し(図-9、10)、そこへ宇都宮大学農場開発の新品種米「ゆうだい21」を作付けして育てた特別栽培米を参加した学生が「げんき森もり」と命名し、県内の都市部、都内を含む県外で販売し始めた。落ち葉さらいの後はその森林をシイタケ原木林として再活用し、短伐期で皆伐と萌芽更新を繰り返し落葉広葉樹林の再生維持をはかり、長期的にはスギ・ヒノキなど針葉樹用材林産業と組み合わせ、地域のコミュニティビジネスとして農林複合経営の再構築について地域住民と話し合いを進めている最中であった。

里山林の落ち葉利用が中止に至った経緯

2011年6月～7月下旬ホームセンター等で一般市民の測定によって高濃度放射性セシウムが栃木県産の腐葉土から見つかった。その後、空間放射線量率が $0.1\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$ を超えた17都県の植物性堆肥原料を対象に農水省から「高濃度の放射性セシウムが含まれる可能性のある堆肥等の施用・生産・流通の自粛要請」通知(7月25日付け)が、引き続いて「放射性セシウムを含む肥料・土壌改良資材・培土及び飼料の暫定許容値の設定($400\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (製品重量))通知(8月1日付け)が出された。その後「肥料中の放射性セシウム測定のための検査計画及び検査方法の制定について」(対象は牛ふん堆肥、雑草堆肥等・稲わら堆肥等及びパーク堆肥で、腐葉土、剪定枝堆肥は除く)通知(8月5日付け)が、そして同時に「高濃度の放射性セシウムが含まれる可能性のある堆肥等の施用・生産・流通の自粛についての廃止」が通知された(8月5日付け)。しかしながら、腐葉土、剪定枝堆肥については引き続き自粛が継続された。これを受けて栃木県では独自に、腐葉土または剪定枝堆肥について、生産業者による自主検査報告に

対して確認書交付を開始し(8月31日付け)、現在に至っている。落ち葉自体の基準値はないが、腐葉土の代わりに直接落ち葉を水田へ投入すれば腐葉土の基準が適用されることになり、自主的検査が農家に求められる。現実的には一般の農家では高額な検査費の捻出は困難であり、現状では落ち葉使用を控えざるをえない。それ以降、公開講座での落ち葉採取作業は中止になり、次年度以降の生落葉を使用した特別栽培米「げんき森もり」の生産見通しは立っていない。

栃木における腐葉土生産の産業としての位置づけ

従来からの自給肥料として個別農家により行われてきた落葉採取と腐葉土生産とは別に、栃木県には産業としての腐葉土の生産・流通構造がある。栃木県担当者によれば現在県内には鹿沼市を中心として20数社の腐葉土生産業者があり、その内の半分程度は腐葉土専門の生産業者で、生産された腐葉土は県特産である園芸培土の鹿沼土の販売ルートに乗せて全国のホームセンターに流通されており、生産販売は全国トップレベルにある⁽¹⁾。福島原発事故の放射性物質の拡散により、落葉を供給してきた里山の落葉広葉樹林床も放射性セシウムにより汚染された。この汚染により国産の落葉含有率の高い高品質の腐葉土を生産している業者ほど放射能汚染の影響を強く受けることになり、業者の中には廃業に追い込まれるケースも出始めているという。腐葉土専門の生産業者以外の園芸培土生産業者でも、輸入落葉の使用やパーク堆肥含有率の増加により対処する動きがある。パーク堆肥については、原木の剥皮・貯木行程で発生する樹皮(パーク)を使用して堆肥が生産されている。パーク自体には規制値はないが、製品のパーク堆肥には規制値($400\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)があり、園芸資材として使用制限が懸念される中、販売が激減している状況にある⁽²⁾。

低～中間線量地域での林床の放射性降下物蓄積の特徴

今回放射性セシウムに汚染された腐葉土が生産・流通した背景について考えてみると、原発事故後に生産販売された腐葉土がその生産過程で放射性降下物に直接接触したか、また問題となった腐葉土の落葉採取地の林床での放射性降下物の蓄積実態が事故後に把握されないまま落葉採取が行われ、それが腐葉土生産に供された可能性が考えられる。そこで県内の落葉広葉樹林林床の放射能汚染実態を知るために、栃木県内の文科省放射線等分布マップ上で空間線量率が異なる場所3ヶ所【各調査地の空間線量 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$) はそれぞれ0.5-1.0 (高)、0.1-0.2 (中)、 <0.1 (低)、また $^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$ 合計沈着量 ($\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$) はそれぞれ100-300 (高)、30-60 (中)、 <10 (低)】を調査地に選んだ。原発事故後落ち葉かきが行われていない場所で林床土壌の落葉層 (A₀ 層)、表層土層【A層 (地下5cm以内)】および隣接するリタートラップで事故後 (2011年秋) に採取された落葉について、その空間放射線率 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$) をNaIシンチレーションサーベイメータで、リタートラップで採取した落葉、落葉層と表層土壌の放射性セシウムからの γ 線放射能濃度 ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (乾燥重量)) をオートウェルガンマカウンタで測定し比較した。その結果、1) 文科省放射線等分布マップは3調査地の空間線量、放射線核種沈着量をほぼ正確に反映していたこと、2) 放射性核種蓄積は現在A₀層に限られA層に及ぶのは少なかったが、中～高程度の空間線量率の2ヶ所ではA₀層の γ 線放射能濃度が腐葉土の暫定基準値 ($400\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) を大きく超えたこと、3) 2011年秋の落葉は放射性核種の蓄積が非常に少なくなっているものの、空間線量の高い地域では引き続き放射性核種を含む落葉が降下したことが明らかになった⁽³⁾。したがって、林床の除染は、環境省の除染ガイドライン⁽⁴⁾でも示されているように、事故当時落葉層 (A₀) に蓄積する有機物層をできるだけ速やかに除去することで大幅な改善を図ることが可能であるが、対象面積が広いこと (栃木の場合、国有林の約5割、民有林の

約4割が $0.2\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$ 以上の対象域に該当)、地形によりその蓄積程度に差があること、時間経過にともなう移動や流亡、若干の地下移動の可能性 (チェルノブイリの例⁽⁵⁾) 等を考慮すると実施上制約が大きい。

引用文献

- 1) 深町加津枝・柳幸広登・堀 靖人 (1995) 腐葉土の生産・流通構造と里山利用—栃木県を事例として—、日林誌 77(6):553-562.
- 2) 大久保達弘 (2012) 里山林の営みを取り戻すために—落ち葉利用の現状と林床除染に向けて—、森林技術 84(3):8-12.
- 3) 大久保達弘・逢沢峰昭・飯塚和也. (2012) 異なる空間線量地域における落葉樹林林床の放射性降下物の蓄積状況 (予報)、第123回日本森林学会大会学術講演集.
- 4) 環境省. (2012) 除染等の処置に係わるガイドライン (第2編) (第1版)、環境省
- 5) Smith, J.S., Beresford, N.A. (2012) Chernobyl, Catastrophe and Consequences. Springer. 310p.

基調講演3題、話題提供2題への会場からの質問 (口頭、アンケートによる) は以下の通りです。

I. 国内外の先行研究の紹介

基調講演1 (Sergiy Zibtsev氏) への質問 (図-11)

質問1: チェルノブイリ事故後25年経っても、森の中に放射性物質が、そのままエコシステム中で循環しているというお話でしたが、福島事故後、日本でもそれを覚悟しなければいけないのでしょうか?

回答1 (Zibtsev): チェルノブイリの場合とは、核種が違います。チェルノブイリの場合には、半減期がセシウムよりもっと長いプルトニウムとかストロンチウムがあるので、25年経っても状況がほとんど変わらない様な所がありますけれども、日本の場合にはその状況は若干いいだろうということです。また、初期のヨウ素による被ばくがありますがそれでも、それはかなり消えたので、人間に対する影響は低減するのではないのでしょうか。

質問2: それから、除染は日本ではかなり取り組んでいるが、チェルノブイリの場合はどうか?

回答2 (Zibtsev): ウクライナの場合には、人口の多い地域ではなかったという事と、また大事な農業地帯に関してはそれほどひどい汚染が事なかったというのが一つ良かった点で、ただ森林の除染に関しては、土壌にしろ、非常に重要な表層のリターにしろ、そういうものを動かすことは、森林生態系からどんどん汚染されたものを出すだけであって、反って



図-11 質問に答える Sergiy Zibtsev氏

手をつけない方がいいという管理戦略です。水に流出してしまうとか、系外に出してしまう方の危険性の方が非常に大きいだろうと考えて、高濃度汚染域に住んでいる人間は他の場所に移動してもらおうとか、森林における色々な活動を止めるという形で、とにかくその場で放射性物質を止めておいてくれるというのが森林の機能であると考えようという戦略を取っているということです。ただ、これは地形などの要因に強く左右されるので、日本にそのまま当てはまるものではないから、やはり、日本では別に考えなければならぬだろうということです。

質問3: 今のお話ですと、確かに放っておくのが良いという話なのですが、もうひとつには森林火災という問題があると思います。森林火災を止めるには、やはりある程度、木をマネジメントしていかないといけないという面にも直面する訳で、福島は森林火災が頻繁にあるわけではないが、やはり森林火災で再飛散するのが心配なので、そのあたり森林火災を避けるために、汚染地域をどうやってマネジメントするかをお知らせいただけますか？

回答3 (Zibtsev): 強制退去地域に関しては、400名の専任の担当者が、最低限の管理をするために、限られた時間のみ中に入りまた外に出るという形で、森林火災管理に関わっているということです。いったん破局的な火事が起こってしまうと、放射性物質が森林生態系外に出してしまう事になるので、それは守らなければならない。

次に水のことですが、やはり非常に重要なのは、水への流出なので、それを抑えることが大事です。そして、天然林がそのために持つ機能は非常に大きいのですが、以前は人工林がどこも多かったのですが、それをなるべく天然林の方へ持って行くことが重要だと考えているということです。健全な森が非常に重要だということです。

基調講演2 (吉田 聡氏) への質問

質問1: 私は栃木で林業をやっている者

です。今日先生の講演で聴いた事は私の身の回りで起きている事でございまして、本当に目に見えない敵と今戦っている状況でございます。

チェルノブイリと比べて我々の住んでいる環境は、雨量やその流出という部分で、去年何度もゲリラ豪雨で表土が相当失われている所もございまして。また台風も数度来まして。そういった点で、チェルノブイリの事例と、私共の目の前にある事例は、大きく違うのかなと感じられるのですが、今後我々の山の中に75%近いセシウムが、残っていくのかどうか、その辺をもう一度分かり易く説明して頂ければと思います。

回答1 (吉田): チェルノブイリの場合と日本の場合では、自然条件等がかなり違うのは確かだと思います。そのため流出していく量が異なる可能性はあって、現在沈着している量の何%くらいが残っていくかということに関しては、多少違いが出る可能性はあると思います。ただこれは現時点でどれくらい違うとは明確に言えなくて、恩田先生が森林から流出してくるものの量を見積もって評価され始めていますので、そのデータをまず見させて頂いて、今後継続的に評価していくということになると思います。ただし、基本的には、森林というのは入ってきたセシウムを外に出さない系だと私は考えていますので、入ってきたものが、半分どーっとどこかに出てしまうということか、そういうことはまず起こらなくて、やはり大部分はそこに残る、でも細かく見ると出る量に違いはある。特に下流に関して言えば、何も無い所に出てくれば、多少出方が違って、大きな違いになるわけなので、そういう意味では、受ける方向から見ればかなり違いが出る可能性はあるかも知れないですね。ただ、出す森林の側から見ると、基本的にはあまり外に出さない系というイメージは多分正しいのではないかと思います。

質問2: 福島から来ました。確かに割合として流出量は少ないかも知れないけれど、やはりマス (Mass) として、どれだけ外へ出てくるかがものすごく重要

で、そういう点では、福島県、例えば先程プレゼンに資料があったベクレルと、それから一番最初のプレゼンの時にもありましたマス、放射能でなくて、モルでもよいが、どのくらいの量が放射性セシウムとして沈着したかを考えれば、おっしゃるように割合としては分からないというのは全くその通りだと思います。けれども、その1%だけ流出するとか、極端な話10%が流出するとどうなるということは、素人でも簡単に計算できるので、是非その初期値の部分を見せて頂けるとありがたい。

回答2 (吉田): 今、正確な数字を憶えていないが、先ほどお話があったように、元々あるセシウムという元素の量に比べ、入ってきたセシウムの量というのは基本的に無視出来るくらい小さい。ただ放射性セシウムの沈着量が非常に大きい所に関して言うと、ざっと計算して数%くらいの寄与になる所があったと思います。なので、それくらいの元素の数のイメージだということになります。

質問3: 福島県全体に沈着したベクレルと、出来たらモルみたいなマスの量と両方教えて頂けるとありがたいのですが。

回答3 (吉田): 今、私はそのデータを持っていません。

II. 最新知見の紹介

基調講演3 (恩田 裕一氏) への質問

質問1: 林床の線量が下がっていたというデータの中で、分解によって減ったのではないかという考察をされたところがあったと思うのですが、微生物が分解菌だとすれば、微生物の体内に取りこまれて、量的には減らない様な印象もあるのですが、分解後にやはり流れ出したとか、先生のお考えを伺いたい。

回答1 (恩田): 結局、これはディテクターを近くに当てて地上10cmのカウント数を計っているの、地面深くに入ってしまうとカウント数が下がって来ます。あるプロファイルを仮定すると、総ベクレル量を出せるわけですが、そのために定期的に5mm間隔のスクレーピングをやっていることになります。現時点

と言える事は、上方からセシウムの供給があるのに、値（カウント数）が少なくなつたという事は、その放射線源が地表からかなり深く移動したと考察ができませんが、それ以上の事はまだ何も言えない。

質問2：浮遊土砂の濃度が高いのは、溪岸面とか、裸地面だとかに落ちたものがそのまま移行するから高いというイメージですか？

回答2（恩田）：結局、浮遊土砂の起源を調べることに同様に、その辺りは色々調べて来たわけですが、結局かなり大きな流域なので、一番の供給源は土壌侵食による河川への供給、その中で、農地、畑地、あとは水田です。水田の中で特に代かき時の濁水、これは非常に濃度が高い。森林では小流域を作ってしっかりと測ることをこれからやりたいと思うのですが、森林の場合どっちにしても浮遊砂濃度が圧倒的に少ないので、想定ですが、森林から大量の放射性物質が川の方に出てくるのは考え難い。ただ一方、雨に伴って、畑地から実際に出ていることがプロットを作って確認されているので、畑地や水田から土砂がかなり出ている、それがこの浮遊土砂の起源というのは今の時点でも言えると思っています。

質問3：先ほどの栃木で林業をやっている者です。ある程度伐採をしても蓄積して、十年後くらいに私どもの森林へも来ることを予想しています。その基準が決まっていないということで、そういう事にならない事を私は祈っておるのですけれども、もしそれを伐採してしまった場合に、我々はその更新を考えなければならない。しかし、その更新した樹木がまた同じ様な事を繰り返してしまったのでは、あまり意味がないと思うのですが、その場合、樹種を変えとか、色々考えていかなければならない。しかしそういった研究はまだないのかなと思うのですけれども、更新した樹木にどのように移行していくかについて、分かる範囲でお答えください。

回答3（恩田）：まず一般論だけで、多分詳細は次の金子先生からお話があると思いますが、勿論更新した樹木の移行係

数が少ないものを選ぶというのが一つの方策だと思うのですが、それ以前に大事な所は、単に伐採するだけではなくて、それと同時にリターの除去等をしっかり行えば、かなり量を減らすことが出来るというのは多分間違いない。9割とは言わないまでも、相当量を減らせると思います。その次の段階として、どういった種類がいいかというのが出てくるかと思うので、その辺りは、今森林総研で色々やられているかと思しますのでそれを見て頂ければと思います。

司会（田中）：大変重要な問題だと思うのですが、今すぐ答えは出ないかと思いますが、後程のディスカッションの中にそういう事に触れる事はあるかも知れないと思います。Zibitsevさんの最初のプレゼンの中で、その辺にも少し触れていたのですが、恩田先生の提案も一つのオプションとして勿論考えなければならぬ事なのかもしれませんが、やはり森林の系の中から落葉を取り去るという事が、生態系の中で持つ意味を考えると、それに関して慎重であるべきじゃないかという様な提言は先程 Zibitsev さんの方からもありました。色々なファクターが相互に必ずしもポジティブに働かないことがあるので、かなり気を付けて考えなければいけないのではないかと考えます。

回答3（恩田）：今の所で一言だけ言いたいのは、いずれにせよ汚染度によっても異なるし、今後の用途によっても異なるということで、ある場所に一つだけ解ではない。汚染度と用途と様々なマトリクスの中で一番ふさわしい解が出てくる。

話題提供1（金子真司氏）への質問

質問1：空間線量とスギの樹体、土壌中のセシウムの関係が比例関係にあるということについて、他の樹種マツとかコナラも同様の関係があるのでしょうか？それから比例定数の傾きも分かれば教えて頂きたい。

回答1（金子）：まだスギ以外の他の樹種については行っていませんので、推測になりますが、比例関係が出るのではな

いかと考えています。それから式の傾きについては、詳しく説明していませんでした。説明した図では対数目盛を使っています。3.1 マイクロシーベルト ($\mu\text{Sv} \cdot \text{hr}^{-1}$) から、次が 0.33 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{hr}^{-1}$) とすぐく間が空いています。それを埋めるために、今日は紹介しませんでした。1 マイクロシーベルト ($\mu\text{Sv} \cdot \text{hr}^{-1}$) の所でも追加で調査しています。そのデータがまだ全部出ていないですが、そのデータが揃えば直線関係や傾きについても述べることが出来ます。今後は傾きについても考えて行きたいと思っています。

質問2：スギ林等の土壌の種類を教えてください。

回答2（金子）：使った土は褐色森林土として、火山灰がある程度混じっていると思います。地質は、現地で見ただけでは砂岩系統が多かったと思います。地質・母材については今後確認したいと思っています。

質問3：除染の方法。リターの除去だけではなく、皆伐による除染というのは考えられないのでしょうか？

回答3（金子）：皆伐による除染の話をする前に、先ほどは除染の前提を詳しく説明していませんでした。森林の除染は生活者支援のためということを前提にしています。今地元を離れている方が帰還した時に生活出来るために、農地や宅地を除染しますが、すぐそばに山があると、そこから放射線が飛んできて放射線量が十分に下がりにません。そのために森林周辺から 20m 内側までを除染して放射線量を下げるといことです。現実的に可能な範囲で、リターをどう取ったらよいかと考えて出した値です。皆伐とか土を取るということも可能性としてあると話をしました。そこまでやればやっただけ線量は相当下がって行くと思います。そういうことも場合によって必要になっていくと思います。ただその際にリターなどの除去物を、持っていったその先できちんと処理できるようにしていかないとはいけません。処理のキャパシティもあるので、本当に必要な所はどこかと考えて除染していくことが望まし

いと個人的には思っています。

質問4：生産物の基準作りおよび見直しというのは、早急に行う必要があると思うのですが、今後のスケジュールがあれば教えて下さい。また、基準作りに向けて、学会レベルで提言していく必要と思うのですが、そのような動きはあるのでしょうか？

回答4（金子）：基準に関して言いますと、我々はデータを提供する立場にあり、最終的には行政側が決めることとなります。具体的なスケジュールについて聞いていません。生産地の地元からも基準を決めてほしいという話は聞きます。その辺の意見も汲んだうえで、学会でもしっかり取り組んでいくことが必要であると思います。

大久保：恩田さんの方から、基準作りについて、学会レベルで何かお考えがありますか？

恩田：基準については、基本的には放射線による影響という観点からになると思います。多分この学会に私自身を含めてそのような専門の方があまりいらっしゃらない、という事もあります。それを早急に作ることによって、いわゆる林業活

