



森林

科学

〔特集〕

遺伝子から読み解く森林

フォーラム（新連載）

「森林学の過去・現在・未来」

シリーズ

森めぐり

大台ヶ原

カンボジア国コンポントム州・常緑林流域試験地

No. **62**
June 2011



特集 遺伝子から読み解く森林

樹木の遺伝的変異の研究と森林・林業
吉丸 博志

2

熱帯アジア産樹木の進化と生物多様性に
関する DNA 研究
上谷 浩一

3

遺伝子でみる森林樹木の繁殖・更新プロセス
井鷲 裕司

8

熱帯雨林における花粉散布と択伐基準、
次世代実生の遺伝的組成と更新
谷 尚樹

13

樹木の環境適応的遺伝子
津村 義彦

19

森林科学 No.62

2011 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：カンボジア常緑林下の大型土壌断面。厚い土層が十分な水を貯えることで、乾季にも蒸散を続ける常緑林の成立を維持している。

シリーズ森めぐり「カンボジア国コンボントム州・常緑林流域試験地」より (27 ページ)

フォーラム 「森林学の過去・現在・未来」(1)

フォーラム「森林学の過去・現在・未来」の趣旨 24
井上 真

国際森林年にあたって 24
宝月 岱造

シリーズ 森めぐり
大台ヶ原 26
古澤 仁美

カンボジア国コンボントム州・常緑林流域試験地 28
鳥山 淳平

コラム 森の休憩室Ⅱ 樹とともに
樹木は動かない 30
二階堂 太郎

シリーズ 現場の要請を受けての研究

31 山形県のナラ枯れ被害で研究者と現場技術者が
活用する被害予測技術と総合防除システム
斉藤 正一

シリーズ うごく森

35 里山利用で森をうごかす
宮浦 富保

シリーズ 森をはかる

41 土地分類図を定量化する
佐野 真琴

42 山菜・キノコ採りの生態系サービスをはかる
松浦 俊也

43 Information

ボックス
北から南から

樹木の遺伝的変異の研究と 森林・林業

吉丸 博志 (よしまる ひろし、森林総合研究所)

本特集では、自然状態の樹木・森林の遺伝的変異を研究する中から、保全と利用という人間活動に必要な情報がどのように引き出されてくるかを、なるべくわかりやすくお伝えしたいと考えている。

各樹種は分布範囲全体で見ると非常に多くの個体から成り、異なる地域間の同種の間では長い歴史の中で何らかの繋がりを有している。またさらに長い歴史を考えると、近縁種との間は進化的な関係で繋がっている。いっぽう、林分の中では様々な樹齢の同種個体が繁殖・更新に関わっており、さらに樹種間および多数の生物種との間に様々な生物間相互作用を形成している。

樹木の遺伝的変異の研究は、時間・空間的スケールの大きいほうから順にみると、種間の進化的関係、種内の地域間での遺伝的分化、そして地域内・林分内での繁殖・更新過程という、森林の歴史と現状を理解しようとするものである。以下に本特集を概観しよう。

1. 種間関係と進化・多様性

近縁種間の関係は、葉緑体 DNA や核 DNA 等の相同な（起源が同じ）遺伝子における種間の違いを基にして解析する。上谷による「熱帯アジア産樹木の進化と生物多様性に関する DNA 研究」では、フタバガキ科樹木を対象にして種間関係を数量的に示すとともに、種内の遺伝的変異が種間のそれよりも大きくなる事例や、同属近縁種の共存メカニズムについても触れている。また、DNA 情報から算出される「系統的多様性」は、生物多様性のホットスポットを評価する尺度としても重要である。

2. 種内における遺伝的分化

自然分布が広範囲にわたる樹種で地域間の遺伝的分化が大きい場合には、苗木の遠距離移動による遺伝子攪乱の問題が生じる。これについては、本誌 54 号の津村 (2008) により解説されているので本特集には含めていないが、その後の研究も加えて「広葉樹の種苗の移動に関する遺伝的ガイドライン」(津村ら 2011) が提案されている。

3. 繁殖・更新プロセス

森林の世代更新においては花粉の送受粉や種子散布を通じた繁殖プロセスがあり、遺伝子の流動を必ず伴うことから、母樹、花粉、種子、実生、稚樹などを対象とした遺伝的変異の研究は、遺伝マーカーという優秀なトレーサーを用いた更新過程の詳細な解析を実現した。

井鷲による「遺伝子でみる森林樹木の繁殖・更新プロセス」では、ホオノキ、トチノキなどを対象にして、花粉や種子の移動実態やそれに関わる昆虫・動物等の働きが明らかにされる。繁殖プロセスの数量的な理解は森林の適切な管理・保全に貢献する。

谷による「熱帯雨林における花粉散布と択伐基準、次世代実生の遺伝的組成と更新」では、花粉の送受粉パターンの解析を林業上の択伐基準設定に応用する。マレーシアのフタバガキ科樹種を対象に、持続可能な他殖による更新を維持するための択伐基準の改善方向が示される。

4. 環境適応的遺伝子の探索

ここまでの研究で用いられている遺伝的変異は、そのほとんどが自然選択にほぼ中立なものである。いっぽうで、異なる環境への適応に関与する遺伝的変異の探索も始まっている。津村による「樹木の環境適応的遺伝子」では、様々な探索手法別にスギを含む針葉樹やポプラ、ユーカリ等における先駆的な研究事例が紹介されている。今後、適応の違いを示す遺伝マーカーの開発への進展が期待される。

引用文献

津村義彦 (2008) 広葉樹の植栽における遺伝子攪乱問題．森林科学 54 : 26-29.