動に与える影響が大きいので、やはり基準の値の策定そのものに関わるというよりは、その際に放射線防護の人だけではなく、むしろ森林について分かっている人も基準策定に関わるというのが、重要かと思います。薪の様な低い値になってしまいますと、実際には、日本では薪が40(Bq·kg⁻¹)で、ロシアが1,400(Bq·kg⁻¹)で、それでロシアの薪は危険なのかということになります。また、先程のウクライナは1,500(Bq·kg⁻¹)ですので、その値は汚染されてしまった現状での最大限の安全性を踏まえた値にすべきかと思えます。

質問5：大玉地点で樹種によりセシウムの蓄積量に違いが見られた要因として考えられる事は何かありますか？それから、乾性沈着量の影響はあるのでしょうか？

回答5（金子）：先程の結果ですが、科学的には1林分だけの調査で樹種の違いを論じていいのかということがありますが、スギは葉っぱの量が多いので、乾性沈着をある程度沢山溜めたという可能性があるのではないかと考えています。ただ、事故当時に葉っぱがなかったコナラ

と比べて極端にスギで多くなっているという結果ではなかったもので、乾性沈着の寄与はさほど大きくないと考えています。

話題提供2（大久保達弘氏）への質問

質問1：落葉による腐葉土生産、有機米栽培は今後どのようにになると考えられるのでしょうか？

回答1（大久保）：腐葉土生産の方ですが、実際の対応は、栃木県庁の農政経営技術課で行われており、聞くところによれば、実際県内のかなりの業者が廃業になっているところも出て来ている。腐葉土生産を続ける場合も、西日本や輸入の落葉を持って来て、作っているという例もあると聞いています。

質問2：落ち葉掻きの除染をすべきではないか？来年では手遅れではないか？

回答2（大久保）：ホームページで見た例ですが、茨城県の農家グループなどでは、実際にやられているし、我々がプロジェクトを行っている所はまだ落ち葉掻きをやっていないのですが、毎年掻く様な所は、やはり早急にやってはどうかと地元の方と話をしています。

Ⅲ．パネル討論「森林生態系への放射能汚染影響研究とリスク管理の方向性」

パネリスト：吉田 聡、恩田裕一、金子真司 座長：大久保達弘
司会：田中 浩（図_12、13）

<研究成果の活用についての各パネリストからのコメント>

座長（大久保）：これまでの研究成果を今後どのように生かしたらよいかについて、パネリストの皆さんとフロアの方々の意見を交換しながら進めて行きたいと思えます。まず各パネリストから簡単にコメントをいただきたいと思えます。

恩田：私がまず強調したいのは、一口に放射能汚染と言っても、汚染レベルに非常に違いがある事です。その値が先程ご紹介しました航空モニタリングで、そこそこ正確に取れている、これを生かさなない手はなくて、そのデータが3月中旬

にダウンロードできるという話なのですが、多少遅れているようです。もうまもなく生データの形でダウンロード出来ますので、どなたでも簡単にその地点でのBq·m⁻²というのが取れるようになります。そうすると、面移行係数のような、ある程度従来の科学的知見にのっとった対策が打てるようになるという点が重要かと思えます。先ほどウクライナからご紹介があったように、汚染度に応じたゾーニングと使用用途に応じた対策というのが、マトリックスとして複数あるべきなので、それぞれの汚染度及び利用の形態によって、取り得る方策が違う。い

ずれにしても、森林総研さんのデータも空間線量ではなくて、Bq·m⁻²の上に乗せてグラフを描くと、他の場所でも汎用性が出て来ますので、そのような形でゾーニングと汚染度に応じた対策をすべ



図-12 会場の様子（パネル討論）



図-13 講演者パネリスト（左から恩田裕一氏、吉田聡氏、金子真司氏）

て行く時に、何をベースに考えるかという、まず汚染地図とかをベースにして考える、そのためには、それをベースにして何か予測できることが必要だと思います。そういう意味で、例えば、先ほど少しご紹介しましたが、移行係数とかあるいはその移行係数等を組み合わせた予測のモデルの様なもの、これは今一から作らなくてはいけない訳ではなく、ある程度これまでの蓄積がありますので、そこに今回出た恩田先生とか金子先生のような日本独自のデータを入れて行くことによって、より正確な予測が可能になってくる。そのようなことをしながら今後の対策を考えていく。その上で、これくらいの汚染度の所であれば、将来こういう形の事が予想できる、そこはこういう風に使っていきたいと思いますとか、こういう風に管理していきたいと思いますという形がおそらく出てくるのではないかと考えています。これまで蓄積されてきている移行に関するデータを初期値として使っていくことはできます。手法としてのモデルの様なもの、使えるものはあるので、その辺は十分利用していくべきだと思います。

あと、全く別の観点から言うと、森林に関わる色々な森林の産物とか、あるいは森林での活動も、やはりそこに人間の被ばく線量はしっかり評価していくことが、今後非常に重要になると思っています。現時点では例えば森林から採れ

るきのこがどこまでとか、水がどこまでとか、いわゆる規制という形での数値は勿論使われているけれども、森林はものすごく個人によって、関わり方が違う場所だと思うのです。そういう意味で、各個人それぞれというのはものすごく難しいと思うのですが、幾つか生活パターンなり利用パターンに応じた線量評価をちゃんとしていくということは重要かと思っています。

座長：以前ノルウェーのトナカイの例をお話いただきましたが、それをすこしお願いします。

吉田：これは規制の話になりますが、今後日本で色々な食品や木材も含めて規制値が出来てくると思います。その時に例えば食品に関しては、4月から少し厳しい方向に動くこととなります。ただ先ほどウクライナの話でご紹介もあった通り、国によっては、ちょっと違う考え方で規制を運用している所も実際にあると思います。個人的な見解ですが、将来は少し実情に即した合理的な方向を考えることも必要じゃないかと思っています。ノルウェーではトナカイを食べるということで、トナカイを自分たちで育ててトナカイを主に食べている人たちがいます。なおかつそのトナカイを国内で売って生活している。その時のそのトナカイの規制値ですが、一般の方がそのトナカイを食べる時には規制値が確か3,000ベクレル ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) くらいとかなり高いのです。これに対して、トナカイを育てている人が、そのトナカイを食べる時には確か600ベクレルくらいです。つまりより低い値に設定されている。トナカイを常に食べる人は沢山食べるので、より低い値に抑える必要がある。それ以外の一般の方は、トナカイを日本人よりは勿論食べるとは思いますが、それでも常に食べる訳ではないので基準値としてはもう少し高くてもいいだろうという発想です。こういうのは非常に合理的な考え方だと思うので将来は議論する価値があると個人的には思います。

座長：モニタリングの重要性、長い間のデータの蓄積が大事だと思うのですが、

「循環モニタリングのために、今現在計測出来なくても試料を採取して後に検証することで重要になると思う」というご意見が出されております。これまでに集められて測った資料がどのように管理されて、データベースとしてこれからどのような形で使われるかということについて吉田さんご存じの点がございましたら、お聞かせください。

吉田：非常に重要な点だと思います。結論から言うと、今完全に解決はされていなくて、正に議論している段階です。ご存じの通り、色々な機関の色々な方たちが色々な測定をしています。ものすごく沢山の資料が各現場等において、もしかしたら将来、違う人たちが違う観点で見ることによって、全然違う情報が得られるかもしれない、非常に重要な物になる可能性があります。そういう意味で、ただ単に各現場で散逸して訳が分からなくなってしまふのは、非常にもったいない。なので、全部が全部という訳にはいかないし、その必要もないと思うのですが、ある部分に関しては、ちゃんと管理しなければいけないというのは、かなりコンセンサスにはなってきた。ただ実際には、それを誰がどのように管理するかはなかなか決めきれていない。例えば先ほど恩田先生の方からご紹介があった大学の方たちが中心となって文科省の事業の下で、2千数百か所の土を実際に集めてそれを測ることをしました。その土が1個所で5個採っていますので2千数百×5もあります。それが今、大学の方に一時的に管理されている状態になっているけれども、そこに長いこと置いておくのは難しそうだということになって来て、ではどうしようかと今ちょっと議論が進んでいるところです。

今回のサンプルに関しては、特に皆さんが興味持たれるような試料であればあるほど、放射能の値が高いので、その辺も注意する必要があります。なおかつそれに関して明確な法的な措置が現在あるかという、それも無いので、その辺が非常に曖昧な状態になってしまっており、まだ最終的に結論まで出せていないという

のが私の見解です。

座長：金子さんの方から、研究成果をどう生かすかということで、コメントありましたらお願いします。

金子：研究成果を生かすということで、恩田先生の方からホームページ等で早く提供するというのもありまして、それは重要なことだと思います。それとやはり私たちも例えば今回の事故が起きて、福島の方と私たちとの昨日の集会の中でも出たのですけれど、実際現地の方にどういう風に科学的な事実が伝わっているか、そういうところがよく分からない。その事実を知っていた上で、色々これから行政側に望む事とか、自分たちでやっていく事を決める様になっているのかどうか、そういうこともあります。実際、除染の話でもどういう事をすべきかを皆で情報をしっかり分かち合った上で進めていきたい、そうしていくべきだと思っています。

<会場からの意見を交えた全般討論>

座長：少しご意見・コメント等、フロアの方から頂きたいのですが、いかがでしょうか。

発言者 A：チェルノブイリの研究で昔から取っているサンプルはどうしているのか。

吉田：ずっとチェルノブイリから取ってきたサンプルを持っています。それは土がありますので、農水の輸入禁止品の輸入許可を取って輸入するわけですが、放射能があるので、他とは区別して管理しています。

Zibtsev：サンプルについては、排除ゾーンの中に特別な施設を作って、その中に階層的に保管している。特に1986年以降、非常に高い線量のところについては一番底のほうから順に置いていく。それから定期的にチェックしながら、現在も保管し続けている。

発言者 B：森林の除染はすごく効果があると聞いたのですが、森林の所有者は、それこそ何十町歩もあるわけだが、たとえば除染の効果があるからといってすごい労力をかけて除染しても、それを持って

いく場所がないわけで、敷地内に置かなくてはいけない。それまでの苦勞をしてやる効果があるのでしょうか？それから、表層から豊かな土を掘って、森林の生態系が維持されるのか、たとえば全部きれいに取ってしまうと、大雨の時の土砂の流出とか、豊かな栄養物とか流れやすくなる、そういうことが考えられるので、とても現実的ではないと思うのですが、どうでしょうか？またすごく私に気になるのは、除染がいいといってもとても個人的にはできないので、それがゼネコンなどの金儲けの手段になるととても困ったものです。チェルノブイリは長い26年間の蓄積というものがあるでしょうけど、それで参考になるようなことがあればお願いします。

座長：その除染の問題について、恩田さんコメントありましたらお願いします。

恩田：結局、目的と望みうる森林の将来に関わる話だと思います。我々としてはまず客観的なデータを出して、そのチョイスをして頂く。もちろん葉っぱを取った後、何もしなければ大変なことになるので、ウッドチップなり土砂が流れない対策をする必要はあります。問題は森林をどうしたいかということです。その目的に応じてそこはそのままでもいい、その林産物も使わなければ、木も取らなければ、自然のままでもいい。それほど線量が高くなければ、野生動物がむしろ育つというのもあるので、そういうことを望むのであればそういうことでもいい。たとえば将来的に一番問題になるのは、低レベルでも大久保先生のやられているような落ち葉を取ってそれを田んぼに持っていく場合、落ち葉に入る放射性セシウムの量を下げするためには、一旦全部伐ってやらなければいけないようなケースもあり得る。それはいわゆる、汚染度の状況とその林をどう使いたいのか、それによって色々変わってくると思います。

吉田：森林生態系への影響ということで、さっきウクライナの報告の中でも、有機物層が非常に重要なので、そこを取るのはいやめ方がいいという話が

ありました。あと、北欧の研究者と話すと、絶対有機物層はどかすなという言い方をします。つまりそこが一番大事なので、それをどかすと森林そのものが破壊されてしまって、何の為にやるのか分からなくなってしまうという言い方をします。ですから、そこは非常に気をつけなくてはならない。ただ一方で、大久保先生などの取組みで分かるように、日本にはこの気候に合わせて毎年落ち葉を掻いている様な、使い方をしている森も一方である訳です。その辺をうまく使っていけば、日本独自のやり方を作って行けるのではないかと考えています。

発言者 B：特にスギとかヒノキとかは、建築材料として使う場合、森林は60、70年、2代か3代かからないと育たない、放射能に関してもそういった長いスパンで考えた方がいいと思うが、いかがか？

金子：個人的にも長い観点で取り組む必要があると思っています。そういう点で、今年調査してまた来年も同じ調査をする、それで本当に海外での予測と同じ形で、吸収していくのかどうかということ、ちゃんと見る必要があるし、その伐った材をやはり売れるようにしていかないといけない。生産しても売れないと困る訳です。その辺の対策もしっかり立てた上で、何をすべきかを考えなくてはならないので、今の段階で急いでこれをしたほうがいいのかというのは、なかなか言える状況にはないと思います。積極的な提案は出来ないけれども、じっくり取り組んでいってどうすべきかを科学的なデータを交えた上で、考えていく必要があると考えています。

発言者 C：現在、里山で子供たちに昆虫の観察会などをやっているが、私たちは子供たちを本当に今の里山に入れていいものかどうか？

座長：落ち葉を堆肥に使用した場合の基準は400 Bq・kg⁻¹に決まっているけれども、例えばそれに接触したり、落ち葉を子供たちに遊ばせたときの基準はありません。どんな形で接触するかという様なところを、今後人と森との関わりという中で、少しずつ解決していかなければい

けない。だから、今のところは控えるというか、直接触れないようにといった注意はお話したことがあります。

発言者C:平地林を今、皆伐再生しております、植生も豊かになってきたものですから、あまり表面を削り取るようなことは出来るだけしたくない、出来れば落ち葉さらいくらいでどれくらい線量が下がるのか、その辺の所を聞きたいです。

座長:宇都宮で地表を測りますと低い。落ち葉を掻いた後はさらに低い状態です。森林総研の報告中の大玉村の落葉広葉樹林の例でもそのような結果だったかと思えます。

金子:先ほど恩田先生が各地にどれくらいセシウムがたまっているか、ちゃんと測った方がいいという話がありましたけど、最終的にそれをやるべきだと思うのですけれど、非常に場所が広くて、全部の細かい、自分が持っているこの山はという形で測るのは難しい。空間線量率の方は比較的安い機械で測れるので、ある程度推定する方法があると個人的には考えています。ただ場所ごとの土は測ってみたいと分からないのが現状です。大まかに言えば、文部科学省の地図が出てきましたが、あれでもって大体その近くに行けば、その値が出ていて、そんなにはずれていない。ですからあの値を見て、自分たちの所にある例えばセシウムの量も大体わかりますし、空間線量率も大体分かります。ただ細かく言うところとちょっとずれる所もあるので、細かい所になればもうちょっと慎重に調べなくてはならないが、おおよそあの基準でいいのではないかと考えています。

発言者D:この被災地、放射能の中で林業をやっている者の一人として、本日の先生方のお話を聞いた自分の中のまとめなのですが、まず、表土の中の有機層はまず削らない方がいいということ。そして、表面に落ちてきたいろんな葉っぱを、サイクルを起こさせないために可能な限り林地から取り除くような努力が

必要なのではないかということが、まずひとつ私の中で掴めたという気がしました。それがどこまで効果があるかは、まだ掴めていないかもしれませんが、その中でアクションすることではないかと思いました。それと、やがて来るべきであろうスギやヒノキの中の蓄積に備えて、計画内での可能な限りの皆伐施業考えて、更新も考え、なおかつ新しい樹種も考えて、放射能との共生、悲しいですが、そういった道を歩まなければならないのかなと考えました。

ここで、先生方そして行政の方々にお願いなのですが、今後も先生方の研究をすすめて、サンプル数をもっと増やして頂き、多種多様な状況に応じて、我々がどのような方向に進んだらいいかという指針や政策を広められるべく、データ等を、今後もこのような場を設けて頂き、我々に提示して頂ければ、今後どのように施業を進めていくか、ひとつの目標となると思えます。感想と要望を述べさせていただきます。

座長:どうもありがとうございました。今日は研究者を中心に、国内外の先行研究の紹介、最新研究の紹介について話を進めてまいりました。この中で長期モニタリングの重要性、それに基づいたきめ細かな対応が今後求められるという点が示されたのではないかなと思っております。何はともあれ、これから長い付き合いとなり、じっくり取り組む姿勢と対応、また、我々研究者も含めて皆さん方と、情報の共有を進めていかなければならないと感じた次第です。

恩田:「じっくり」も大事なのですが、「急いで」も大事です。ここはやはり、ゆっくりやっていたら、今なら、早いうちなら落ち葉の表面だけ取れば良くて、生態系への影響が最小限に済むのですけれども、じっくり考えて「さあ、やろう」と言った時には、もうちょっと深く入って、生態系への影響がより大きくなってしまふ。ですからじっくりも大事なので

すが、早くも大事という両面を考えていかななくてはならない。

座長:最後に Zibstev さんから一言お話しただいて終わりたいと思います。

Zibstev:今日は色々といいディスカッションを聞かせてもらい、すごく刺激を受けました。元々身近に放射線はあるので、今回の出来事は追加的だということを考えてほうがよいと思います。例えばよく言われるのが、チェルノブイリ事故後そこへ帰還し住んでいる人の被ばく量が年間3ミリシーベルト ($mSv \cdot yr^{-1}$) ぐらいで、東京~キエフ間のフライト1回で受ける被ばく量と同じです。これから放射線と付き合いをいかなければならないので、まずはこのように冷静に見てはどうだろうか。私の発表で最も強調したかったのは被ばく量で、汚染森林であっても森林と被ばく量の関係は大きく変化する。たとえば30年後に伐採した木材が大丈夫でも、その後30年で増えることもある。われわれは生活の中で放射線利用についての真実を知らない。化学汚染物質や遺伝子組み換え作物など放射線以外に人へのリスクとなるものも多いので気にしすぎることはよくない。

田中:私たちは、これから放射能汚染と長く付き合いをいかにするをえませんが、先ほどの恩田先生の「すぐに考えなければいけないこと」はまさしくその通りだと思うのですが、「長く考えなければいけないこと」という側面も重要です。今日は、結論が出たのではなく、いっぱいもらった宿題を皆さんも持ち帰らなくてはならないし、森林学会も持ち帰らなくてはならないのでしょうか。これからの放射能汚染の問題との長い付き合いの中でどう対応していくか、今日はスタート地点のよい確認になったのではないかと思います。

座長:ありがとうございました。今後ともこのような場が設けられ意見が交わされることを期待してパネル討論を終わりたいと思います。

森の休憩室 II 樹とともに その 13

暑い、寒い、濡れる

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)



私が雨天時に着るカッパの左胸には、イルカのマークが付いています。漁業を営む人たち向けに作られたゴム生地のもので、通気性ゼロと引き換えに防水性が抜群に強いのが特徴です。結構重いのですが、少しぐらい枝が引っかかっても破れることがないほど丈夫。台風の中、工事用のヘルメットとそれを身に着けて、私は黙々と現場に出ます。激しく打ちつける豪雨、夏であっても急激に体温を奪われるその場は全身をもって大きなエネルギーを体験でき、私に自然の強さと生き物の弱さについて問いかけてきます。

空の下が現場の外仕事は、四季の移り変わりを見ながら過ごせるところに大きな魅力があります。晴れ渡ったすがすがしい青、そよ風になびく葉っぱの緑、そこかしこに咲く花の鮮やかな赤や黄色、日々刻々と変わる景色に飽きることがありません。しかし、仕事の現実はとても過酷なものです。夏は逃げ場のない日差しの中でジリジリ焼かれ、服を絞れば滴るほどの汗をかきます。冬は指先がかじかんで動かず、雨や雪が降れば襟や裾が濡れ、カッパを着ての重労働では内側がしっかり蒸れる。すがすがしいとか気持ちの良い日なんてものは、はたして一年のうちどれくらいあるのでしょうか。四季の中で仕事をするとするのは、我々を取り巻く自然に耐えて働くということであり、その場に立つだけで大きな疲労を伴う過酷な肉体労働なのです。正直なところ、よく今日を乗り切れたなと思う日が年に何日もあります。疲労蓄積で体調を崩すこともたびたびです。でも私は外仕事を止めることができない。以前勤務していた造園会社の親方の一人が言いました。「一度外仕事を覚えた人間は、もう外仕事しかできない」。おそらく、この言葉が呪文のようにまわり付いているのです。私は自分を、「外仕事を覚えてしまった人間」、そう、自然界と何か心や体の一部が繋がってしまった変な人間だと思っているのです。

私の毎日は常に植物と共にありますが、彼らはそこにただいるのではなく、私以上に四季に翻弄されているのがわかります。頭がしびれるほど暑い日には、呼吸にあえぐ植物達が目の前にあるのです。強く打ち付ける雨に

は、大量の葉や咲いたばかりの花を落とす樹木があり、大風が吹けば枝をバラバラと落とします。寒い日には霜が地面の土を持ち上げ、根が浮いてしまうこともあります。そしてすがすがしい春には、気持ちよさそうに花びらをなびかせ、桜などは青空を桃色に染め、毎年同じように私の心は躍ります。そしてふとした瞬間に、「何か」と「何か」を共有したような感覚に囚われます。私にとって外仕事とは「暑い、寒い、濡れる」という不快極まりないものですが、実際に自然界は「暑く、寒く、濡れる」ものなのです。そして、私達人間も他の生命と同じ環境に身を置く者なのです。親方が言った「外仕事を覚える」とは、そのことに気づき、さらに他に代えがたいほどに楽しめる何かを体得してしまうことではないでしょうか。農林業や他にもいろいろな外仕事がありますが、きっと私の場合は植物、特に樹木に対して、自分自身も気づいていない何かを得てしまったのでしょう。

そんなネイチャーフィーリング的なことを言っても、実はそれほど頑丈にできていない私の体に自然の力は大きすぎます。全身を雨に打たれるにしても、通気性を求めたヤッケの類では心もとなく、時に濡れ、体温を奪われます。造園会社に勤めていた16年前に、そのことが身にしみた私が望みを託したのが、冒頭に紹介したゴム生地できたイルカマークのカッパです。それを着てようやく、雨に思う存分打たれるようになったのです。ですから、あまり強くお勧めはできないのですが、弱い雨の時だけでもあえて傘をさすのをやめてカッパで外歩きはいかがでしょうか。それが数千円のものならば、頭にかぶるのは付属のフードではなく、防水を施した帽子の方がたぶん快適です。合わせて襟元内側にタオルを巻きましょう。そして「雨に唄えば」を口ずさんだらばもう完璧です。

.....
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士課程修了。新潟市のらう造景(旧後藤造園)に入社、後藤雄行氏に師事する。現在は筑波実験植物園の技能補佐員。屋外エリアの管理と教育普及に携わる。樹木医、森林インストラクター。

「森林学の過去・現在・未来」(4)

Stay Hungry. Stay Foolish.