津村義彦ら (2011) 広葉樹の種苗の移動に関する遺伝的ガイドライン．森林総合研究所第 2 期中期計画成果 20. <http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/documents/2nd-chukiseika20.pdf>.

熱帯アジア産樹木の進化と生物多様性に関する DNA 研究

上谷 浩一 (かみや こういち、愛媛大学農学部)

1. はじめに

種が自然の中で生き残れる可能性は、遺伝的多様性の喪失によって低下する。生物を取り巻く環境は時間的空間的に一定ではない。もし遺伝子プールが多様であれば、環境変化に伴ってその中から最適な遺伝子の組み合わせが利用可能になるので、遺伝的多様性の維持は生物種の存続にとって重要である。環境変化によって種の分布と個体群サイズは変動し、それが遺伝的変異量や変異パターンに変化をもたらす。絶滅に瀕した種を救済し短期的に保全するだけでなく、進化的プロセスも含めた長期的視野に立った保全を考える際には、特に、このような遺伝的変異の情報が重要となってくる。

本稿では、樹木集団を対象とした進化と生物多様性に関する DNA 研究の一例として、筆者らが行ってきた熱帯アジア産フタバガキ科樹木を対象とした研究について解説すると同時に、DNA 研究が生物多様性の本質的理解や生物多様性保全にどのように役立つのかについて考えてみたい。

2. 分子系統解析から見えてくるもの

分子系統学は DNA データに基づいて生物の進化してきた道筋を明らかにする系統学の一分野である。多くの分子系統学的研究では、従来の形態情報に基づいた系統分類の妥当性が評価されている。フタバガキ科樹木の分子系統学的研究においても、実際、DNA データを得ることによって、いくつかの新しい知見が得られた (Kamiya *et al.*, 2005 ; Tsumura *et al.*, 2011)。

アジア熱帯に見られるフタバガキ科は 13 属ある。その中でも種数において最も大きな属がショレア (*Shorea*) 属である。200 種ほどあるショレア属の種は、材質によって区別される 4 グループ (バラウ、レッドメランチ、ホワイトメランチ、イエローメランチ)、タイやフィリピンなどに分布するペンタクメ節やスリラン

カに固有のトゥーナ節などが知られている。図-1 はこれらショレア属内で知られている分類学的グループの系統関係を DNA データから再構築したものである。この図から、ショレア属の下に位置づけられたグループ間に見られる遺伝子の相違は、ホペアやパラショレアといった別の属として認識されている分類群間での相違と同等かそれ以上であることがわかる。また単型の属であるネオバラノカルパス属は用いた遺伝子領域によってホペア属に近縁である場合とショレア属ホワイトメランチに近縁である場合の 2 パターンが見られ、この属が雑種起源である可能性が示された。このように、DNA の解析を行ってみると、従来の見方とは異なる新しい知見を得ることができる。

DNA 情報を用いた系統進化に関する研究は、他の研究分野にとっても役立つ情報を提供する。本来、種分類は形態情報に基づいて行われているが、多種多様な生物が生育する熱帯地域では、しばしば種同定が困難であり、同定ミスが起こりうる。Dexter *et al.* (2010) は、種同定のエラーを含んだデータは熱帯林樹木群集の生態学的調査の結果に影響を与えることがあるため、分子データも加味したより正確な種同定をおこなうことが重要であることを強調している。

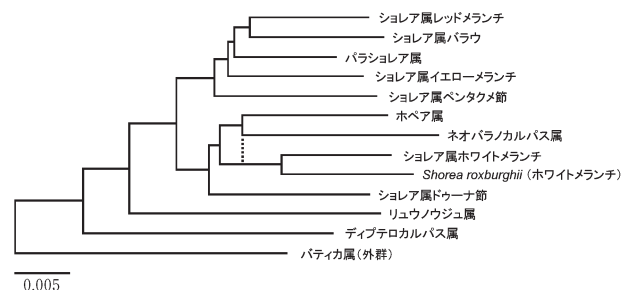


図-1 DNA 塩基配列データに基づいて再構築したフタバガキ科ショレア属とその近縁属内グループ間の系統関係

保全計画立案の際、保護地域の優先順位をつけるために生物多様性のパターンを示すデータが必要な場合がある。このような場合、誰もが直感的に認識できる種の豊富さが評価基準となることが多い。生物多様性のホットスポットとして知られている南アフリカ喜望峰地区は、東部より西部で種の多様性が高い。従って、保護の優先順位は西部の方が高いと考えられるが、DNA 情報から算出された「系統的多様性」は東部で高かった (Forest *et al.*, 2007)。つまり、東部では種数は少なかったが、種間での遺伝的な違いが大きかったのである。系統的多様性は系統間で見られる遺伝的差異の総和として定義され、進化的、生物地理学的な歴史が要素として含まれる。これは、生物多様性を評価する尺度のひとつとして遺伝子系統樹の情報をを用いた例である。

3. 種間の遺伝的差異 > 種内の遺伝的変異とは限らない

一般的に、種間での遺伝的差異は種内の遺伝的変異よりも大きいと考えられる。これは種内の遺伝子の分化が種間のそれよりも後に起こったと考えると、当然の結果のように思われる。しかしながら、必ずしもそうではないことが野生生物集団の DNA 解析から明らかになってきた。

図-2 はフタバガキ科の *S. curtisii* で見つかる様々な葉緑体遺伝子のタイプ (ハプロタイプ) の起源を明らかにするために、ショレア属他種の遺伝子配列情報を含めて描いた遺伝子系統樹である (Kamiya *et al.*, in press)。この種はマレー半島全体に分布していると同時に、ボルネオ島北部の海岸に近い丘陵地帯に隔離した集団が見られる。葉緑体の塩基配列を調べると、マレー半島集団とボルネオ集団には大きな遺伝子の違いが存在し、これら地域集団の遺伝子は単一の進化系統に由来しないことがわかった。図-2 を見てみるとマレー半島型とボルネオ型の遺伝子の共通祖先にさかのぼるまでに、多くの他種の遺伝子が分岐しているのがわかる。

DNA 変異を調べることによって、形態では同種として扱われている種の集団間に、

非常に高い遺伝的変異の存在が見いだされる場合がある。遺伝的に異なる集団を植林に用いると、植林集団と在来集団間での交雑が起こることによって、在来集団固有の遺伝子プールが失われてしまうことが危惧される。このような現象は遺伝子攪乱として知られており、これを防止するためには、植林に用いられる種子や苗木の由来をあらかじめ DNA 分析によって明らかにしておく必要がある。

4. 種系統樹と遺伝子系統樹が一致しない要因

先に述べたフタバガキの例のように、近縁種を含んだ遺伝的変異の解析をおこなうと、遺伝子の系統関係が種の系統関係と一致しないことがしばしば起こる。ここで

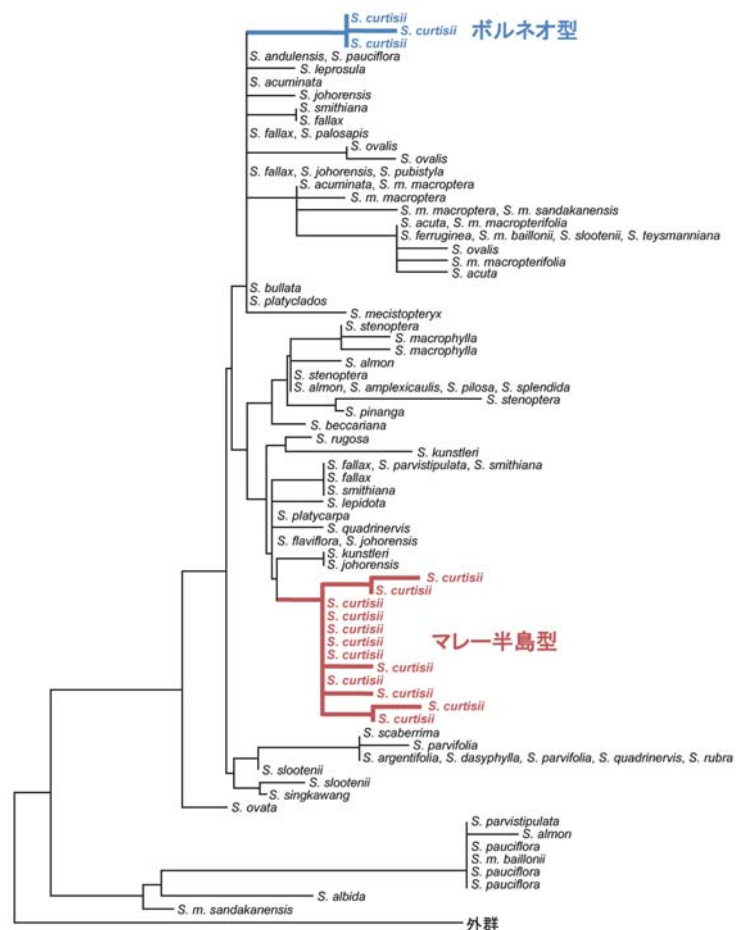


図-2 葉緑体遺伝子の塩基配列に基づいて作成したショレア属複数種の近隣結合系統樹 (Kamiya *et al.*, in press を改変)。 *Shorea curtisii* 以外の塩基配列データは Tsumura *et al.* (2011) によって決定されたものを引用している。

は、このような現象の要因について簡単に説明する。

種分化とは新しい生物種が誕生する進化プロセスであり、図-3のように1祖先種が2種に分化することを行う。図-3 (A) に示した4遺伝子の系統関係をたどっていくと、種Aで観察された遺伝子1と2、そして種Bで観察された遺伝子3と4の分化は、種分化の起こった後に起きている。このような場合、種の系統関係と遺伝子系統樹の結果は一致する。しかし、図-3 (B) のようにそれぞれの種で観察された遺伝子の分化が種分化よりも前に起こっていれば、遺伝子系統樹は種の系統関係を反映しない。この場合、種分化以前の遺伝子の分化は祖先種内で生じたものであり、これは祖先多型と呼ばれる。また、それぞれの種で観察される遺伝子の分化が種分化後に起こったとしても、雑種形成によって両種間で遺伝子移入が起こっていると、遺伝子系統樹は種の系統関係を反映しない(図-3 (C))。このような現象が頻繁に観察されるような分類群では、未知のサンプルのDNA情報から種を決定するDNAバーコーディングの手法を適用することが困難になる。