篠原 健司

(しのはら けんじ、森林総合研究所)

この表題はアップル社の共同設立者の一人であるスティーブ・ジョブズが残した、スタンフォード大学卒業式での祝賀スピーチの一節である。彼は「The Whole Earth Catalogue」最終号の背表紙から引用したと説明しているが、昨年故人となった天才が残した名言の一つとして知られている。アメリカに滞在していた頃、友人に勧められてMacintosh 512Kを購入したが、当時は彼の名前を全く把握していなかった。お恥ずかしい話である。

私は学位取得後、早稲田大学、イリノイ大学、名古屋大学を経て森林総合研究所へ入所した。入所前は、光合成の電子伝達反応に共役した光リン酸化の反応様式や光リン酸化反応を触媒する酵素の生化学的特性、光合成関連遺伝子の発現調節機構、葉緑体タンパク質の生合成機構や葉緑体包膜を介したタンパク質の移送機構の解明に関する研究に従事していた。入所後は、遺伝子発現に着目して、裸子植物の光合成関連遺伝子の発現調節機構、樹木の生殖器官の発達や環境適応機構の解明に携わってきた。また、遺伝子組換え技術を用いた新機能の付与に関する研究も進めてきた。最近では、理化学研究所と共同研究を進め、ポプラやスギの発現遺伝子の大規模収集し、それらの機能を解析してきた。入所して25年になるが、自ら実験結果を出したのは実質数年で、多くの研究成果は若い研究職員が生み出したものである。

現在、森林総合研究所第3期中期計画の重点課題「森林遺伝資源を活用した生物機能の解明と利用技術の開発」の研究管理を任されている。こうした研究分野では、収集した森林生物のゲノム情報をどのような研究に活用するかが重要なポイントとなる。大量の遺伝子情報を使って、野生植物である樹木の生命現象を明らかにすることも可能である。また、遺伝子組換え技術を使って、ストレス耐性、高バイオマス生産性や不稔性を付与した遺伝子組換え樹木の開発にも利用できる。さらに、有用な遺伝形質と連鎖するDNAマーカーの開発にも活用でき、優良個体の早期選抜が可能となり、育種の高速化に貢献できると考えている。

森林総合研究所では、著名な研究者達と知り合うことができた。特に、佐々木恵彦さんや中静透さんは好奇心

旺盛で、どのような研究テーマに直面しても大局観を忘れない方々であった。最近、平英彰さんの書かれた「スギ巨木物語—天然林の奇跡—」を読んでみた。

この本では、ヒトよりも遙かに寿命の長いスギの魅力を紹介している。そして、スギのルーツについて豊富なデータに基づく推論を展開し、著者の力強い信念が読み取れる。私はこうした本が書けるだけの研究成果を生み出したであろうか？残念ながら、私には大局観がなく、せいぜい書いても「樹木の分子生物学とバイオテクノロジー」や「スギ花粉症」に関する研究の一端を紹介することしかできない。

私は後数年で現役を退くことになる。これまでに大学に移らないかとお誘いを何度も受けてきたが、現在も森林総合研究所に在籍している。先日、PLANT & ANIMAL SCIENCEの分野で、論文の被引用数ランキングで世界1位になった知人から、「一つの組織に長期間在籍し安定した生活を送っていると、緊張感に欠け、いい研究はできない」と言われてしまい、「Stay hungry. Stay foolish.」という言葉思い出したのである。現在の日本は、優秀であっても定職に就くことが困難で、未来を担う若手研究者には受難の時代である。森林科学分野では、海外でポストドク生活をおくる若手研究者はまだまだ少ない。若手研究者には「Stay hungry. Stay foolish.」に研究生活を送り、多くの経験を積んでほしいものである。そして、世界的な森林減少を食い止め、日本の森林・林業の再生に貢献されることを期待したい。

(専門分野：植物生理学・生化学、分子生物学)

文 献

平 英彰 (2011) 「スギ巨木物語—天然林の奇跡—」(株) 日本林業調査会、121 ページ。



オフィスでのひととき

森林政策策定のあり方を考える

遠藤 日雄

(えんどう くさお、鹿児島大学農学部)

林業基本法が制定(1964年)されて再来年で50年がたつ。この半世紀で最も大きな変化といえ、2009年8月の衆議院総選挙で、長期にわたって政権の座を占めていた自民党が大敗し、これに代わって民主党が政権を握ったことであろう。民主主義下における政権交代は、国民の「紙と鉛筆による革命」であるから、これによって政策が大きく転換することは当然のことである。問題はその政策策定手法である。周知のように、民主党がとった手法は官僚を徹底的に排除するという「政治主導」であった。

かつて林野庁林政部長(後に水産庁長官)の要職にあった佐竹五六氏は、自身の官僚経験をもとに、政策とは望ましい方向に現実を誘導するための手法の体系化と実施スケジュールに関するプログラムのことと述べている(佐竹五六『政策論の作法—政策は如何に策定されるべきか—』、創造書房、1999年)。この指摘自体に大方異論はないはずだ。問題はこのスケジュールなりプログラムに官僚がどのようにかかわるかである。佐竹氏は、官僚がここに積極的に関与してこそ政策策定が可能になると力説している。その根拠は官僚の専門家(プロフェSSIONナル)としての能力の高さである。この官僚が、政策実現のための法定手続きをクリアするとともに、社会的コンセンサスが成立する可能性のある複数以上の政策案を策定し、決定権者である素人の政治家集団に提示するのが政策策定の基本という考え方である。そして佐竹氏は、アマチュアによる放談にはプロからは生じない新鮮な発想が期待できるとしても、それを政策案として形を整え、必要な手続きをクリアするためにはプロとしての官僚の役割が必要であると強調している。

じつはこれが、自民党政権時代の政策決定の基本的な仕組みであった。基本法林政半世紀で策定された森林政策の大部分が林野官僚の手でなされたものである。こうした政策策定手法は、官僚任せ、あるいは官僚への丸投げといってよい。しかしそれでは、政治家にそれができるのかといえ、ノーである。政治家集団が素人であることは、いいとか悪いとかの次元の問題ではなく、当たり前のことだからである。たしかに自民党の一党優位体制の中で、政党と官僚の重複領域にある種の胡散臭さがつ



ボラテック(株) 北大路康信常務取締役から新本社ビル(ウッドスクエア:埼玉県越谷市)の説明を聞く筆者(左)

きまっていたことは否めない。しかし素人の政治家集団に政策策定を求めること自体が無理な相談だったのである。

ところが今回の政権交代に伴って、民主党は「政治主導」を標榜しながら徹底した官僚排除で政策策定を行った。森林政策も例外ではない。「森林・林業再生プラン」がそれである。私は、同プランに対して、基本法林政という木に、竹を接いだような違和感を禁じ得ない。それはなぜだろうか。たぶん、基本法林政の当否は別として、林野官僚が半世紀にわたってその高い専門性のうえに連綿として築き上げてきた政策を批判的に総括せずに、佐竹氏の言葉を拝借すれば「アマチュアによる放談」から生まれてきた側面が強いからだと思う(その最たるものが日本型フォレスト制度)。それが、戦後半世紀の基本法林政に馴染んできた森林・林業関係者の目に新鮮に映るだけのことである。民主党の「政治主導」がいいのか、自民党時代の政策策定手法がベターなのか、少なくとも「再生プラン」についてはそう遠くない時期にその答えが出そうである。

(専門:森林政策学)

森について学び続け、経験に基づいた知識を蓄え、それを活かす

田中 和博

(たなか かずひろ、京都府立大学大学院生命環境科学研究科)

森林学を、一般の学問のように、体系的に組織化された知識や方法と捉えることには少し違和感がある。もちろん、そうした考え方や手法が含まれていてもよいのであるが、それだけではないという強い思いがある。現実として様々な森林があり、地球の長い歴史の中でそれぞれの森林は変容しながらも世代を超えて受け継がれてきた。人間の寿命をはるかに超える非常に長い年月にわたって存在してきたし、これからも存在し続けて欲しいと願う。そうした森林の存在や営みを、合理的な精神でもって「学」として体系化しようとしていること自体に、人間の傲慢さを感じてしまう。そもそも合理的な精神とは何なのか、それは本当に合理的なのかについて、研究者は謙虚に自問する必要があるだろう。2011年の原発事故の時に「想定外」という言葉が多用されたが、頭の中だけで考えることの危険性を思い知らされた気がする。しかも、過去の津波などの災害記録がほとんど活かされていないかたというのではないか……。

自分では制御できないものは環境と呼ばれる。そして、自然環境の代表とも言うべき存在が森林である。したがって、森林を人間が事細かに制御することは到底無理である。環境を扱う分野では経験は大変に重要であるに違いない。しかし、生活者や熟練者の経験知や経験則を軽視してきたのが20世紀以降だったのではないだろうか。森林学では経験に基づく知識が重要であり、それをどのように取り入れていくかが今後の課題である。

最近の科学は、森林学も含めて、個々の専門領域では非常に進歩したが、総合的に全体を捉えることに対しては、むしろ停滞しているように感ずる。部分の研究や部分の最適化ばかりを追い求め、結果として全体像がつかめなくなっているのが現状ではないだろうか。今日の環境問題の多くは、経済問題と表裏一体の関係にある。経済的な価値観や評価結果が、政策にも影響を及ぼしている。森林・林業再生プランにしても、現在は、林業地として採算があう区域に関心が集中しているが、今後、本当に問題になるのは、不採算な人工林をどのように自立した森林に誘導していけるかであろう。その方がコストが多くかかると思われるが、現状では深く議論されていない。市場経済のもとでは私企業は儲からない部門から



タワーに登ってご機嫌の笑顔(2003年9月、金沢大学の角間の森にて)

撤退することはできるが、行政や地域住民にとっては撤退されてしまった跡地をどうするかという問題が残る。このように市場経済の考え方で最適化を図ったり、帳簿の帳尻あわせをしようとすれば、そのしわ寄せは必ず社会的弱者に現れ、全体にも影響する。

地球の環境保全に真剣に取り組むとするなら、その地域に住み続ける人の視点に立つことが重要である。ゲーリー・シュナイダーが提唱するリインハビテーションの考え方である。利益を求めてより有利な土地へ移動していくような資本主義的な行動様式や考え方では、森林を守ることはできない。人間活動の対極にあるものの一つが森林の営みである。人間活動は経済的価値観の影響を受けるが、森の営みは自然の摂理に従う。森林研究に携わるものは、物言わぬ森林の代弁者であり続けて欲しい。経験を積むということは、現実を直視して、それを受け入れることから始まる。中山間地域では、過疎化と高齢化のため、現場で培われた経験が消失しようとしている。そうした経験をGIS(地理情報システム)等の現代の技術によって知的財産としてデジタル化し、後世に伝えていくことも必要なことであると思っている。森林学とは森林について学び続けるとともに、経験に基づく知識を継承し、自然との関係を問い続けるものなのかもしれない。

(専門:森林計画学)

ゲリラとしての森林学

小島 克己

(こじま かつみ、東京大学アジア生物資源環境研究センター)

およそ独立した学問分野であれば独自の的方法論がある。林学という学問分野は、林業・森林管理のための学問分野として、明治期にドイツなどから方法を移入しながら確立された確固とした方法論に基づいていた。古い方法にいつまでも依らずに、新しい方法を検証しつつ進んで取り入れていくことが学問分野の進歩に必要である。しかし、林学が森林学になったときに方法論の検証は行われたのだろうか？単に林業学と勘違いされないように林学という名前を捨てた、のではないと言えるのだろうか？名前を変えたことで安心し、本来の学問分野の進歩、発展のための新しい方法の導入やそれを森林学として総合化、体系化してゆく試みを怠ってはいないだろうか？つまり、森林学的方法論はあるのだろうか？

10年以上前、東京大学農学部林学科の若手教員（当時）が集まって、林学科（既に林学科ではなかったかもしれない）の教育改革のために、林学を構成する各分野の方法について話し合ったことがある。この時に、このフォーラムの企画責任者でもある井上真さんが、森林社会学は総合格闘技である、と言っていたのが印象に残っている。もちろん彼は、森林社会学者はタフでなければならないと言っていたのではなく、様々な方法を駆使し、総合化し、研究成果を得る学問分野が森林社会学であると言っていたのだと思う。この話し合いの結果がどのようにまとめられたのか、どのような改革につながったのか、当時の資料が見つからず確認できないのが残念だが、「林学は、森林に関する総合的、学際的な研究を行う学問分野である」という共通理解に至ったのだろうと思う。

私は東京大学文学部宗教学宗教史学科を卒業している。宗教学は、哲学、社会学、心理学、人類学、民俗学、歴史学、考古学など多様な方法を用いて宗教現象を研究する学問分野なのであるが、これを宗教に関する学際的な研究を行う分野と言うこともできる。つまり、宗教学も林学と同様、多様な方法を含みながら、(宗教や森林といった)対象によって規定される性質が強い学問分野であると言える。「学際」については多様な方法と言うことで良いかもしれないが、「総合」についてはどうだろう。宗教学も林学も関連諸学の方法を援用しつつ対象に応じた独自の的方法論を構築してきた。社会学と宗教社会学の方法は異なる（これについてこ

こで述べる紙面がない)。社会学者による森林地域の社会研究と林学者による森林地域の社会研究は異なるし、植物学者による樹木生理学研究と林



Melaleuca cajuputi 人工林の現存量（葉むしり）調査（一番右が筆者。2010年3月、タイ・ナコンシタマラート県）

学者による樹木生理学研究は異なるはずである。林学がこのように独自の的方法論を持った総合科学であるのは、個々の林学者が林学を構成する他分野の方法を理解し、またそれを自らの専門分野でも使うことができるからであろう。生半可かもしれないが、林学もいわば総合格闘技であった。

宗教学研究の恩師である柳川啓一教授は、宗教学はゲリラであると言った。「他の学問があまり手を付けていない領域に、別にこれが宗教学と名のりもあげず、忍び込んだ上での奇襲攻撃が、われわれの本領ではなかったか。」「戦場に長く留まっていけない。社会学とか心理学とか其の他何々学という正規軍が到着して、(中略)うるさいことを言い出したらさっさと引き上げるべきである。何よりもわれわれの目標は、宗教に対する興味であって、一定の収穫があればそれで足りる。」(柳川 1987) われわれは古い林学の枠組みにとどまり、新しい方法の導入や総合化を怠ってきた。その反省が林学から森林学への転換であるならば、森林学は正規軍であることをやめ、ゲリラとして生きていこう。生半可でも良いから、一人一人が複数の方法を使いこなし、それぞれが新たな方法論を確立しよう。それぞれが他分野を理解する姿勢や力を失っていないければ、それらのいくつかが基礎となり、森林学の総合化ができるかもしれない。

(専門：造林学、樹木生理学)

参考文献

柳川啓一(1987) 異説 宗教学序論。(祭りと儀礼の宗教学。筑摩書房, pp.301) . 3-11.