5. 同属種の共存メカニズムと種間雑種の研究

東南アジア熱帯樹木の高い種多様性のもつ特徴は、多数の同属種が共存していること、そしてそれらの多くが分布範囲のごく限られた固有種であることである。同属近縁種の共存メカニズムを明らかにすることは、熱帯林の生物多様性研究の中で最も重要な課題の一つである。熱帯地域における大面積調査区の調査でわかったことは、これらの種の多くが森林内で集中分布していることであった(Condit *et al.*, 2000)。マレーシア・ランピル国立公園内の森林では、形態学的・生理学的特性も似通っていると考えられるフタバガキ科同属2種が砂質の尾根と粘土質の谷という異なった立地環境に分かれて分布している(伊東ら 2006)。この結果は、個々の種は互いに生態学的な特性が異なり、特定の環境条件に特殊化していることを示している(ハビタット特異性)。また、フタバガキ科同種個体稚樹(胸高直径10 cm以下)の分布は土壌条件よりも地理的距離とより強い相関があり、この結果は稚樹の分布を決めている要因として親木からの種子散布距離がより重要であることを示唆している(Paoli *et al.*, 2006)。このように種の分布を決めるメカニズムには、「ハビタット特異性」と「種子散布制限」の2つが重要であると考えられている。

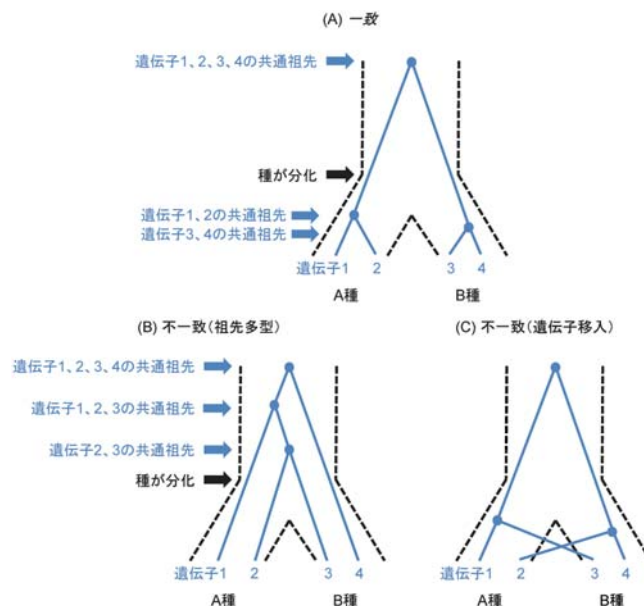


図-3 種の系統関係と遺伝子の系統関係が一致する場合 (A) と不一致の場合 (B) (C) の例

近縁種が同一森林内で互いに異なる立地を好んで生育していれば、種間での競争関係は回避され、共存が可能になる。一方で、近縁種が永続的に別種として共存するためには、これら種間での生殖隔離が保証されていなければならない。実際、熱帯林に生育するこれらの同属近縁種間で交雑可能なものであろうか？そして、雑種形成はどのような理由で起こっている(または制限されている)のであろうか？

我々は、シンガポールのプキティマ自然保護区に生育する3種のショレア属近縁種(*S. curtisii*, *S. leprosula*, *S. parvifolia*)の間で起こる雑種形成の有無を調査した(Kamiya *et al.*, 2011)。胸高直径30 cm以上の個体の空間分布は種間で異なっており、*S. curtisii*が尾根の乾燥したところに分布していたのに対して、*S. leprosula*と*S. parvifolia*は谷の近くに分布していた(図-4)。そして、2種の間隔的な形態をもつ雑種個体が複数見つかり(図-4 (D))、DNA分析の結果、これらは2種のゲノムをヘテロに持つ雑種F1であることが判明した。また、見つかった雑種のほとんどは、*S. curtisii*と*S. leprosula*を親に持つ個体であった。

フタバガキ科樹木はその他の林冠構成種とともに、数年に一度、群集規模で開花を同調させる(一斉開花)。この時、同所的に生育するいくつかのショレア属近縁種

は互いに開花時期をずらしていることが知られている (Chan and Appanah, 1980)。著者らは、2009 年にシンガポールで開花調査を行い、マレーシアのパソーで行われた Chan and Appanah の研究と同様、近縁種の開花時期が異なっており、さらに開花する種の順番も同じであることを明らかにした (図-5)。異なる森林でショレア属が同じ順番で開花することは、各種の開花時期が遺伝的に決まっている可能性を示唆している。そして、ショレア属で見られる開花時期のずれは、花粉媒介者をめぐる競争、または雑種形成による適応度の低下を回避するような進化の結果であると考えられる。

開花期の調査を行った種の中で、*S. macroptera*、*S. leprosula*、*S. parvifolia* は進化的に互いに近縁で、各

地の森林でしばしば同所的に分布する。一方、*S. johorensis* と *S. pauciflora* も互いに近縁で、ボルネオ島では同じ森林で見られることが多いが、前の3種とは分類学的に異なるグループに属する。図-5に示した結果から、近縁の種では開花期がずれるが、遠縁の種は同時期に開花していることがわかる。

Shorea curtisii は系統的に *S. leprosula* と近縁であるが、両種の開花時期はほぼ一致していた。*Shorea curtisii* はマレー半島の内陸性丘陵フタバガキ林で優占し、低地フタバガキ林で優占する *S. leprosula* とは別の場所で見られるのが普通だが、シンガポールにあるような海岸に近い丘陵林では例外的に共存している。元来、これら2種の分布は異所的であったために、開花時期をずらすような進化が起こらなかったのかもしれない。

植物はその環境に非常に良く適応しているため、雑種形成には環境の影響が重要であることは明らかである。特に、開花時期の違いによる交配前隔離が見られない *S. curtisii* と *S. leprosula* 間での雑種形成には、環境要因が深く関わっている可能性がある。攪乱などの環境変化によって雑種化が促進される可能性は古くから指摘されているが、熱帯林の攪乱と種間雑種形成の關係に注目した研究はほとんどおこなわれていない。我々は、現在、生態学的アプローチとDNA研究を駆使して、フタバガキ科樹木の雑種化の実態を調査している。

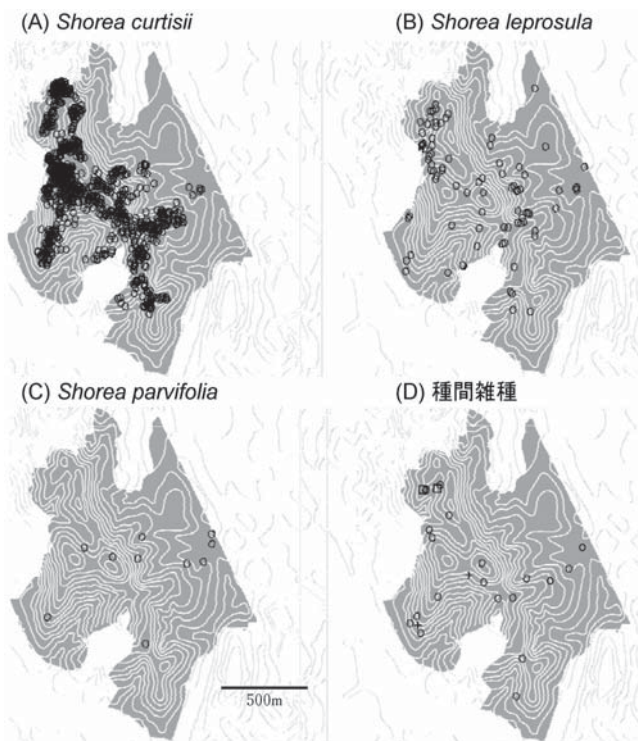


図-4 シンガポール・ブキティマ自然保護区 (面積 164 ha) に生育する胸高直径 30 cm 以上の *S. curtisii* (A)、*S. leprosula* (B)、*S. parvifolia* (C) および種間雑種 (D) の空間分布 (Kamiya et al., 2011 を改変)。(D) の ○ は *S. curtisii* × *S. leprosula*、□ は *S. leprosula* × *S. parvifolia*、+ は *S. curtisii* × *S. parvifolia* の雑種を示す。

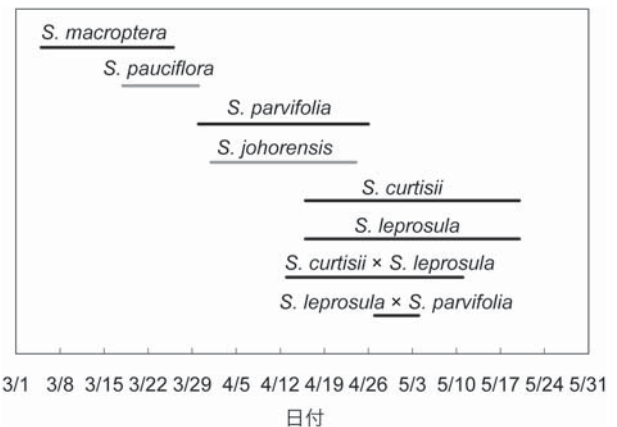


図-5 ショレア属6種間で見られる開花時期の違い (シンガポール、2009年)

6. まとめ

生物多様性という言葉は近年、時代のキーワードとなった。また高い種多様性を誇る熱帯林の危機が指摘されて以来、熱帯林の持続的利用や保全に関する研究への期待も大きくなっている。育種技術への応用と同時に環境への貢献も森林遺伝研究の重要な課題である。遺伝的多様性の実態と、それが種の生存と適応、そして生物の進化（種分化）に具体的にどのように関わっているのかを明らかにすることは、急速な種の絶滅が起こっている今、我々が研究すべき重要な課題であると考えている。