水の森、インドネシア中部 カリマンタンの熱帯泥炭湿地林

斎藤 秀之

(さいとう ひでゆき、北海道大学大学院農学研究院)

かつて秘境だったジャングルがカリマンタン島（ボルネオ島）にあります。そこは「水の森」と呼ばれ、豊富な水と泥炭の土に樹木が育ち、珍しい動植物が生息していました（表紙の写真）。しかし開発行為によりジャングルは荒廃し、私達は森からの恩恵を失いました。その様な熱帯泥炭湿地林をここでは紹介します。

1. カリマンタン島と熱帯泥炭湿地林

カリマンタン島はインドネシア、マレーシア、ブルネオの3カ国からなり、赤道直下にある世界で3番目に大きな島です（日本の面積の約2倍；図-1）。ここには多様な動植物が生息しています。その理由として、海岸域から海拔4千メートルを超す高山帯までの幅広い気候帯があり、様々なタイプの生態系のあることが挙げられます。そして熱帯泥炭湿地林も多様な生態系の一つなのです。

熱帯泥炭湿地林とは文字通り泥炭土壤からなる湿地の熱帯林です。分布場所は海岸付近から淡水域の低湿地帯です（図-1）。平坦な地形で雨が多いため森には水が溜まります。1年の大半は土壌も植物の根も冠水します。その水はコーヒー色の酸性の水です（pH 4以下）。樹木が枯死した木質遺体は、水中の嫌気条件で腐朽が妨げられて

泥炭土壤となります。酸性の水は木質遺体のミネラル類を溶脱させ、土壌を貧栄養にします。

カリマンタンの泥炭湿地林に生育する樹木の種類は100種以上とも言われます。この種数は熱帯雨林の中では少ない方ですが日本の温帯林よりは多いです。熱帯雨林の高さは一般に80mにもなりますが、ここでは最高でも30～40m程度です。熱帯泥炭湿地の樹木はこの特有な環境条件に適応した性質を持っています。例えば、貧栄養の酸性土壌でも生育できる種や、水草のように湿地特有の大量の水で全身が沈水して空気に触れなくても数ヶ月の間は生き続けられる樹木もあります。熱帯泥炭湿地という環境条件が固有な種へと適応進化させたのでしよう。

2. 荒廃地への変貌

インドネシア中部カリマンタン州には、近年まで原生に近い泥炭湿地林が残っていました。しかし1990年代、国策の「メガライズ・プロジェクト」により、泥炭湿地林は大規模開発で失われて行きました（図-1、2）。当時のインドネシアでは人口問題と食糧問題を抱え、その解決策として広大な森林を開拓して100万ヘクタールの水田を作り（日本の米作付面積の約半分）、移住を促してジャ

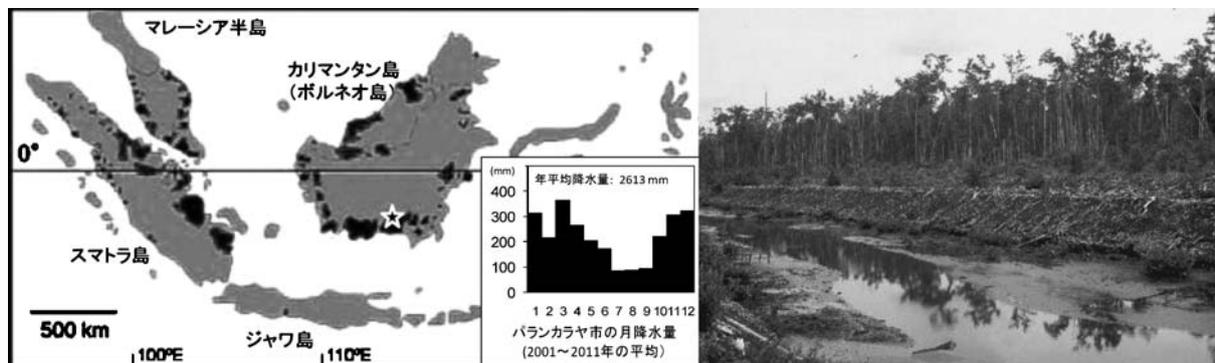


図-1 カリマンタン島（ボルネオ島）と熱帯泥炭湿地林
左：泥炭湿地の分布（黒色）と泥炭湿地林の大規模開発が実施されたパラカラヤ市（星印）。
右：用排水路の開削の結果、地下水位が低下した泥炭湿地林（2001年撮影）。

水の森、インドネシア中部カリマンタンの熱帯泥炭湿地林

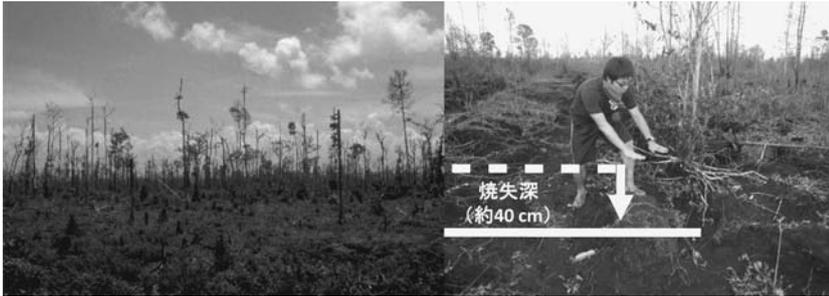


図-2 荒廃した熱帯泥炭湿地林
左：シダの優占する泥炭湿地林の火災跡地（1998年火災、2001年撮影）。
右：泥炭土壌の焼失で裸になった樹木の根。火災で深さ約40cmの泥炭土壌が焼失した（2009年撮影）。



図-3 森林再生の技術を開発するための現地試験地
左：*Shorea balangeran*（フタバガキ科の自生種）苗木の植栽試験。
右：適切な地拵え処理によりタネの直播で定着した *S. balangeran* の実生（共に2012年撮影）。

ツ島の人口密度緩和を狙ったのです。

そのために大規模な水路を開削し湿地の水を排水して、森林を伐採しました。しかし、開拓地は貧栄養の泥炭土壌のために農地に適さず、多くが放棄されました。農業で稼げない移民達は森林の違法伐採で生計をたて、残った森林をさらに劣化させました。そこに追い打ちをかけたのが野火です。排水で乾燥した泥炭土壌は燃え始めると消火が困難です（図-2）。とくにエルニーニョ現象で寡雨の年には、野火が地中火となって泥炭土壌を燃やし続け、樹木の再生力を奪いました。その結果、ジャングルだった熱帯泥炭湿地林はシダ植物が優占する群落へと不可逆的な遷移を引き起こし、荒廃地へと変貌したのです。

3. 生態系サービスの損失と水の森の復元に向けて

熱帯泥炭湿地林はこれまで人類に多大な恩恵（生態系サービス）を与えてくれました。しかし大規模開発によりわずか数十年でこの生態系サービス機能が失われたの

です。例えば炭素貯留機能の損失が挙げられます。1997年～98年のインドネシアの泥炭林火災で大気中に排出された総炭素量は、日本の2000年の年間総排出量の2.4～7.6倍に匹敵したといわれました。また水位の下がった泥炭土壌では、土壌層に空気が混入し泥炭土壌の微生物分解が進み、大量のCO₂が大気中に放出されます。当地は現在でも頻発する野火と泥炭土壌の微生物分解によって莫大なCO₂放出源となっているのです。

地球温暖化問題を背景に世界各国が温室効果ガスの排出削減に努力する中、熱帯泥炭湿地林の荒廃地化と火災に伴うCO₂放出量はあまりにも衝撃的な報告でした。インドネシア政府は2011年に自国の温室効果ガスの排出量が世界第3位であることを認め、その内訳として森林伐採や泥炭地火災などが70%以上を占めると説明しました。このようにして、残った熱帯泥炭湿地林の保全と荒廃泥炭湿地の森林再生は、世界共通の課題として認識されるようになったのです。

荒廃地を「水の森」へ復元するためには、復元技術や社会的な合意形成、費用などたくさんのハードルを乗り越えねばなりません。昔から豊かな森に住んだ泥炭湿地の人々には森を造り育てる文化や技術がありませんでした。荒廃地に植えて育つ樹木の種類を選び、その樹木のタネの採取方法から苗木の作り方、植えて育てる方法までを一貫して研究し（図-3）、体系だった技術を生み出さねばなりません。現在、有望な樹種を幾つか選抜することができました。しかし、多くの自生種は未だに検討できておらず、課題は山積です。森造りの技術の他にも水位を上げて湿地に戻すなど生態系全体を修復する技術が必要です。

熱帯泥炭湿地の樹木の性質や生態系のしくみを理解し、さらに現地の文化や社会事情に合わせて1つずつ問題を解決して「水の森」の復元を図らねばなりません。

参考文献

大崎 満・岩熊敏夫（2008）ボルネオー燃える大地から水の森へー岩波書店 p.159.

スコットランドの森 Culbin

上村 佳奈

(かみむら かな、森林総合研究所)

スコットランドの北の町インバネスから北東へ約40km行くと、北海の海岸沿いに『カルビン (Culbin) の森』がある(図-1)。この森は現在、英国森林局(Forestry Commission)が管理し、生態系から木材生産、レクリエーション、森林教育まで幅広く活用されている。元々は防砂林として植林された森であり、その活動は19世紀始めまでさかのぼる。そしてその歴史は英国林業の歩みともつながる。本稿ではカルビンでの植林の歴史と現在を紹介する。

カルビンの森の歴史

氷河期が終わり、氷に覆われていたカルビンの森周辺の地表が現れると、海岸や周辺の川からの砂が堆積しはじめた。その後5千年以上の時間をかけて、雑草木が砂を徐々に固定しこの土地を形作っていった。しかしカルビン周辺に人が居住を始めると燃料等に使用するため雑草木の採取が盛んに行われるようになった。次第にカルビンの砂を安定させていた雑草木が無くなり、17世紀中～後半になると砂嵐の被害が深刻になった。そして砂の流動が激しく堆積があまりに多いため家を捨てざるを得

なかった人々も出始めた。その当時の家々が、カルビンの森の地下部には今でも埋まっていると言われている。町は雑草木の採取を禁じたが砂害の軽減にはつながらなかった。19世紀になるとカルビンで植林が始まったが、枯れることが多く効果はほとんど見られなかった。さらに20世紀初頭に勃発した第1次世界大戦では、特に製鉄の燃料に使うために国中の森林が伐採され、カルビンもまた例外ではなかった。そしてむき出しになった砂地は再び人々の生活を脅かし始めた。戦後、英国の森林面積は国土の5%にまで減少し、事態を憂慮した政府は英国森林局を創設した。1922年に森林局はカルビン周辺を買い取り、植林活動を開始した。だが、第2次世界大戦勃発のため植林活動は中断し、本格的な再開は戦後になった。これはカルビンだけでなく、英国林業再生への出発でもあった。

1940年代後半に入ると、英国では土壌条件や気候、樹種選定、林業技術、育苗体制、風害、森林環境等の研究が多くなされ、造林・林業手法が変化していった。1980年代には木材の輸出が可能になり、2011年5月の時点で英国の森林面積は国土の約13%(約300万ha)に達した。



図-1 カルビンの森の位置



写真-1 カルビンの森の様子



写真-2 逆うらごけの状態になった Scots pine 背面の板の高さが木を掘り起こした際の地表部の高さ。

カルビンにおいても様々な研究や試みがなされた。例えば砂地に適した樹種を選定するため、日本カラマツ (*Larix kaempferi*) を含め様々な木が植えられたが、多くの樹種は根付くことができなかった。しかし今では在来種の Scots Pine (*Pinus sylvestris*) を中心に Corsican pine (*Pinus laricio*)、Shore Pine (*Pinus contorta*) や、ベリーを含め様々な植物、コケ類もみるようになった(写真-1)。現在カルビンでは防砂機能を維持しながら、木材生産や生態系保護、レクリエーションなどの多様な機能を見据えた森林管理がなされている。木材生産に関しては年間約 12,000 m³ の木材を供給しており、防砂・防風効果を調整しながら間伐と択伐を行っている。

カルビンの砂丘 (sand-dune)

カルビンの森には様々な砂丘が形成されているが、中でも最大なのが Lady Culbin Dunes である。この砂丘では 2m のポールが 6 週間で完全に砂に埋まるほどの砂の流動と堆積が過去に確認されている。この砂丘でも植林活動は行われ、その効果は砂の流動を止めるだけでなく、土壌中の水分の分布にも現れた。通常、Lady Culbin Dunes の地下水位は 2m よりも深い場所にあるとされる。立木がない場所では雨が降ると土壌中の水分が時間の経過と共に単純に下降していくが、立木があるとリターに水分が残留するほか、深さ 40 ~ 50 cm 部分にも水分が残る。このため、砂丘に生息する植物にとっても水分を確保しやすくなっている。だが、このような効果が現れるにはかなりの時間がかかった。それは植林

してもすぐには砂の流動が止まらなかったためである。現在の Lady Culbin Dunes には Scots Pine 等が植えられているが、その樹高の半分は砂に埋まっている。それらの木は根元にいくほど細くなるという逆うらごけ (reversed taper) という不思議な形状になっている(写真-2)。これは木が成長していく過程で砂に埋まるということを繰り返したため、砂に埋まっていない部分が太くなった結果このような形になったと考えられる。

カルビンの森にはこのほか、海鳥を含めた動植物の保全活動、乗馬やサイクリングなどの機会を提供するなど、防砂林だけに留まらない様々な森林管理が行われており、是非一度は訪れていただきたい森である。余談であるが、筆者が 10 月にカルビンの森を訪問した際、突然吹雪になり非常に寒い思いをした。スコットランドを訪れるときは防寒にご注意を。

文 献

- Forestry Commission, Welcome to Culbin (『カルビンの森』の紹介 HP) <http://www.forestry.gov.uk/forestry/infd-76pr9z>
- Malcom D.C. (1997) The silvicultural of conifers in Great Britain. *Forestry* 70(4): 293-307
- Ovington, J.D. (1950) The afforestation of the Culbin sands. *Journal of Ecology* 38(2): 303-319

年輪から読む樹木・森林・環境のうごき —樹木年輪年代学の応用—

安江 恒

(やすえ こう)

(信州大学 農学部 森林科学科)

シリーズ
うごく森 **18**

1. はじめに

森林を構成する主要要素である樹木は様々な環境の影響を受けながら生育しています。その生育の「うごき」すなわち時間に伴う変化を捉えるためには、対象を長期にわたり観察し続けることが必要です。しかしながら、その変化を数十～数百年にわたり追い続けることは非常に困難です。そこで、変化を把握する手法として年輪解析が用いられてきました。熱帯雨林を除き、季節のはっきりしている地域では1年に1層の年輪が形成されます。本シリーズ前号(西園 2012)で紹介されているように、樹木が成長してきた過程を把握する上で大変優れた方法と言えます。

ところで林学においてなじみ深い「年輪解析」は主として材積成長を把握するために用いられてきましたが、本稿では、年輪に含まれるもう少し違った情報に着目した研究を紹介したいと思います。図-1は同じ場所に生育する異なる個体の年輪を示し、その年輪幅の広狭パターンが一致しています。つまり、この変動パターンはそれぞれの個体が共通して受けた環境の影響を記録していると言えます。1年ごとの年輪幅の広狭などの変動パターンに着目し、年輪が形成された年を決定し、年輪幅などの時系列変動を解析することにより過去の環境の変遷を解明する学問を年輪年代

学(dendrochronology)と呼びます(Kaennel and Schweingruber, 1995)。この年輪年代学的手法を適用して環境変動と樹木成長の関係、森林を取り巻く環境の変動を解析した例を紹介します。

2. 年輪に含まれる情報と解析方法

年輪年代学において、年輪幅などの時系列変動はいくつかの原因による変動の合算とみなします(Cook, 1990)。それらは「加齢に伴う変動」、「気候による変動」、「隣接する樹木からの被圧・開放などに起因する個体特有な変動」、「風害や生物害などに起因する生育地に共通する変動」などです(図-2)。材積成長を対象とする場合には、年輪幅の絶対値や「加齢に伴う変動」、「立木密度に伴う変動」に着目していました。一方、年輪年代学的手法では、個体間に共通する変動すなわち「気候による変動」に着目して解析を行います。そのため、「標準化」と呼ばれる処理を行います。標準化は、年輪幅などの時系列に対し、その時系列を近似する曲線または直線(以下、傾向曲線)を当てはめ、各年の年輪幅の値と傾向曲線の対応する値の比を算出することでを行います(図-3)。この処理により、(1)年輪幅時系列から「加齢に伴う変動」や「隣接する樹木からの被圧・開放など

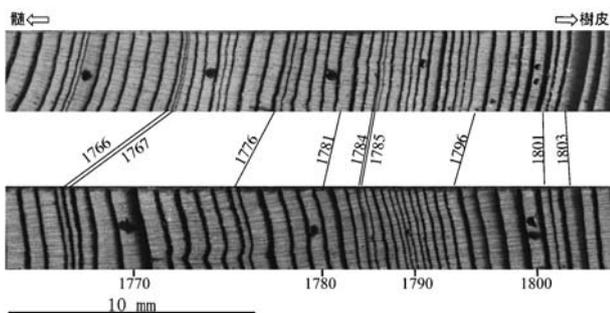


図-1 カラマツ (*Larix gmelinii*) の異なる個体間に認められる年輪幅変動の同時性 (試料採取地: 中部シベリア)
試料上の黒点は鉛筆によるマーキング (安江 2011)

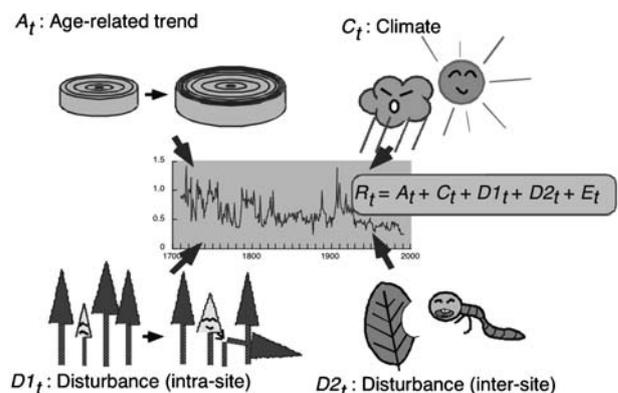


図-2 年輪年代学における年輪幅の変動要因に関する概念 (Cook, 1990 を参考に作成)

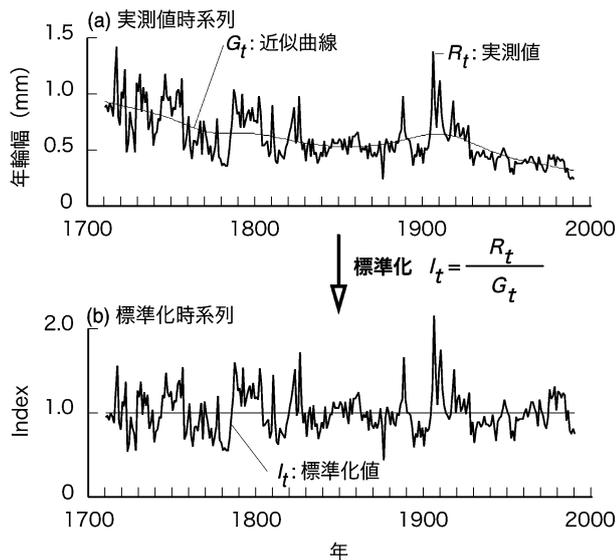


図-3 標準化の方法

実測値時系列の近似曲線（この場合はスプライン関数）を算出し、実測値との比を算出することで標準化値を求める。

に起因する「個体特有な変動」を減衰するとともに、(2) 年輪幅の時系列変動を実測値の大きさに左右されない相対的な値にすることができます。

標準化によって得られた時系列は個体間で非常に似た変動を示しています（図-4）。つまり、この変動は気候変動を反映している成分であると言えます。これらの時系列を平均することで、生育地を代表する時系列変動である chronology(クロノロジー)を作出します。このクロノロジーと気象データとの関係解析によって樹木成長の気候応答を明らかにしたり、逆に環境変動を復元することができます。また、変動の同時性に着目して枯死木や伐採木の生育年代を明らかにすることが可能です。

3. 樹木肥大成長の気候応答

クロノロジーと月平均気温、月降水量などの時系列との間で相関係数を算出することで、樹木の成長を制限している要因を明らかにすることが可能です。近年は地球温暖化に伴う急激な気候変化が危惧されており、樹木の気候応答を明らかにすることは重要です。

図-5はシベリアの永久凍土上に生育するカラマツの年輪幅変動と気温や降水量との相関関係を表しています。5月下旬から6月中旬の気温が年輪幅に促進的に、冬季と5月の降雪が抑制的に影響を与えていることが示されました。解析前は「寒冷地だから夏の気温が影響しているに違いない」

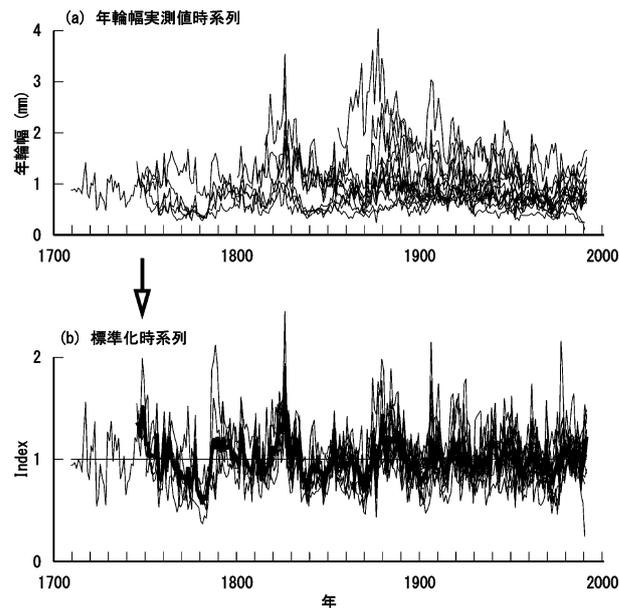


図-4 生育地を代表する時系列であるクロノロジーの構築

実測値時系列を標準化した後、平均値（太線）を求める。

と高をくくっていましたので、解釈に苦しみました。その後、雪解け時期やフェノロジー観測の結果からこの時期は雪解けに一致していることを確認し、雪解けにともなう土壌の融解が最も重要な成長制限要因であることが示唆されました（Yasue *et al.*, 2010）。