引用文献

- Chan, H. T., and Appanah, S. (1980) Reproductive biology of some Malaysian dipterocarps I. Flowering biology. *Malaysian Forester* 43: 132–143.
- Condit, R. *et al.* (2000) Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. *Science* 288: 1414–1418.
- Dexter, K. G. *et al.* (2010) Using DNA to assess errors in tropical tree identifications: How often are ecologists wrong and when does it matter? *Ecol. Monograph*. 80: 267–286.
- Forest, F. *et al.* (2007) Preserving the evolutionary potential of floras in biodiversity hotspots. *Nature* 445: 757–760.
- 伊東 明ら (2006) 地形から見た熱帯雨林の多様性. 種生物学会 (編), 森林の生態学 長期大規模研究から見えるもの. pp. 219–241, 文一総合出版, 東京.
- Kamiya, K. *et al.* (2005) Phylogeny of *PgiC* gene in *Shorea* and its closely related genera (Dipterocarpaceae), the dominant trees in Southeast Asian tropical rain forests. *Am. J. Bot.* 92: 775–788.
- Kamiya, K. *et al.* (2011) Morphological and molecular evidence of natural hybridization in *Shorea* (Dipterocarpaceae). *Tree Genet. Genomes* 7: 297–306.
- Kamiya, K. *et al.* (in press) Evolutionary history of Southeast Asian tropical rain forest species: a perspective from chloroplast DNA sequence variations in *Shorea curtisii* (Dipterocarpaceae). *Biotropica*.
- Paoli, G. D. *et al.* (2006) Soil nutrients and beta diversity in the Bornean Dipterocarpaceae: evidence for niche partitioning by tropical rain forest trees. *J. Ecol.* 94: 157–170.
- Tsumura, Y. *et al.* (2011) Molecular database for classifying *Shorea* species (Dipterocarpaceae) and techniques for checking the legitimacy of timber and wood products. *J. Plant Res.* 124: 35–48.

遺伝子でみる森林樹木の 繁殖・更新プロセス

井鷲 裕司 (いさぎ ゆうじ、京都大学)

1. はじめに

森林は多種多様な生物種の住処となっている生態系である。生物多様性を保全するためには、種数とともに種内の遺伝的多様性を保全することも重要である。遺伝的多様性は進化の原動力となるだけでなく、自家受粉を防ぐ仕組みである自家不和合性や、血縁関係のある個体間の交配によって生まれた子供の生存力や繁殖力が低下する近交弱勢などの効果を通して、繁殖適応度にも関与する。また、群落レベルの生産性や攪乱への耐性といったより上位レベルの生態プロセスにも種内の遺伝的多様性が関わっていることが多くの植物群落で見いだされている (Crutsinger *et al.*, 2006)。

生物個体には寿命があるため、森林内で遺伝的多様性を保持するためには、集団を構成する個体が繁殖し、更新する必要がある。植物個体は自ら動くことができないために、繁殖や群落の更新時に送粉と種子散布によって、自らの遺伝子を動かしている。花粉や種子を空間的に移動させる方法は多様であり、種ごとに特徴を見いだすことができる。そして、送受粉や種子散布の過程を介して、集団内の遺伝的特徴や空間的遺伝構造が形成されてゆく。花粉や種子はどれだけの量が、どれくらい遠くまで、どのようなパターンで散布されているのだろうか。この問いかけに関する答えは、遺伝マーカーを用いた解析手法の発展とともに、よりはっきりとしたものになってきた。

2. 遺伝解析で明らかになった森林樹木の繁殖・更新プロセス

生物のゲノムには長いDNA塩基配列が含まれており、遺伝情報が蓄えられているが、その配列の中には、特段、遺伝的な情報を持たないと考えられる反復配列が含まれている。そのような反復配列の中でも、6塩基以下の長さのモチーフが連続して反復しているマイクロサテライトと呼ばれる部位は、ゲノム内に多数存在する上に、反

復回数に変異性が高く、それぞれの部位をPCR (polymerase chain reaction) という手法によって特異的に増幅することで、共優性の遺伝マーカーとして利用できる。このようなマイクロサテライトマーカーの特徴を活用することで、森林樹木の繁殖や更新プロセスに関する解析が進められてきた。

植物の繁殖と群落の更新は、送受粉、受精、種子散布、発芽と生長という長い過程を経て行われる。ここでは遺伝マーカーを用いて明らかになった植物の繁殖・更新プロセスの一部を、送受粉、種子散布、更新と遺伝構造の順に紹介したい。

3. 花粉一粒分析

送受粉に関しては、花粉が小さく、肉眼でその動きを直接的に観察することができないために、様々な代理的方法が考案されてきたが、今日の遺伝解析技術を用いれば、一粒の花粉でも、その遺伝子型を簡単に明らかにすることができる (Suyama, 2011)。この手法を用いて、訪花昆虫の体表に付着している花粉を一粒ずつ遺伝解析 (Matsuki *et al.*, 2007) することで、昆虫類の行動観察から推測されてきた送受粉に関わる従来の理解とは異なる実態が明らかになってきた。

例えば、マルハナバチは飛翔能力や学習能力に優れており、送粉者としての機能が高いが、ハナムグリ類は動きが緩慢な上、学習能力も低いため、さほど優秀な送粉者ではないと考えられてきた。ホオノキの花にはマルハナバチ類、ハナムグリ類、小型甲虫など複数タイプの昆虫が訪れるが、それらの体表に付着している花粉を分析した結果 (Matsuki *et al.*, 2008)、マルハナバチの体表に付着している花粉の多くは、訪花している樹木個体が生産した花粉であった (図-1)。従って、マルハナバチの訪花によって受粉した種子は自家受精している可能性が高いと考えられる。ホオノキは近交弱勢の効果が強

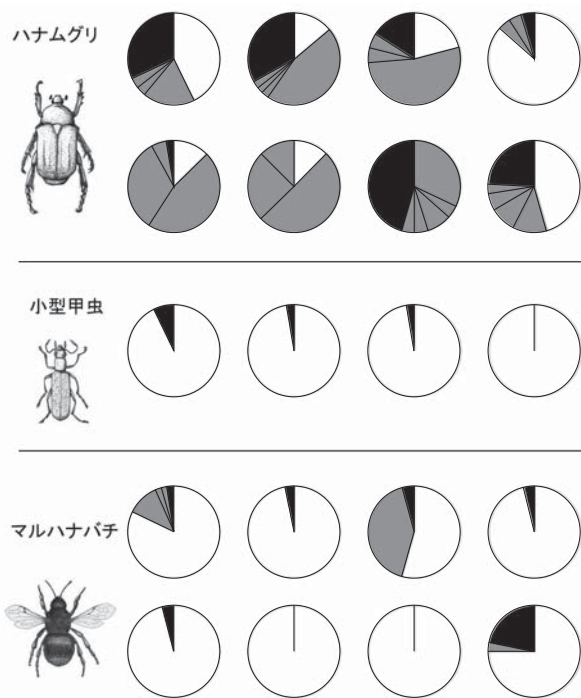


図-1 ホオノキ訪花昆虫の体表に付着していた花粉粒の花粉親組成 (Matsuki *et al.*, 2011 より描く)。一つの円グラフが、1 個体の昆虫に付着していた花粉サンプルに相当し、円グラフ内で分割された部分が、異なる花粉親に由来する花粉の割合を表す。白い部分は、昆虫が訪花していたホオノキ個体の花粉 (自家花粉)、灰色の部分が調査地内に生育する他のホオノキ個体に由来する花粉、黒の部分が調査地外に生育するホオノキ個体に由来する花粉である。

く働くため、自家受粉の結果生まれた種子や芽生えは、早い段階で死亡する。肉眼による行動観察からは、マルハナバチは優秀な送粉者に見えるものの、ホオノキにとっては、ありがたくない送粉者なのである。マルハナバチは飛翔能力に優れてはいるものの、自家花粉が多いため、ホオノキの立場から評価すると、有効な送粉距離は長くない (図-2)。これに対してハナムグリは、自家花粉の割合が有意に低く、また、花粉親の組成も多様であり (図-1)、長距離にわたって運ばれた花粉の割合も他のタイプの昆虫に比べると多い (図-2)。小型甲虫類は、一つの花の中でじっとしていることが多く、付着している花粉のほとんどが自家花粉であり、送粉距離も短かった (図-1, 2)。

ホオノキは被子植物の中でも初期に出現した原始的な

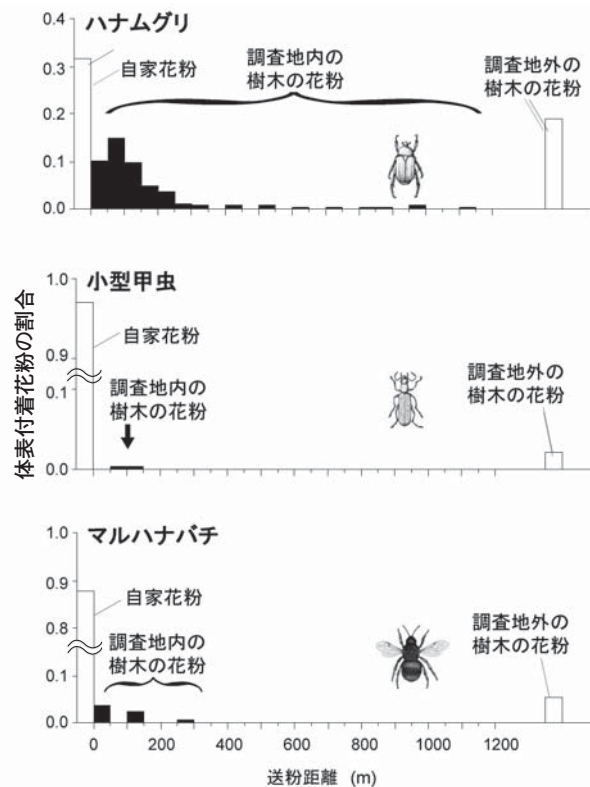


図-2 昆虫タイプごとの送粉距離 (Matsuki *et al.*, 2011 より描く)

グループに属し、その出現時には、ハチ類やチョウ類は未だ発展しておらず、甲虫類を送粉者として考えられている。ハナムグリ類は一見動作は緩慢だが、ホオノキにとっては多様な遺伝的組成を持った他殖花粉を供給する優れた送粉者として機能していることは、両者の共進化を示すものであろう。

4. 送受粉

上記のような花粉の直接的遺伝子型解析の他に、送受粉過程を解析する方法として、親子解析に基づくものもある。すなわち、調査プロット内で繁殖個体と次世代の個体の遺伝子型を比較することで親子関係にある個体を明らかにし、その結果に基づいて、花粉や種子の移動距離や方向を解析するというものである。