図-6は、乗鞍岳における分布の上限域（標高2,400m）と下限域（標高1,600m）に生育するダケカンバの年輪幅と気温や降水量との相関関係を表しています。分布上限域のダケカンバの肥大成長には夏季の気温が促進的に関与し、一方下限域では8月の気温が抑制的に、降水量が促進的に関与していました。つまり、上限域では夏季の気温が制限要因に、下限域では8月の水ストレスが制限要因になっていることが示唆されました。このように、年輪年代学的手法による気候応答解析により、長期にわたる連続的な観測をしなくても、樹木の成長制限要因を絞り込むことが出来る利点があります。

4. 気候復元

年輪幅などの変動は気候要素によって影響を受けて変動をしています。ということは逆に過去の気候変動を復元することも可能です。観測機器による気象観測が本格的に始まったのが約150年前ですが、高齢な個体群の年輪情報を用いれば、それ以前の気候変動を復元することが出来ます。

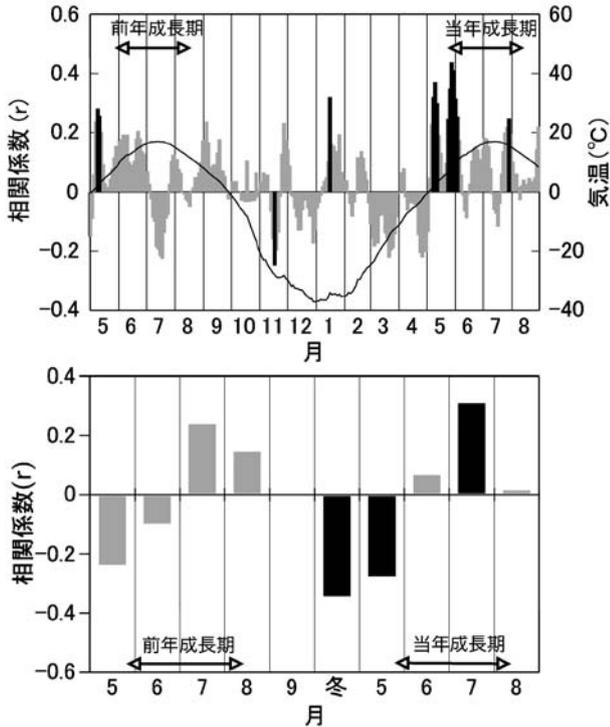


図-5 中部シベリアの永久凍土地帯に生育するカラマツ (*Larix gmelinii*) の年輪幅と気温および降水量との単相関係数
 気温は、10日間の平均値を2日おきにずらしている(上図)。降水量は月合計および冬季(10~4月の合計)を対象に算出した(下図)。前年成長期の気候要素の影響も評価するために16ヶ月間を対象とした。統計期間は1930-1995年(n=66)。黒塗り潰しは $p < 0.05$ にて有意な相関を示す。(Kujansuu *et al.*, 2007より改作)。

気候復元には、年輪幅だけではなく、年輪内の組織構造の変化を表す年輪内最大密度や孔圏幅、孔圏外幅などの指標も有効であることが知られています(図-7)。表-1は、北海道北部に生育するアカエゾマツとヤチダモの気候応答を示します。アカエゾマツの年輪内最大密度やヤチダモの孔圏外幅が夏季の気温と正の相関関係にあり、夏季の気温変動を記録したレコードであることがわかります。そこで、夏期(6~9月)の気温を従属変数、夏季の気温と有意な相関を示した年輪情報を独立変数とする重回帰式(気候復元モデル式)を作成しました。このモデル式が観測データの存在する期間中に常に成り立つことを確認した上で(verification; Fritts, 1976参照)、式に気象データが存在しない期間のクロノロジーを代入することで、1年の分解能での夏季の気温の復元を行うことが出来ました(図-8)。夏期

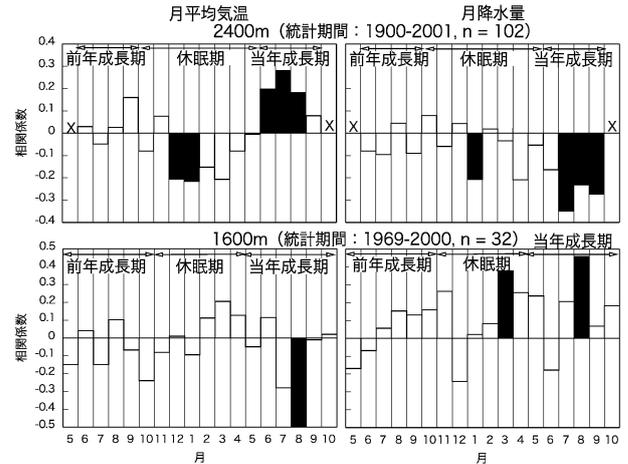


図-6 乗鞍岳の生育上限(2,400 m)と生育下限(1,600 m)に生育するダケカンバの年輪幅と月平均気温および月降水量との単相関係数
 塗りつぶしは $p < 0.05$ にて有意な相関を、Xは算出を行っていないことを示す。樹齢の違いにより、生育上限および下限では統計期間が異なる(Takahashi *et al.*, 2003; 2005より改作)

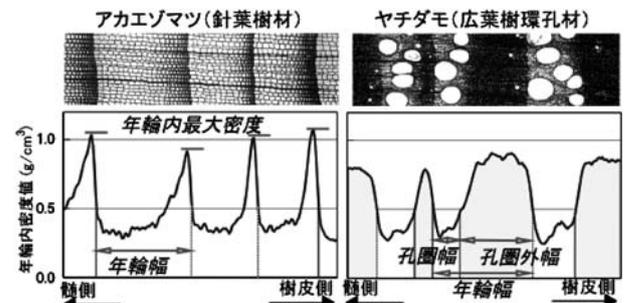


図-7 年輪構造(写真)と対応する年輪内の密度変動(グラフ)
 密度値は軟X線デンシトメトリにより測定した。アカエゾマツでは年輪幅と年輪内最大密度を、ヤチダモでは年輪幅、孔圏幅、孔圏外幅を測定した。

の気温の変動は、飢饉の発生と連動していることが読み取れます。天明と慶応の飢饉時には北海道では冷夏が数年間連続したようです。一方、天保の飢饉では冷夏が連続したわけではなかったと言えます。近年、地球温暖化の影響が危惧され、将来の気候変動が様々な大気循環モデルにより予測されています。モデルの妥当性は、過去の気候変動を再現できるかどうかで評価されるため、年輪を用いた過去の気候変動の復元が世界各地で推進されています。

表-1 北海道北部に生育するアカエゾマツおよびヤチダモの年輪構造指標と月平均気温との相関
 +、- はそれぞれ $p < 0.05$ にて有意な正または負の相関を示す。統計期間は 1900-1991 年 ($n = 92$)。
 特にアカエゾマツの年輪内最大密度とヤチダモの年輪幅、孔圏外幅が夏季の気温変動を反映している
 ことがわかる。(Yasue *et al.*, 1996; 1997、一部未発表データより作成)

| | 月 | 前年成長期 | | | | | 休眠期 | | | | | 当年成長期 | | | | | | | |
|---------|--------|--------|---|---|---|---|-----|----|----|---|---|-------|---|---|---|---|---|---|--|
| | | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| アカエゾマツ | 年輪幅 | 天塩 | | | - | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 泥川 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 母子里 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 年輪内最大密度 | 天塩 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 泥川 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 母子里 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ヤチダモ | 年輪幅 | ブトカマベツ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 泥川 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 孔圏幅 | ブトカマベツ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 孔圏外幅 | ブトカマベツ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 泥川 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

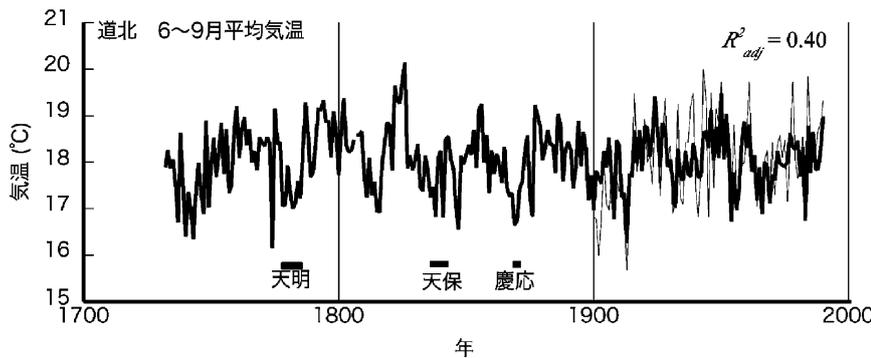


図-8 アカエゾマツおよびヤチダモの年輪構造指標を用いて復元した北海道北部の夏期(6-9月)の平均気温
 細線は旭川地方气象台における観測値を、太線は年輪指標と気温との関係における回帰式より求めた推定値。下部の横棒は本州において顕著な飢饉が記録された期間を示す (Yasue *et al.*, 1999、一部未発表)

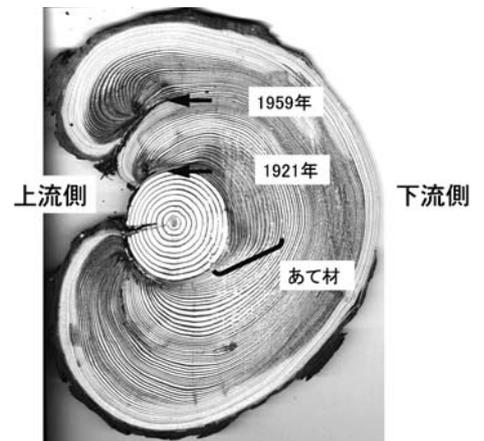


図-9 洪水による傷害痕とあて材の形成
 試料採取地は中部シベリアコチュエヨム川河畔。1921年の成長開始前に傷害を受けると同時に樹幹が傾斜したこと、1959年の成長開始前に傷害を受けたことがわかる。融雪時の洪水に伴う氷塊の衝突が原因と考えられる (安江 2011)

5. イベント発生年の特定

肥大成長時に何らかの傷害やストレスを受けたときに形成される組織構造も生育環境変動の発生を記録しています。形成層が傷害を受けた場合にはその部分が壊死し、その後周囲の形成層で生産される木部によって再び被われる「巻き込み」が生じます。巻き込みの開始年代から、形成層に傷害を与えたイベントの発生年代を1年の精度で(形成層活動期間中であればその季節まで)特定することが可能です。「あて材」は樹幹が傾いたときに形成され、通常針葉樹では下側に、広葉樹では上側に形成されます。地滑り等の発生年代を特定することが出来ます。図-9は、シベリアの河畔に生育していたカラマツ樹幹の横断面です。1921年には春先の洪水で運ばれた氷の直撃を受け、形成層が傷害を

受けるとともに木が傾いたことがわかります。その後、1959年に再び洪水が発生し、形成層が傷害を受けたことがわかります。

6. 伐採・枯死年の特定

年輪幅変動の同時性を利用して、生育年代の不明な建築材や出土材の生育していた年代を1年の精度で明らかにすることも可能です。前述のように、同じような環境で生育

した同一樹種では、同様な変動パターンを示します。そこで生育年代が不明な木について、基準となる時系列であるクロノロジーに対して1年ずつずらしながらパターンを照合していきます(図-10)。このような作業をcross dating(クロスデイトイング)と呼びます。遺跡や地中から出土する木材の生育していた正確な年代を特定することができ、考古学分野において大きな成果を上げています(奈良国立文化財研究所 1990)。また、火山噴火や土石流、津波などによる樹幹埋没の正確な年代特定にも用いられています。森林内で枯死をした個体の枯死年代を特定することにより、枯死木も含めた森林動態や森林現存量の復元にも用いられています(Metsaranta and Lieffers, 2008)。

ちなみに、クロスデイトイングの作業は、偽年輪や不連続年輪、欠損年輪、測定ミスを検出し、全ての年輪が形成された年を正確に決定する過程であり、年輪年代学的研究において必ず行わなければならないプロセスです。熟練していても年輪の読み間違いはゼロには出来ないため、現生木、枯死木にかかわらず、必ず目視による照合と統計的な検証を組み合わせて実施しなければいけません(Stokes and Smiley, 1996)。

7. あとがき

本稿では樹木・森林・環境のうごきを研究するための年輪年代学的手法を紹介しました。長い年月にわたり積み重

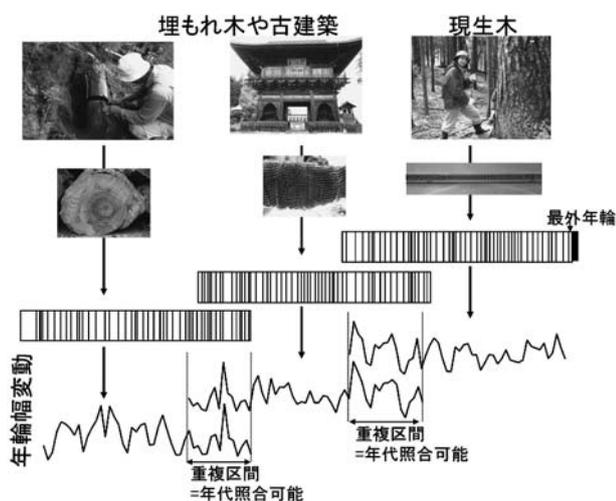


図-10 年輪幅変動を用いた形成年代不明な木材のクロスデイトイングの模式図特徴的な狭い年輪あるいは広い年輪の出現パターンに基づいて重複区間を検出する。(Schweingruber, 1987 をもとに作図)

ねられた年輪から1年の分解能で情報を読み取り解析することで、樹木の成長に影響を及ぼしている要因を絞り込むことができる点で優れていることがご理解頂ければ幸いです。先日、カナダの森林調査にお邪魔した際には、国立公園の管理官のみなさんが「ああ、デンドロクロノロジーをやっているのね。」と当たり前のように受け止め、森林管理の現場でも認知されている様子が印象的でした。本稿が年輪年代学的手法の理解に役に立ち、気軽に活用して頂けるようになれば幸いです。

引用文献

- Cook, E. R. 1990. A conceptual linear aggregate model for tree rings. In *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Edited by Cook, E. R. and Kairiukstis, L. A. Kluwer Academic Publishers, Boston. pp. 98-104.
- Fritts, H. C. 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press, London. pp. 567.
- Kaennel, M. and Schweingruber, F. H. 1995. *Multilingual glossary of dendrochronology*. Paul Haupt Publishers, Bern. pp. 467.
- Kujansuu, J., Yasue, K., Koike, T., Abaimov, A. P., Kajimoto, T., Takeda, T., Tokumoto, M., Matsuura, Y. (2007) Climatic responses of tree-ring widths of *Larix gmelinii* on contrasting north- and south-facing slopes in central Siberia. *J. Wood Sci.* 53: 87-93.
- Metsaranta, J. M., Lieffers, V. J. (2008) A fifty-year reconstruction of annual changes in the spatial distribution of *Pinus banksiana* stands: does pattern fit competition theory? *Plant Ecol.* 199: 137-152.
- 奈良国立文化財研究所 1990. 年輪に歴史を読む—日本における古年輪学の成立—. 同朋舎、京都. pp. 195.
- 西園朋広 (2012) 樹木・森林の成長—変異生と類似性—. *森林科学* 64: 35-38.
- Schweingruber, F. H. 1987. *Tree-rings*. D. Reidel Publishing, Dordrecht. pp. 276.
- Stokes M. A, Smiley T. L. (1996) *An introduction to tree-ring dating*. University of Chicago Press, Chicago
- Takahashi, K., Azuma, H., Yasue, K. (2003) Effects of

- climate on the radial growth of tree species in the upper and lower distribution limits of an altitudinal ecotone on Mt. Norikura, central Japan. *Ecol. Res.* 18 : 549-558.
- Takahashi, K., Tokumitsu Y., Yasue, K. (2005) Climatic factors affecting the tree-ring width of *Betula ermanii* at the timberline on Mt. Norikura, central Japan. *Ecol. Res.* 20 : 445-451.
- 安江 恒(2011)年輪年代学. 日本木材学会編「木質の構造」, 文永堂出版, P144-152.
- Yasue, K., Funada, R., Kondo, T., Kobayashi, O., Fukazawa, K. 1996. The effect of climatic factors on the radial growth of Japanese ash in northern Hokkaido, Japan. *Can.J. For. Res.* 26 : 2052-2055.
- Yasue, K., Funada, R., Fukazawa, K., Ohtani, J. (1997) Tree-ring width and maximum density of *Picea glehnii* as indicators of climatic changes in northern Hokkaido, Japan. *Can. J. For. Res.* 27 : 1962-1970.
- Yasue, K., Funada, R., Nobori, Y., Kobayashi, O. (1999) Tree-ring data obtained by densitometric analysis as indicators for past climate reconstruction in northern Japan. *In Proceedings of International Conference on Climate Change and Variability – Past, Present and Future-*. P121-126
- Yasue K., Kujansuu J., Kajimoto T., Nakai Y., Abaimov A. P., Matsuura Y. (2010) Seasonal changes in radial stem growth of *Larix gmelinii* in Central Siberia in relation to its climatic responses. In: A. Osawa *et al.* (eds) *Permafrost Ecosystems: Siberian Larch Forests*. Ecological Studies Series 209, 331-345 Springer Verlag, Berlin.

鹿児島県におけるスギ人工林管理システム 「SILKS」の開発

長濱 孝行 (ながはま たかゆき、鹿児島県熊毛支庁農林水産部林務水産課)
近藤 洋史 (こんどう ひろし、独立行政法人森林総合研究所九州支所)

1. はじめに

鹿児島県（以下「本県」）のスギ人工林面積は民有林の57%に相当する123千haに及んでいます（鹿児島県環境林務部 2011）。このため、これら森林資源量の把握や管理基準の確立が急務となっていました。

そこで筆者らは、伐期の長期化にも対応し、本県の地域性を踏まえたスギ人工林の地位区分を導出するとともに、林分密度管理図（以下「密度管理図」）と収穫表を調製し、これまでの指標をより現場に近づけました（長濱・近藤 2006a）。

調製した指標に基づき新たな育林体系を構築し、本県の県林業技術者に提示したところ、森林所有者等に対して間伐効果を示すシステムを作成できないかといった意見・要望が寄せられ、これに応えるシステム開発（長濱・近藤 2006b）に取り組みましたので、その概要を報告します。

2. 互換のある指標の作成

システム開発に際し、まずベースとなる指標を地域に適合したものにする必要がありました。本県のスギ人工林育林管理基準は、九州地方スギ林分密度管理図（林野庁 1980）や鹿児島地方スギ林分収穫表（林野庁熊本営林局 1965）を用いてきました。

しかしながら、九州という広範囲な地域を対象にスギに対して1つの密度管理図を適用すること、60年生までの林分調査結果で解析した収穫表は長伐期化に対応できないこと、地位によって適切な密度管理を考慮した施策が必要であることが課題となっていました。

さらには、密度管理図と収穫表には、異なる独立変数を用いた手法で調製されていることから、単位面積当たりの幹材積等、両者の林分構成因子は相互関係が欠如し、

各種計画樹立や普及指導の際に矛盾が生じていたため、密度管理図を構成する関数式や地位（林地の生産力を示す指数）に関する曲線式を基準に収穫表の調製を行うこととしました。

解析には、離島を除く本土4流域における高齢林分を含めた計653点の林分調査結果を用いました。異常資料の吟味・棄却後、主林木平均樹高の分布図の解析結果から、Mitscherlich成長関数を用いた3つの地位区分を行うとともに、収量密度効果の逆数式や等平均樹高曲線等、密度管理図に描写される各種曲線式を算出しました。

収穫表は地位別に調製し、密度管理図との互換を持たせるために、密度管理図を構成する関数式により各林分構成因子を導出し、原則として、その林分がもてる最大材積に対する現在材積の割合を密度の変数で示す収量比数が0.70（中庸な仕立て方）の数値を収穫表の基本数値としました。調製過程において、密度管理図の構成式および地位に関する曲線式を応用しているため、収穫表と密度管理図等とは相互作用のある関係が保たれており、本県における収穫予測・資源把握に関する業務に役立つものと考えられます。

3. システム収穫表 SILKS の開発

システム収穫表とは、対象とする林分について、さまざまな施策が行われる場合に対応して、将来の成長過程を予測できる仕組みをもったコンピュータ・プログラムです。本県の地域性を踏まえた密度管理図等の各種関数式を本県独自の成長モデルとして利用し、林分の現況情報から間伐シミュレーションと収穫予測を可能にするシステムを検討し、Silviculture, Kagoshima, Sugiの頭文字をとってSILKS（シルクス）と称することにしま

鹿児島県におけるスギ人工林管理システム「SILKS」の開発

した。

研修会等により林業技術者等から得た森林管理等のシステム化に対する要望等を表-1にまとめました。本県森林政策部局や地方普及指導機関など、現場の最前線では、任意の林齢における林分幹材積等の林分構成因子を正確に把握したい、わかりやすい間伐効果のシミュレーションが欲しいといった内容でした。

そこで、SILKSには、任意条件で間伐を実施した場合の林分構成因子の時系列推移をグラフなどで図示するとともに、具体的な数値を表で示すことにしました。

また、森林所有者に間伐効果を理解してもらうには、任意の間伐施業に対する比較対照が必要です。そこで、間伐効果を比較対照できるように、本県で推奨している林分密度（収量比数 0.7）で推移した場合と、現在以降に間伐放棄した場合の結果をシミュレートできるように

考慮しました。

SILKS を作動させる際に、林分からの初期情報としては、林齢、主林木平均樹高、ha 当たり本数が必要です。これらの林分情報は簡単に入手可能と思われ、SILKS では、極力少ない初期情報からできる限り多くの林分情報が把握できるように工夫しました。

以上のような現場からの意見・要望をもとに、SILKS のシステムフローを作成しました(図-1)。SILKS では、操作している者が、現在、どの作業を行っているのかを把握できるようにするため、操作画面上にガイド機能を付加しています(図-2 中段のコマンドボタン)。

①地位判定

林齢と主林木平均樹高を入力し、予測対象の林分の地位を判定させます。地位は、収穫表と同様にⅠ、Ⅱ、Ⅲの3区分とし、その判定結果が図上に示される(図-3)

表-1 研修会等で得た森林管理のシステム化に対する要望等

| 新しい収穫表・密度管理図の問題点等 | システム収穫表に対する要望等 |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 収穫表は5年ごとの基準年しか表示されていない | 1年ごとの詳細な情報を簡単に入手したい |
| 密度管理図は両対数軸で表示されている | 林分幹材積等の林分構成因子の具体的な数値を読み取ることがむずかしい |
| 収穫表や林分密度管理図では、間伐方法を変化させた場合の林分構成因子の変化状況がわかりにくい | 間伐方法を変化させたときの林分構成因子のシミュレーションを可能にしてほしい。また、シミュレート結果に対して、森林所有者にも十分理解できるようにしてほしい |
| 基準となる間伐施業を行った場合の林分構成因子のシミュレートができない | 本県推奨の間伐施業(収量比数0.7で推移させる間伐施業)のシミュレート結果を表示させてほしい |
| 間伐施業の効果を森林所有者に説明するのがむずかしい | 間伐効果を検証するため、現在から無間伐で推移させた場合のシミュレート結果を表示させてほしい |

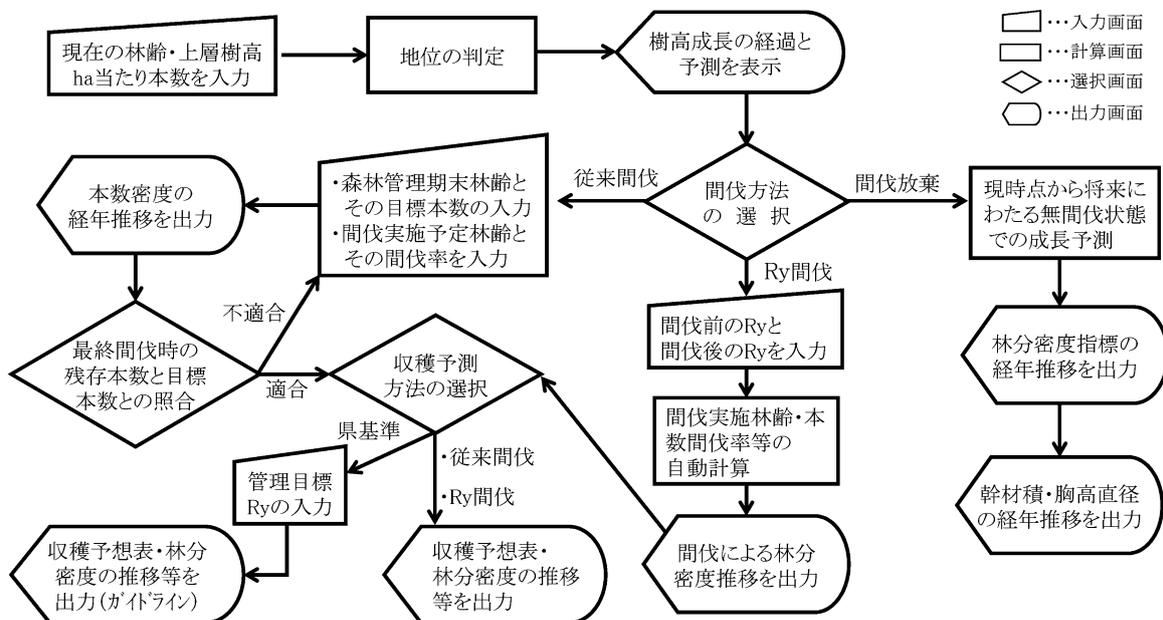


図-1 システム収穫表「SILKS」のフローチャート

鹿児島県におけるスギ人工林管理システム「SILKS」の開発



図-2 初期画面とガイド機能 (図中の中段)

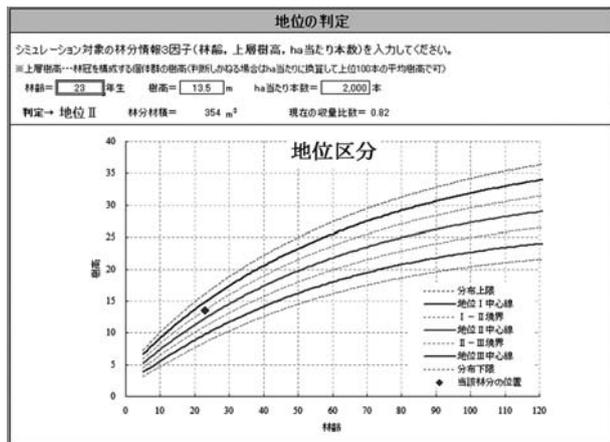


図-3 「地位判定」現在情報から地位を判定

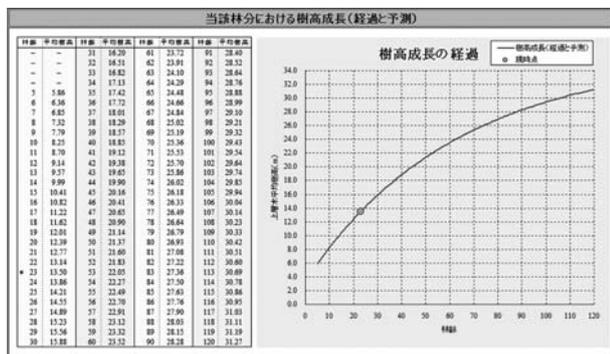


図-4 「樹高推移」過去と未来の樹高成長を表示

とともに現状密度から収量比数を表示します。

②樹高推移

当該林分の主林木平均樹高予測を表示し、図-4のよう、グラフ表示だけではなく、林齢ごとの樹高を表形式にして提示しています。

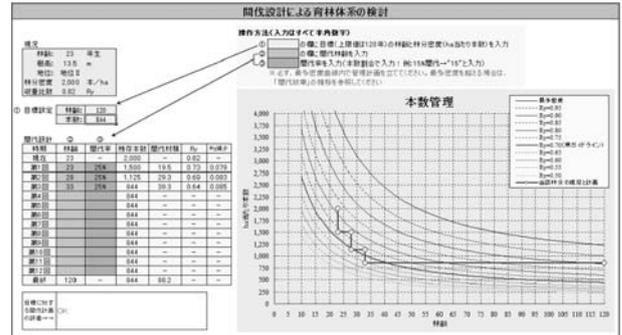


図-5 「間伐設定」任意の間伐設計による成長予測

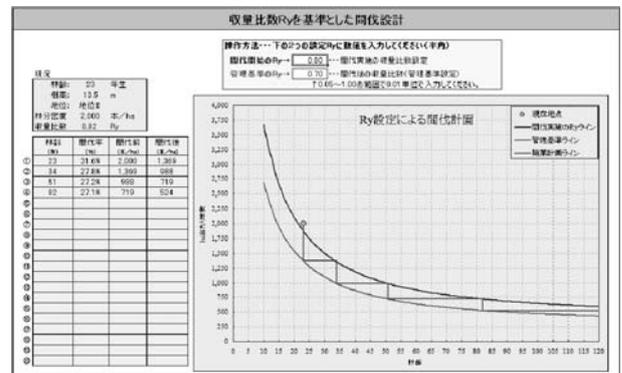


図-6 「Ry 間伐設定」指定した Ry 間での密度管理試算

③間伐設定

「樹高推移」を確認の後、間伐シミュレーションを行います。間伐方法は、林業技術者等の要望等をもとに、「間伐設定」、「Ry 間伐設定」、「間伐放棄」を選択できるようにしています。

「間伐設定」では、現在の地位、収量比数が表示されており、この現況情報をもとに間伐計画として、間伐実施林齢と本数間伐率とを入力すると、密度管理線が間伐回数に応じて階段状に図示されます(図-5)。

④ Ry 間伐設定

指定した Ry (前出の収量比数の略語)の条件下で間伐林齢及び間伐率の試算ができます。間伐開始 Ry と、管理の基準 Ry を 0.50 ~ 1.00 の範囲内において 0.01 単位で入力すると、当該林分が間伐開始 Ry に達した時点で管理基準 Ry に移行するよう間伐率等を自動計算します。その結果を図表で示し(図-6)、間伐の時間的間隔や間伐率を検討できるように設計しています。

⑤間伐放棄

「間伐放棄」は間伐を放棄した場合の林分成長予測を行うもので、この機能を SILKS に加えたのは、森林所有者等に対し間伐効果を明示するためです。無間伐状態

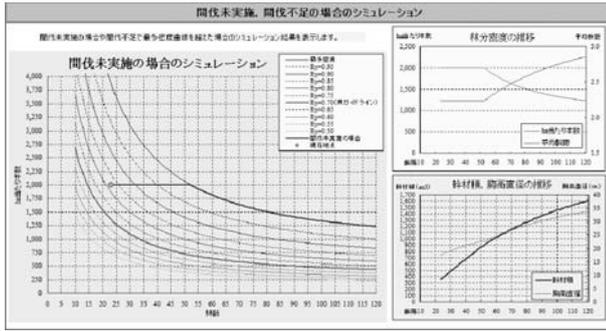


図-7 「間伐放棄」施業放棄後の林分の成長予測

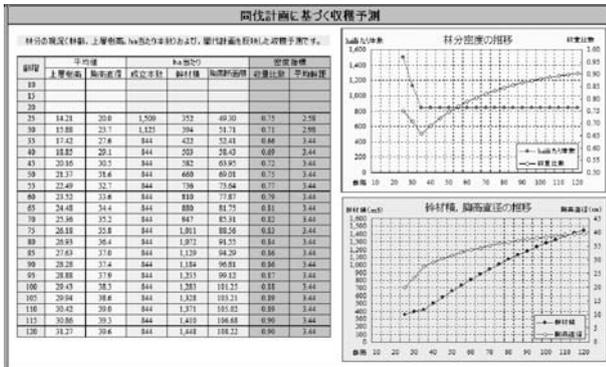


図-8 「収穫予測」任意間伐設計に基づく収穫予測

におけるRyの算出方法ですが、現時点から最多密度曲線に交わるまでha当たり本数は変化しないものとして、最多密度曲線に達した時点から、その線上を辿るようにしています(図-7)。

⑥ 収穫予測

収穫予測パターンとしては2種類としました。1つは「間伐設定(図-8)」と「Ry間伐設定」それぞれの予測です。もう1つは、「収穫予測(県基準)」として、間伐設計等を考慮せず、任意の収量比数(既定値は0.70)で推移させた場合の収穫予測を、同様のレイアウトで林齢10年生から120年生の範囲で林齢別に算出させたものです。この収穫予測(県基準)は県あるいは地域のガイドラインを設定する際に活用できます。

これらの収穫予測は、表による表示ばかりではなく、林分密度の推移と幹材積・胸高直径の推移などを同じ画面上にグラフで示すことも可能となっています。

⑦ 間伐効果

間伐効果の全体像を視覚的に捕らえるために図-9の画面を設けています。予測したい林齢における平均胸高直径、幹材積、胸高断面積、収量比数等の情報をグラフで確認できます。

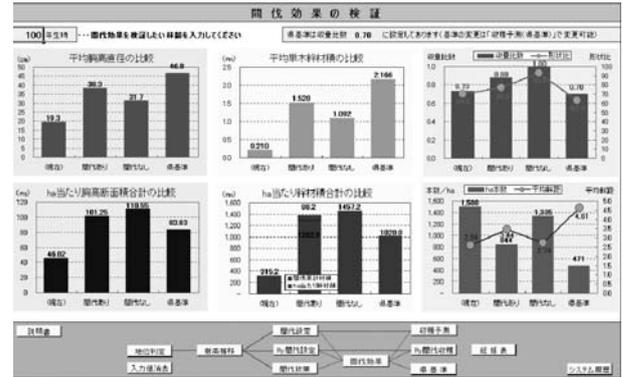


図-9 「間伐効果」任意間伐・間伐放棄・県基準の対比表

また、林業改良指導員等の林業技術者が、森林所有者等向けの間伐指導の際に活用できるように帳票印刷を可能にし、当該林分の現況から地位判定、樹高推移、間伐シミュレーション、収穫予測までを網羅した「総括表」を作成できるようなシステムとなっています。

4. おわりに

林業技術者が、煩雑な紙面による複雑な林分密度管理図や収穫表で成長予測や普及活動を行う場合、森林所有者が興味を示さなくなっていました。

SILKSは個々の林分における現況の把握と任意の間伐計画による収穫予測を可能にしています。スギに次ぐ造林樹種であるヒノキについても同様のシステム化が完了しています。

今後は、品種別の成長パラメータや細り表の関数式等を組み込み、現場における間伐設計業務など、提案型集約化施業の推進の一助となるよう努めていきます。

引用文献

鹿児島県環境林務部(2011)鹿児島県林業統計。
 長濱孝行・近藤洋史(2006a)長伐期施業に対応した鹿児島県スギ人工林収穫予測。日林誌88(2):71-78。
 長濱孝行・近藤洋史(2006b)鹿児島県におけるスギ人工林管理システムSILKSの開発。森林計画誌40(2):221-230。
 林野庁(1980)スギ人工林林分密度管理図説明書九州地方。
 林野庁熊本営林局(1965)鹿児島地方スギ林分収穫表。

森から流れ出る水の量をはかる

壁谷 直記 (かべや なおき、森林総合研究所九州支所・

ランカスター大ランカスター環境センター)

キーワード：流域 (catchment, drainage basin, or watershed)、降水量 (precipitation)、流出量 (runoff)、流量 (discharge)

I. はじめに

森に降った雨は、大半は地中にしみ込みますが、土の中のさまざまな経路を通して地形のより低いところへ移動していきます。そして、それらが集まると、湧水点となり、そこが川の流れの始まりとなります。川の一地点から見て、それより上流の水が集められる範囲を流域 (もしくは集水域) といい、その面積を流域面積とよびます。

流量 (discharge) とは単位時間に河川のある横断面を通過する水の量のことで (図-1)。流量 Q (m^3/s) はある時点の河川の断面積 A (m^2) と川の流れの速さ (流速) V (m/s) の積 $Q = A \times V$ から求められます (例えば 砂防学会 1976; Mayhew, 2009)。一方で、流出量 R (runoff) は、河川の流量 Q を流域面積 B (m^2) で割り算した値のことで、単位は m/s や m/h などで与えられます (Shaw *et al.*, 2010)。

このように流域という一つの地形単位をもとに、入力である降水量 P と出力である流出量 R を同じ単位 (m/s , m/h) に揃えることで、流域の水収支 ($P-R$) の議論が容易になります。

では、どうやってこの流出量を測定するのか、実際の測定方法を例に紹介します。

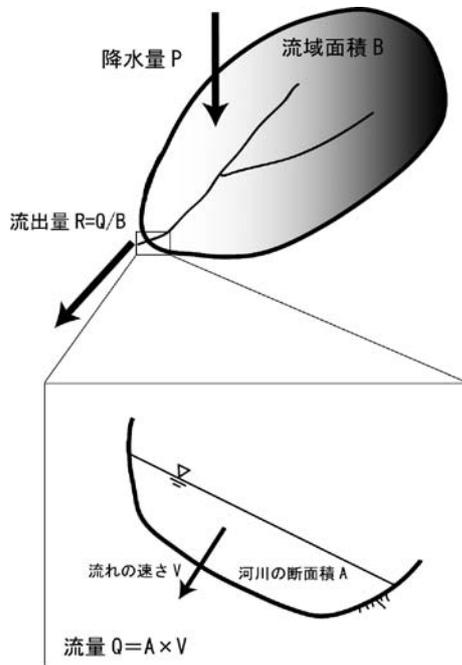


図-1 流量と流出量の違いについて

II. 測定方法

森林流域の流出量を測定するには、専用の構造物である量水堰を利用した方法が一般的です。この方法は、高精度での流量測定が可能である (福嶋 1997) 反面、専用の構造物を建設するためにコストがかかる欠点があります。ここでは、既設の構造物を利用して川の水位を計測し、現地で測定した水位から流量への変換曲線を用いて流出量を観測した事例 (壁谷ら 2010) を紹介します。

沖縄県国頭村における観測事例

沖縄県国頭村の西銘岳北西部の林道沿いに水位観測地点を設け、流域試験地を設定しました。試験地の流域面積は、36 ha でした。植生は、主にリュウキュウマツの造林地ですが、イジュ、イタジイ、センダン、クスノキなどの天然広葉樹の侵入がみられます。流域の地質は、主として堆積岩類と考えられます。

水位観測には圧力式水位計 (オンセット社、U-20 4m 計) を用いました。水圧用センサーを観測地点の現地に排水用として既設されていたボックスカルバートの底面に設置しました (写真-1)。また、圧力の補正に使用する気圧用センサーはボックスカルバートの側壁に設置しました。低水時の水位確保を目的にボックスカルバートの底面には高さ 10 cm のコンクリート壁を設け、水が通過する通水部を矩形複断面としました。こうして観測した水位の時間変化を図-2 に示します。降雨にตอบสนองして水位が上昇している様子がわかります。

水位-流量変換曲線は、プロペラ式流速計を用いて実測したデータから作成しました。さまざまな水位条件で実測した流量



写真-1 1号流域の水位観測地点の様子 (壁谷ら 2010 より)

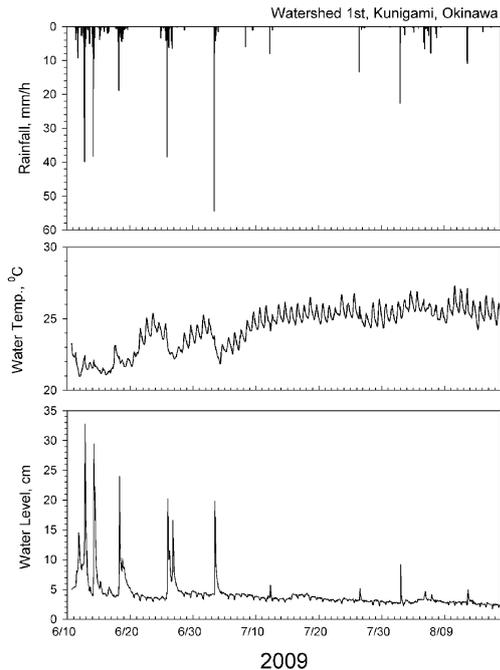


図-2 2009年6月10日～8月18日の降水量、水温、河川水位の時間変化（壁谷ら2010より）

(discharge) データから通水部の粗度係数（水が通過する際の表面の抵抗係数）を求めました。

こうして得られた水位－流量変換曲線に、水位（water level）の時系列変化を入力することで流量（discharge）の時間変化が求められます。これをさらに、流域面積で割り算することで流出量（runoff）の時間変化を知ることができます。

III. 森林と水の関係

川のながれは、たえず流れ続ける、連続的なものです。森に降った雨が川へ流れ出るまでの間には、様々な経路、時間を経た水が集まっています。このため、流域の状態（土地利用など）の変化の影響が、森から出てくる水の量にどのような影響を与えるのかを理解するためには、長期的、短期的な影響を分けて考える必要があります。また、森林流域では、森林施業

と気候変化の影響が流出量に複雑に関与しています（Chappell and Tych, 2012）。このため、森林と水との関係を正確に理解するためには、長い間の正確な連続観測データが何より大切です。

ここで解説したことは水文学（すいもんがく、hydrology）として位置づけられます。近代の科学的な水文学の始まりは、フランス人技師 Perrault が 1694 年にセーヌ川の上流の流域で降水量と流出量を実測し、降水量が川の流れを維持するのに十分足りているということを証明したことに基づくそうです（Shaw *et al.*, 2010）。より詳しくは、Brutsaert (2008) や Shaw *et al.* (2010) などを参考にすると良いでしょう。

謝辞

現地観測、測器の設置に関して沖縄県企画部森林資源研究センターの皆様にご多大なご協力を頂きました。

引用文献

- Brutsaert, W. (2008) 水文学. (杉田倫明訳, 筑波大学水文科学研究室監訳). 共立出版. 502p
- Chappell, N.A. and Tych, W. (2012) Identifying step changes in single streamflow and evaporation records due to forest cover change. *Hydrological Processes* 26 : 100-116
- 福嶋義宏 (1997) 川の水の量. *森林科学* 20 : 68.
- 壁谷直記・清水 晃・清水貴範・浅野志穂・生沢 均・今田益敬・比嘉幹彦・古堅 公 (2010) 亜熱帯島嶼森林流域における降雨量・流出量の観測. *九州森林研究* 63 : 128-130.
- Mayhew, S. (2009) *A Dictionary of Geography* 4th Ed, Oxford university press. 551p.
- 砂防学会 (1976) 砂防用語集. 全国治水砂防協会. 211p
- Shaw, E.M., Beven, K.J., Chappell, N.A., Lamb, R. (2010) *Hydrology in Practice* (4th Ed, Spoon Press). Taylor and Francis. 546p.

記録

第56回国連婦人の地位委員会 (CSW56)

NGO フォーラムに参加して

太田 祐子 (おおた ゆうこ、森林総合研究所森林微生物研究領域
(前企画部男女共同参画室長))

第56回国連婦人の地位委員会 (CSW56) が、2012年2月27日から3月9日にニューヨーク国連本部で開催された。国連婦人の地位委員会は、1946年に設置された国連経済社会理事会傘下の機能委員会のひとつで、毎年ニューヨーク国連本部においてジェンダー平等や女性の地位向上に関する様々な話題を議論し、経済社会理事会に勧告・報告・提案等を行う組織である。委員会では毎年優先テーマに沿った議論が行われ、今年のテーマは「農山漁村女性のエンパワメント及び貧困・飢餓撲滅・開発・今日的課題における役割 (the empowerment of rural women and their role in poverty and hunger eradication, development and current challenges)」であった。委員会のゴールのひとつは、このテーマについての合意結論と決議を採択することである。

政府代表団の出席する公式の委員会と

並行して開催されるのが国連女性の地位委員会 NGO フォーラム (CSW/NGO) で、NGO 主催のサイドイベント、パラレルイベントを指す。国連婦人の地位委員会と NGO フォーラムは、ジェンダー平等推進におけるいわば車の両輪の関係にある。フォーラムの中で各国 NGO は情報交換・共有を行い、意見をまとめたり、新たなネットワークを立ち上げたりして、委員会や各国政府への働きかけにつなげている。

森林総合研究所では、平成19年度より本格的に女性研究者支援および男女共同参画事業に取り組んでいる。男女共同参画推進本部アドバイザーの原ひろ子先生 (城西国際大学客員教授) は、世界的に著名な文化人類学者であるとともに、我が国ジェンダー研究のパイオニアでもあり、男女共同参画の政策を牽引する存在である。原先生が顧問を務める団体からは、国連婦人の地位委員会の政府代表

が毎年選出され、NGO フォーラムにおいてサイドイベントを毎年主催している。今回、原先生に随行し貴重な知見を得る機会に恵まれたのでここに報告する。

今回の NGO フォーラムには約300の NGO 団体、4,000名を超える参加者があった。日本からも50名以上が参加した。今年の NGO フォーラムにおいて、日本からは1つのサイドイベントと3つのパラレルイベントが開催された。その一つが「災害・復興とジェンダー平等—東日本大震災と津波」(国連 NGO 国内婦人委員会、国際婦人年連絡会、日本女性監視機構主催、国連代表部後援、3月1日開催) である。原先生ほか5名のパネリストによる、災害直後の物資および情報提供、医療支援、現地女性センターを通じた直接的効果的な資金支援、福島第一原発事故による農業への打撃などについての発表がおこなわれた。定員をはるかに超える90名以上が集い、ジェンダー視点を生かした災害直後の支援や、復旧・復興プロセスについて、今回の日本の経験と、得られた教訓、明らかになった課題について情報を共有し活発な議論が行われた。

私自身はこの他にも、今年6月に開催されるリオプラス20とジェンダー問題に関するイベント、アジア各国の若者が自身の直面するジェンダー問題を語るイベント、GEAR キャンペーン (国連の新組織 UN Women の立ち上げと運動推進) に関するイベント、アジア地域の災害に関するイベント等に参加した。シンポジウム形式のイベント、グループディスカッション形式のイベントなど、形式



写真-1 国連本部前

は様々であった。2月28日に行われたアジア女性監視機構 (Asia Pacific Women's Watch: APWW) の主催の「アジア太平洋地域集会」(Asia Pacific Caucus) は、グループディスカッション形式で内容的にも非常に面白く有意義なものだった。アフリカ地域、アジア太平洋地域といった各地域の NGO グループからまとまって提出される合意結論に関する提案書は、公式委員会での議論に大きな影響を与える。Asia Pacific Caucus はこの文書案の作成を行う集会で、原案を見ながら小グループでディスカッションを行ったのち、全員で新たな案を作り上げるという作業を行った。アジア太平洋地域の国々すべてに共通する問題について、それぞれの政治事情等に配慮した文章にするのは至難の業であった。私の所属した小グループでは、提案書に「アジア太平洋地域」独特の問題を盛り込むこと (特に今回の日本の震災について女性参画に関する記述の追加) や、国連文書に既にある文言を繰り返すべきかどうか (削除される可能性があるため重要な場合は繰り返すべきとの結論に達した)、TPP (環太平洋戦略的経済連携協定) に関する記述の加筆について議論した。日本人も多数参加していたが、臆することなく司会を買って出て、いろいろな方向にむいている各グループの意見

を見事に提案文章にまとめ上げる様子はすばらしかった。残念ながら国連婦人の地位委員会では合意結論が採択されず、最終的には合意結論のないまま幕を閉じた。後日、議長の所見が公表される予定とのことであるが、我々の意見がどこまで反映されたかは分からない。

今回参加したイベントすべてに共通するキーワードは「意思決定過程への女性の参画」と「ジェンダー視点の導入」であった。我が国では、いわゆる『2020年目標』である、「社会のあらゆる分野において2020年までに、指導的地位に女性が占める割合が、少なくとも30%程度に」(平成15年6月20日男女共同参画推進本部決定) の達成に向けて様々な取組が行われている。だが現状は厳しい。たとえば、我が国の国会議員 (衆議院議員) に占める女性割合は11.3%(2011年3月現在)、192の国と地域の国会議員 (下院または一院制) の女性割合の中で121位 (男女共同参画白書平成23年度版) である。また、我が国の科学者に占める女性割合は13.6% (平成22年3月31日現在) で、調査されている先進諸国36カ国中最下位である。「東日本大震災復興構想会議」においては15人のメンバーのうち女性は一人にすぎず、この状況は現在の県等の災害復興関連会議、防災会議においても同様である。ま

た、農林業分野についてみると、日本の農業就業人口における女性割合は約50%、林業においては15% (2005年) であるが、団体の役員に占める女性割合になると、農協役員では3.5%、森林組合役員では0.3% (2010年) になってしまう (表-1)。

さて、森林学会では、2003年に男女共同参画理事が置かれ、それ以後、男女共同参画学協会連絡会加盟、学協会大規模アンケートへの参加、森林学会大会でのシンポジウムやセミナーの開催、大会期間中の保育室設置など、様々な活動を行っている。昨年度行った「学会における男女共同参画の実態調査 (2011年6月20日)」から、日本森林学会における研究発表・シンポジウム主催・学会運営への女性研究者の参画はこの10年で確実に進んだことが明らかになった (日本森林学会ホームページ: <http://www.forestry.jp/introduction/gender-equality/report2010.html>)。

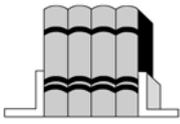
今回ニューヨークで出会ったたくさんのパワーあふれる女性たちから学んだことは、「意思決定過程に積極的に参画する」意識と行動が大切だということだった。

『2020年目標』にむけて、あらゆる分野での女性参画が進むことを期待したい。

表-1 林業人口に占める女性の割合と組合役員における女性の割合

| | 単位: 人, % | | | | | | |
|----------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2008 | 2009 | 2010 |
| 林業就業者数 | 108,000 | 86,000 | 64,000 | 47,000 | — | — | 66,900 |
| 女性就業者数 | 18,000 | 14,000 | 11,000 | 7,000 | — | — | 8,800 |
| 女性割合 (%) | 16.4% | 16.6% | 16.8% | 15.0% | — | — | 13.2% |
| 森林組合役員数 | — | — | — | 13,094 | 10,746 | 10,358 | — |
| 女性数 | — | — | — | 25 | 34 | 35 | — |
| 女性割合 (%) | — | — | — | 0.2% | 0.3% | 0.3% | — |

日本女性監視機構 (2012)。日本における農林漁業女性のエンパワーメント～東日本大震災・原発被害からの復興と課題～ 報告書。(日本女性監視機構発行) に掲載された表を改変。
この表は農林水産省森林組合一斉調査、総務省国勢調査を元に作成された。2010年の値は速報値。
就業者数データについては田中巨氏 (森林総研林業動向解析研究室) のご協力をいただいた。



ブックス

菌類の生物学 生活様式を理解する

D.H. ジェニングス・G. リゼック / 広瀬大・大園享司訳、京都大学学術出版会、2011年4月、222ページ、2,625円(税込)、ISBN 978-4-8769-8556-2

本書は、1996年にD.H. ジェニングス・G. リゼック博士によって書かれた「Fungal Biology, Understanding the fungal life style, second edition」の翻訳書である。中身は、第1部の「菌類の生活様式」、第2部の「菌類をとりまく環境」、そして第3部の「菌類の繁殖」の3部構成となっており、それぞれ4から5つの章で成り立っている。多数の図版、そしてそれほど小さくない文字サイズが用いられており、菌類を研究している方はもちろん、現在菌類を学んでいる学生、またはこれから菌類を学びたいと考えている方でもすんなりと読み進めることができるよう配慮されている。

まず、第1部では、菌類が最も長い時間を過ごすであろう菌糸の世代について、主に生理生態学的視点から解説している。菌糸体の構成物質、そして養分接種様式などを細胞レベルで解説し、糸状の単純な形態である菌糸の生き様を十分に考えさせられる内容である。第2部では、菌類の特に野外環境下での生活様式について解説している。菌類が通常さらされている、基本的な環境要因についてはもちろんであるが、他の生物との相互作用に関する内容も含まれており、菌類が様々な環境条件下で生育し、また自然界で不可欠な役割を担っていることを再認識させられる。そして、第3部では、細胞内の化学的性質の変化に伴う核の移動、有性生殖、そして胞子飛散などについて解説されており、次世代へと繋げる菌類の生き様を考えさせられる。さらに、本書は付録A、B、Cにより本文の内容の理解を深められるよう工夫されている。付録Aは、5つの代表的な菌類の生活環について図版を用いてわかりやすく説明している。しかも、それぞれの生殖構造には核の挙動を示しており、細胞や核の分裂、融合の時期がわかりやすく示されている。付録Bは、本書でふれ

た菌類について、現在の流動的な菌類分類体系に基づいて列挙している。そして、付録Cでは、菌類をさらに学ぶために参考としてもらいたい文献などが紹介されている。

自然界において、菌糸世代は目立たないことが多いが、菌類は菌糸の状態でさまざまな基質などの内部または外部で長い間生存している。また、菌類研究を *in vitro* で行う際、絶対寄生菌といった特別な菌類を除き、人工的に菌類を培養、保存することは必須であり、その際大抵目にするのは、やはり菌糸の状態であろう。本書は、菌糸世代の内容がかなりのページ数を占めており、生活様式を基に菌糸体を解説した、貴重な本であると思う。たとえば、菌類を培養するとき、一度は「なぜ、急に胞子を作らなくなったのだろうか？」とか「どの条件下なら長く培養し続けられるのだろうか？」などと考えたことがあるのではないだろうか。こういった疑問について、この本は大変参考になるであろう。

本書に関して、あえて欲を言えば、繁殖の内容をもう少し紹介してもらえると、さらに菌類の生活様式を理解できるのではないかと、というところだろうか。しかし、上述したように、菌類はかなりの時間を菌糸体で生活していることは間違いなく、その点を考慮し、本書が、構成されたのではないかと感じる。

近年の菌類学は、分子データを基にした仕事が多く、菌類の生態を紹介した読み物が少なくなっているように感じる。本書を読むことは、菌類を改めて生き物としてとらえる良い機会であり、その生き方を知ることは、今後様々な分野の菌類研究を進めて行くうえで、多くのヒントを与えてくれるであろう。また、近年の菌類（特に子のう菌など）における命名規約の大幅な改定により、これまで1つの種に対して2つの学名を与えていた時代が終わろうとしており、菌類が持つ多様な生活様式をしっかりと把握しておくことが益々重要である。そういった観点からも、本書は今の時期に読んでほしい良書の1つである。

廣岡裕史（森林総合研究所）

ホタル学 里山が育むいのち

古河義仁著、丸善出版、2011年5月、144ページ、1,995円(税込)、ISBN 978-4-621-08389-5

大型書店の生物書や昆虫本コーナーを覗くと、一般向けのホタルの関連書が常に何種類か、多いときは5種類以上並べられている。私の書棚にも友人から頂いたものなどが10冊近く並んでいる。他のマイナーな虫を扱っている研究者の間から、『ホタルばかりがなぜもてる』と嫉妬の一言も聞こえてきそう。とにかく、日本人はホタルが好きだ。好きだからホタルの書を購入する。購入する人が多いから、次々とホタル書が刊行されるのだろう。

ここまで書いて、ハッと気づいた。ホタルをよく見たことがないから、ホタルをよく知らないからこそ、それに憧れてホタル書を購入する人が多いのではないかと。ホタルの減少がホタル本の隆盛を築いているのではないだろうか。

たしかにゲンジボタルもヘイケボタルも少なくなった。最近では、ホタルの発生する川には、『ホタルを捕らないで』という趣旨の看板がたいてい立てられているが、昔はあのような看板はどこにもなかった。半世紀前の私の子供時代には、田園地帯ならどこでも、そして都市部でも場所によれば、ホタルは普通に見ることのできる虫だった。子供たちの多くはホタルを捕り、家に持ち帰って蚊帳の中に放して遊んだ。私も『ホタルは捕るものだ』と考えていたし、捕ったからと言って減るようなこともなかった。

しかし、最近の子供の多くは、実物のホタルを見たことがない。遠くまでホタル見物に連れて行ってもらえた子供たちも、ホタルを捕ることは許されない。本や映像で見たホタルの実物を見てみたい、ホタルを捕ってみたいという願望ばかりが強くなる。また、私のような白髪世代にとっては、ホタルが乱舞していたよき世界は、なつかしい郷愁の世界であり、復活させたいと願う人は少なくない。このような願望が、ホタル書がよく売れる理由のひとつかもしれない。

さて、古河義仁著の『ホタル学』だが、他のホタル本と比べると、写真集にあるような美しい写真のページが多く、それ

だけで十分楽しめる。最近では写真のページだけを見て購入する読者も多いので、売するためにはこの戦略は間違っていない。書名に学の文字がついているが、内容的には研究者向けの専門書ではなく、一般向けに書かれたものだ。9種類のホタルについての概要や、生態については、一般向けの書としては十分な内容が記載されている。ゲンジボタルのエサとしてのカワニナについての解説や、最近の研究結果の紹介なども、読者の知的欲求を十分満たしてくれるものだろう。

第5章では最近のホタル復元活動のなかで見られるおかしな状況や、ホタルビジネスへの辛口の批評が述べられている。私も、ホタルイベントやホタルビジネスがホタルの衰退に拍車をかけていると考えているひとりであり、よくぞ書いてくれたと声援を送りたい。ホタルを見たいと考えている人の多くは、ホタルの光さえ見ることができれば良いと考えている。そのような人々にとってはイベントでも何でも良いのだろうが、現在の日本のホタルの生残状況は、そのような浪費に耐え続けられるようなものではない。

また、ホタルを復元したいという人の中には、ホタルだけしか見えていない人も少なくないが、ホタルの復元だけに目を向けるのではなく、生態系全体をかさ上げするような復元活動が必要だろう。コモチカワツボというカワニナの稚貝によく似た外来種の巻貝が最近国内で分布をひろげている。小さな令のゲンジボタル幼虫の餌として、一時注目を浴びた巻貝で、この貝の分布拡大とホタルの復元活動との関連が疑われている。ゲンジボタル幼虫の成長を助けるためと言っても、外来種を河川に放流するようなことは絶対してはいけない行為だ。著者はよくご存じだと思うが、残念ながら、本書にはここまでは書いていただけなかった。

付録として41ページも使って、世界中に生息する2791種のホタルの学名が羅列されているが、一般の読者にとってはほとんど意味のないページだと思う。この41ページのために本書を購入する研究者が多数いるとも思えない。本書のページ数に、ラテン語の羅列に使うだけの余裕があったのだったら、素晴らしい里山の蜜の写真を増やして欲しかったと考えるのは私だけではないだろう。

市川憲平（姫路市立水族館）

図説 日本の樹木

鈴木和夫・福田健二編著、朝倉書店、2012年4月、208ページ、5,040円（税込）、ISBN 978-4-254-17149-5 C3045

『図説 日本の樹木』というタイトルから、樹木図鑑のような専門書を想像されるかもしれない。しかし、前書きに『専門の人々のみならず、いま初めて森林樹木に関心を抱き始めた人々への誘いとしてまとめた』、『わかりやすさと親しみやすさを念頭に平易でストーリー性のある内容の記述に努めた』とあり、堅苦しさのない、読んで楽しめる一冊である。学術用語や形態的な特徴に関する記述が少ない一方で、樹木の生態や歴史、文化にまつわる話題がちりばめられており、カラー写真も充実している。専門外の人には巻末の用語解説もありがたい。

冒頭の『総論』では、地質年代や気候との関連で森林の歴史や森林帯の区分とその特徴が紹介されており、また植物の分類や樹木の形態的特徴と見分け方について簡潔に解説されている。これから森林や樹木について学ぼうとする人々にとって、我が国の森林の概要を理解し、個々の樹木について名前や特徴を知る手助けになる。

我が国の樹木は1000種(species)を超えるが、『各論』で取り上げられているのは、外国原産樹種を含め人々の生活に関わりの深い樹種100種*である。和名の由来や外国産樹種の場合は渡来の経緯、歴史や文化なども触れられている。ゲッケイジュにまつわるギリシャ神話や、法隆寺百済観音像をはじめ飛鳥時代の木彫仏のほとんどがクスノキの材であることなど、雑学的な話題が豊富で読みやすい。

なじみのない人々にとって、樹木は松や桜など属(genus)のレベルで区別することが多い。そうしたことから、この100種*の上位概念である80属のうち、世界で親しまれている樹木55属*について丁寧な解説が加えられている。さらにこれらの上位概念である科(family)について、マツ科やブナ科、バラ科など身近な樹種を多く含む10科を取り上げ、それぞれ1ページ前後を割いて紹介している。いずれも『平易でストーリー性のある内容』という編著者の意図が読み取

れる内容となっている。

この本のもう一つの特徴は、森林生態系で大きな役割を持つ菌類、キノコを取り上げていることである。『総論』の中では、枯死木の分解や樹木との共生など森林・樹木と関連する菌類の営みや、キノコの特徴と見分け方について、わかりやすく解説している。また『各論』では、コラムの形でハナイグチやショウロ、ナラタケなど13の主要な菌類、キノコを取り上げて個別に解説しており、一般の人々にとって野山などで何気なく目にするキノコが、森林・樹木にとってなくてはならない存在だと知るきっかけになるであろう。

名前は『図説』であるが、この本は森林・樹木を題材とした短編集のようで、身近においてパラパラとページをめくるのにぴったりだ。枕元において寝る前に読んだり、鞆に入れて通勤電車の中で眺めたりしている。私事であるが、この4月から日本大学生物資源科学部で教鞭を執っており、担当する樹木学の講義で早速この本を活用させていただいている。偶然にも講義終了時の到達目標が主要樹種100種について知ることなので、副読本としてもちょうど良い。森林・樹木に関する読み物として、専門の人にもそうでない人にもお勧めしたい一冊である。

丸山 温

(日本大学生物資源科学部森林資源科学科)

*：マダケ属、モウソウチクを入れると56属101種

北海道の森とミツバチ

真坂 一彦 (まさか かずひこ、北海道立総合研究機構林業試験場)

日本は南北に長い島国のため、養蜂家のなかには花を求めて日本を渡り歩く人々がいます。そのような生業を転飼養蜂、あるいは転地養蜂といいます。日本のもっとも北に位置する北海道には、花の開花前線を追いかけるように多くの養蜂家が道外から渡って来ます。もちろん北海道在住の養蜂家もたくさんいます。

私たちの社会が養蜂家のミツバチ(セイヨウミツバチ)に大きく負っている実態があることを、私たちは、近年のミツバチ不足による果樹野菜の高騰によって身をもって知りました。養蜂家が飼うミツバチの一部が農家に貸し出され、花粉交配に用いられているのです。イチゴなどはその最たる作物で、最近では、晩冬から早春にかけての風物詩として、花から花へと飛び回るミツバチの様子がテレビで観られるようになりました。ミツバチに頼るのは‘食べるための果実’ばかりではありません。玉葱や人参などは種子生産のためにミツバチが使われます。

ところが、花粉交配だけに従事するとミツバチの群は衰退してしまいます。果樹野菜の花粉や花蜜の量が少なく、また栄養価が低いものが多いためなどと言われています。たとえばデパートなどでアカシア蜜やレンゲ蜜はよく見かけますが、メロン蜜はどうでしょう。地域によってはピロ蜜やサクラソビ蜜などがありますが、ミツバチを必要とする作物の多さの割には見かける商品の種類も数も少ないと思います。もっとも、デパートの陳列棚に並ぶ蜂蜜は外国産が幅を利かせています。

ミツバチの群を建て直すことを建勢と呼びます。建勢のためには野生植物が必要です。東日本はニセアカシアとトチノキなどによる「山の蜜源」、西日本はレンゲやミカンなどによる「里の蜜源」と

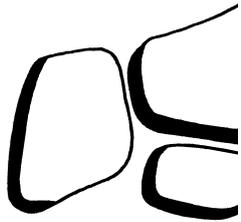
評されることもありますが、温帯域では樹木が主要な蜜源です。これは、草本がほぼ平面的にしか花が着かない一方、樹木は立体的に花を着けるためでしょう。これらの蜜源植物は採蜜のための対象であることは当然ですが、建勢にも大きく貢献します。

北海道における主要蜜源は、蜂蜜生産量が多いものから順に、ニセアカシア、シナノキ、クローバー、キハダ(シコロ)、アザミ、ソバ、そしてトチノキです。これら七種の蜂蜜生産量に占める樹木蜜源の割合は約七割、これに森林植生のアザミを加えると八割にのぼります。私たちの食生活を支えているミツバチが、森によって養われていると言っても過言ではありません。ただ、これらの蜜源植物の分布には地域性があります。トチノキの自然分布は道南に限られますし、ニセアカシアは旧産炭地の空知や海岸緑化が行われた石狩以南の道南に多く見られます。クローバー蜜がよく採られるのは牧草地が多い道東、そしてキハダやシナノキ、アザミ、ソバの蜂蜜はおもに道北で採られています。このうち、キハダ蜜やアザミ蜜は北海道だけで採られているそうです。採蜜用だけに使われた蜂群は、収まる蜂箱がときに最大で三段重ね(総重量で50~60kg)になるまで成長できます。採蜜や蜂場の移動の際にはそれを一つ一つ担がなくてはなりません。養蜂家のなかには数百群の蜂群を飼養している方も多く、最盛期には寝食の時間を削ってでも採蜜しないと捌けないそうです。ちなみにニセアカシアが豊作の年には、一群あたり6~7升のアカシア蜜が採れるそうです。また、三段重ねの蜂群では年間を通して100kgの採蜜も夢ではないと言います。

怒涛のように慌ただしい夏を駆け抜け

ると、北海道ではハリギリが咲く頃から採蜜は終了し始めます。転飼養蜂家だけでなく、道内在住の養蜂家の多くもミツバチの越冬のため道外に渡る準備に浮足立ちます。いかに冬を越すかが翌春から

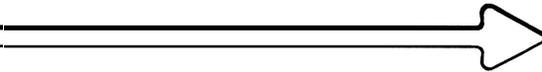
北から



日本森林学会の旧九州支部は昨年10月に九州森林学会を設立し、新たな体制に移行した。新学会への移行はスムーズに進んだが、その背後では会員数

の採蜜に大きく影響するのです。

自然を相手にミツバチとともに夏は涼しい北海道で過ごし、冬は暖かい越冬地で過ごす彼らの生き方に羨望を覚え、ロマンを感じる人は多いのではないのでしょうか。



南から

日本森林学会支部だより

の減少などいくつかの問題が頭をもたげている。私見では、新学会は時代の変化の中でいかに組織として立て直しを図るかという課題を背負わされていると感じ

ており、それについて以下述べてみたい。

九州森林学会（旧九州支部）の主たる活動は年に一回の大会開催と論文集発行である。大会は秋に行い、その後に投稿を閉め切って春に「九州森林研究」を発行している。大会開催は各県持ち回りで、開催県に大会運営委員会を組織していただいている。大会以外の運営は、会長以下、常任幹事、編集幹事、HP 運営担当者が分担する。琉球大学分会、佐賀県林業試験場分会のように主な大学、試験研究機関、県庁、九州森林管理局などに27の分会を設置し、分会幹事を置いている。会員数は300人程度だが、その9割はこれら分会に属する。

会が抱える明らかな問題の一つは会員数の減少である。ピーク時の1970年代には800人近くいたが、その後減り続け今年300人を切るかもしれない。当時の会員構成が分からないが、行政職員の入会が大きく減ったのではなかろうか。研究者も各機関の縮小により減っている。分会があることで大学、試験研究機関の研究者、学生の組織率は高いが、行政職員は今や充て職で入っていた多い。

大会での発表件数は記録のある1980年の199件から昨年の126件まで減少しているが、会員数の減少ほどではない。片や論文集への掲載本数は同期間に168本から57本へと大きく落ち込んでいる。近年大会は学生の発表の場として多く活用されるようになってきている。投稿数の減少は、「九州森林研究」も体裁を整えるなど努力しているとはいえ、全国誌、国際誌に流れてしまうためだろうか。

論文集の発行部数も大きく落ち込んでおり、これと会費収入の減少のために、予算は大幅な縮小を余儀なくされている。その影響もあり、ここ数年は毎年行ってきた大会時のシンポジウムを開催して

いない。

このように往時と比べると寂しい現状ではあるが、それでもこの学会はなくてはならない場だというのが、会に集う九州の林学研究者の多くの共通認識ではなかろうか。九州の話題を九州で話せる、聞ける機会というのはやはり有難い。沖縄県は別だが、現在では九州内の交通網が発達したこともあり、秋の一日土曜日に九州のどこかで研究発表会があるというのは便利な仕組みである。学生を連れて行くにも都合がよい。発表の題目も、例えば低コスト造林、シカ食害問題、台風被害、火山防災、竹林管理など九州らしい話題が多い。各県の試験研究機関の研究者による地域の課題と直結した発表が多く聞けるのもこの学会の利点である。実学である林学において、このようないわば地域の地域による地域のための研究発表・情報交流の場があることは大事なことであろう。

九州森林学会はこの地域に根ざした学会としての存在意義を大事に、組織の立て直しを図らねばならない。一方では、予算の縮小に伴い、運営のスリム化が必要である。近年は毎年赤字決算が続いており、繰越残高も底が見えてきていることから、これは差し迫った課題である。しかし、運営をスリム化するばかりでは活動の低迷、ひいては学会の存在意義の低下を招きかねない。休止しているシンポジウムその他の催しを活用する手はないのか。今後フォレスターとしての役割も期待される行政職員に積極的に参加してもらう道はないのか。これらは地域に根ざした学会として考えていくべき課題である。加えて、こうした課題に取り組むことを考えた場合、運営体制も年に一度大会時に集まるだけの今のあり方でよいものか、再考の余地があるように感じる。

新たに設立した九州森林学会の課題

藤掛 一郎（ふじかけ いちろう、宮崎大学農学部、九州森林学会常任幹事）

森林科学 66

予告

特集

海岸林の再生に向けて—平成 23 年東北地方太平洋沖地震津波と海岸林— (仮)

森めぐり

イーハトーブの森—岩手大学演習林— (仮)

高野山スギ特別母樹木 (仮)

森林科学 66 は 2012 年 10 月発行予定です。ご期待ください。

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、双方向情報交換を实践したいと考えております。手紙、fax、e-mail で編集主事までお寄せ下さい。
- ・日本森林学会サイト内の森林科学のページでは、創刊号からの目次がご覧いただけます。また、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。
- ・56 号以降については、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。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 | 田中 浩 (森林総研) |
| 委員 | 壁谷 大介* (造林/森林総研) |
| | 宮本 麻子* (経営/森林総研) |
| | 藤田 曜 (動物/自然環境研究セ) |
| | 清水 貴範 (防災/森林総研) |
| | 谷脇 徹 (保護/神奈川県自然環境保全セ) |
| | 笹川 裕史 (経営/日本林業技術協会) |
| | 橋本 昌司 (土壌/森林総研) |
| | 都築 伸行 (林政/森林総研) |
| | 磯田 圭哉 (育種/森林総研林育セ) |
| | 菅原 泉 (造林/東京農大) |
| | 吉岡 拓如 (利用/日本大) |
| | 田中 憲蔵 (造林/森林総研) |
| | 宮本 敏澄 (北海道支部/北海道大) |
| | 白旗 学 (東北支部/岩手大) |
| | 逢沢 峰昭 (関東支部/宇都宮大) |
| | 相浦 英春 (中部支部/富山県森林研) |
| | 芳賀 弘和 (関西支部/鳥取大) |
| | 津山 孝人 (九州支部/九州大) |

(*は主事兼務)

編集後記

森林科学の編集委員になり数年がたった。編集委員会ではいろいろと特集のネタを皆で出し合い、その中から特集のテーマが選ばれているのだが、今回は私が提案した「根」が採用され、私が担当編集委員となった。

なぜ、根を選んだのか？いくつか理由がある。単純には、すぐ近くに野口享太郎氏という日本における根研究の主要メンバーの一人がいたというのがある。しかしもっと重要な理由の一つは、炭素循環という森林における研究の大きな一つの分野で、その重要性にもかかわらずわからないことが多いのが根の部分だからである。樹木が根にどのようにどれくらい光合成生産物を配分しているのか、根がどれくらい生産・枯死しているのか？葉っぱで置き換えて考えれば、かなり研究が進んでいるような謎に対して、根や根周辺の事はまだまだわからないことが多い。重要だけれどもわかっていない所、そこは研究がもっとも活発に行われる所でもある。もう一つの理由は、研究コミュニティが構築されているということだ。研究というと、実験・観測して、データを取って、学会で発表して、論文を書いて、という流れではあるが、その分野における研究コミュニティを構築し、それに参加していくということもとても重要な研究活動の一つである (最近になってやっと気づいたのだが。。。)。外から見ていると、根に関する日本の研究

者が密に連絡を取り合い、学会でセッションを毎年企画し、海外の根コミュニティと交流し、研究資金をとりにいき、論文を書きと active で fruitful なコミュニティが形成されている。そのようなわけで、もし森林科学の特集を依頼しても、最先端のおもしろい内容で容易にページを埋められると思ったし、あまり気づかれてないけれども重要な根の話は読者にとっても有益に違いないと思った。

さて、出てきた原稿は予想通りどれも最先端でおもしろい話ばかりだった。その中でも個人的には、細根と土壌動物の相互作用にはちょっと興奮してしまった。落葉分解者と考えられてきた土壌動物が、細根由来の炭素にエネルギー源を大きく由来しているなんて。たとえばトビムシ。でも、そのトビムシが何を食べているかはわからない、と。これまで根の周りで生きる土壌動物たちにまで思いをはせることはなかったので、とてもわくわくした。

最後になりましたが、急なお願ひ、それもひときわご多忙な時期にもかかわらずとりまとめをお引き受けくださった森林総合研究所の野口享太郎氏をはじめ、今回執筆くださった皆様に心より御礼申し上げます。そしてますますの研究の発展をお祈り申し上げます。

(編集委員 橋本 昌司)

「森林科学」への投稿について

「森林科学」投稿規定

(2009年3月26日改定)

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解読、記録は4ページ以内、研究トピックス、読者の声、その他は2ページ以内とする。解説と研究トピックスについては、やむを得ない場合は規定ページ数の1.5倍まで認め、超過分は著者の負担とする。
5. 投稿原稿は執筆要領にしたがい作成し、電子メールまたは郵送で提出する。郵送で提出する場合は、オリジナル原稿(1部)を書留便で送付する。
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)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。

著作権規定

(2009年3月26日改定)

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

(2009年3月26日改定)

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ページに1つの図(イラストを含む)や写真を入れるようにする。

2. 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

ボックス：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

解説・記録・研究トピックス：以下を別紙①～⑤にそれぞれ記載する。①表題、著者名、所属先、原稿種類名、別

刷数(希望する場合のみ、50部単位)、連絡先(住所、電話番号、FAX番号、電子メールアドレス)、②本文、③引用文献(必要な場合のみ、目安として最大10点程度まで)、④図、表、⑤図の説明

読者の声・その他：以下を別紙①～④にそれぞれ記載する。

①表題、著者名、所属先、原稿種類名、連絡先(住所、電話番号、FAX番号、電子メールアドレス)、②本文、③図、表

ボックス：紹介する印刷物の書誌情報(書名、編著者名、総ページ数、出版社名、発行地、発行年、定価、付与されている場合はISBN)、本文、紹介者名、紹介者連絡先(住所、電話番号、FAX番号、電子メールアドレス)

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「原稿作成の目安」を参照のこと。

図、表の表題にはそれぞれ通し番号(図-1、表-1など)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。

手書き原稿も受け付ける。手書きの場合は400字詰め原稿用紙(A4版、縦型、横書き)に黒ペンで書き、図表や写真などの扱いは慣例に従う。

5. 引用文献

引用文献は必要最小限とし、アルファベット順に記載する。本文中での引用はアルファベット順で記載した通し番号で(1)、(2)、(3)のように引用するか、該当人名に(年号)あるいは事項に(人名、年号)をつけて引用する。混用はしないこと。誌名の略記法は和文の場合は慣例により、欧文の場合はForestry Abstractsにならう。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。単行本の場合は総ページもしくは引用ページを記載する。記載例は「日本森林学会誌執筆要領」を参照のこと。

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 壁谷大介

〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

森林総合研究所

植物生態研究領域

Tel 029-829-8220

Fax 029-829-8220

e-mail kabeta@fpri.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

http://www.forestry.jp/

(日本森林学会)

http://www.forestry.jp/publish/ForSci/

(森林科学)

複写をされる方に： 学協会著作権協議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 学協会著作権協議会 (Tel./Fax 03-3475-5618)

「ぽんっ」と叩いて即座に診断。 — 打撃音樹内腐朽簡易診断装置 —

ぽん太



○今まで樹木医などの専門家でしか判断できなかった打診音を客観的な数値で評価できます。
○多くの大学や協会からも推薦をいただいています。

樹種を選び、周長を計測・入力、あとは「ぽんっ」と5回叩けばOK。

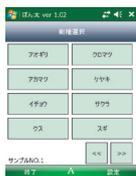
① 機種種の選択

測定する樹種を選択します。樹種ごとに値が異なりますので、正しい樹種を選んで下さい。

※下記の14樹種に対応しております。H23.10現在

- ・アオギリ
- ・フラタナス
- ・クロマツ
- ・イチヨウ
- ・トウカエデ
- ・アカマツ
- ・クス
- ・モミジハウフ
- ・スギ
- ・ケヤキ
- ・ユリノキ
- ・ボブラ
- ・サクラ
- ・ヒノキ

今後、随時樹種を追加します。
追加した場合は、無料でアップデートいたします。



② 直径の入力

メジャーで直径を測ります。



測った直径を入力します。
数値の入力は指でできます。

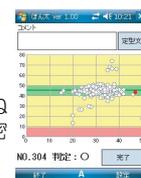
③ 打診音の計測

胸高の位置を、専用のハンマーでリズムカルに手首を使って5回打撃します。



④ 判定結果

今まで測定したデータとともに、今回測定した結果が表示されます。緑の範囲にはいっていただければおおむね健全です。黄色、赤の範囲では精密診断を要します。



片手で持てるコンパクトさ。
優れたコストパフォーマンス。



ぽん太

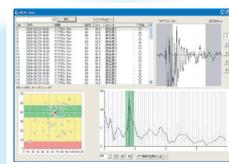
価格：189,000円
重量：306.5kg
外形寸法：
縦 144.2mm
横 82.2mm
重量 306.5g

専用打診ハンマー

価格：1,680円



最適な打撃音を出します。



データ分析・帳票用印刷プログラム

(Windows用)

価格：48,300円

開発・製造・販売

詳しくはコチラ...

ワールド測量設計

検索



株式会社ワールド測量設計

〒693-0013 島根県出雲市菟杵町274-2

TEL: 0853-24-8133 URL: <http://www.world-ss.co.jp/>

FAX: 0853-25-0299 メール: ponta@world-ss.co.jp

街路樹

公園樹等の正確

迅速な腐朽診断を実現!