核ゲノムに存在する遺伝子の情報を基に親子解析すると、他家受粉の結果生まれた 1 個体の稚樹に対して 2 個体の親候補を絞り込むことができる。このままでは、花粉親と種子親を区別することはできないが、種子親と遺伝的に同一の組織である種皮の遺伝子型を調べたり、

片親遺伝するオルガネラゲノムの情報を活用すること、あるいは既知の母樹から採集した種子を解析して花粉親を特定すること、等の方法によって、種子親と花粉親を識別できる（図-3）。

情報量の多い遺伝マーカーを用いた、このような解析によって森林に生育する植物の送粉過程について実態が明らかになってきたのは1990年代後半からであるが、それは、従来の樹木の送受粉に対するイメージを大きく覆すものであった。

花粉トラップや代替色素などを用いて行われた花粉散布動態に関する解析では、花粉粒の大部分は花粉源の近くに落下し、距離とともに散布された花粉粒の数は急速に減少すると推定されていた。ところが、遺伝マーカーを用いた親子解析の結果、次世代に遺伝子を伝えた花粉は、それまでの推定値よりもより遠い場所から運ばれていたことが次々と明らかになってきた。送粉距離の最大値に関しては驚くべき値が次々と更新されている。例えば、アフリカ産のイチジク *Ficus sycomorus* では、成

虫段階の寿命が48時間に過ぎないイチジクコバチが160 kmにもわたって送粉していることが報告されている（Ahmed *et al.*, 2009）。都市近郊林に残存する林床草本ショウジョウバカマ個体群を対象に、種子の親子解析に基づいて送粉距離を解析した例では、肉眼では送粉者の存在を確認できなかったのにもかかわらず、活発な送受粉が行われていた（Miyazaki & Isagi, 2000）。この集団において実際に送粉者となっている生物については不明であるが、意外なタイプの生物が送粉に関与している可能性が高いと思われる。

送受粉のパターンや量は樹木の生活史特性と密接に関連しており、同一種内では一定の様式を持つものと考えられてきたが、実際には集団内の開花個体間における送受粉は、ずっと不均質であることも明らかになってきた。例えば、ホオノキは多心皮の花を咲かせるため、一つの果実に多数の種子が結実する。これらの花粉親を解析したところ、自殖率、花粉移動距離、花粉親組成などが果実ごとに著しく異なっており、樹木の種特性を反映して、送受粉様式に一定のパターンが生じるという我々の思い込みを覆す結果が報告されている（Isagi *et al.* 2004）。また、個体間の微妙な開花フェノロジーの差を反映して、個体間で方向性のある花粉流動もシャクナゲ（Kameyama *et al.*, 2000; Hirao *et al.*, 2006）で見いだされている。

5. 種子散布

種子は花粉よりもサイズが大きく、そのため、散布距離はおおむね花粉よりは短いことが多い（図-3）。しかしながら、比較的サイズの大きな鳥類や哺乳類が散布に関わっている場合は、ごく一部の種子が非常に長距離にわたって運搬されたり、意志を持って動く散布者の行動によって、止まり木、種子貯蔵場所、採餌場所などに偏った散布がなされることもある。従って、種子散布距離に関しては、単純な関数では記述できない複雑で長距離に及ぶ散布がなされることも少なくない。

サクラ属樹木 *Prunus mahaleb* を対象に、種皮の遺伝解析によって種子散布様式を分析した例では、複数の異なったタイプの生物（哺乳類、小型鳥類、中型鳥類）が異なった種子散布様式をもたらしていたため、種子散布距離は、ただ一つの単純な分布関数で解析することが不適切であることが示されている（Jordano *et al.*, 2007）。また、ヤクザルの糞から取り出したヤマモモの

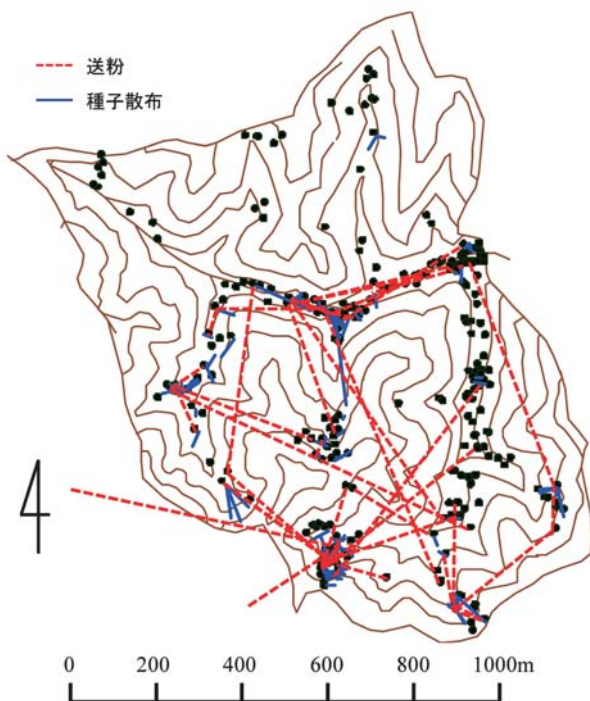


図-3 トチノキ個体群における送粉と種子散布。110 haの調査プロット内において、全繁殖個体の遺伝子型と、芽生えの葉と種子の遺伝子型を解析することで、送粉と種子散布を個別に解析したもの。

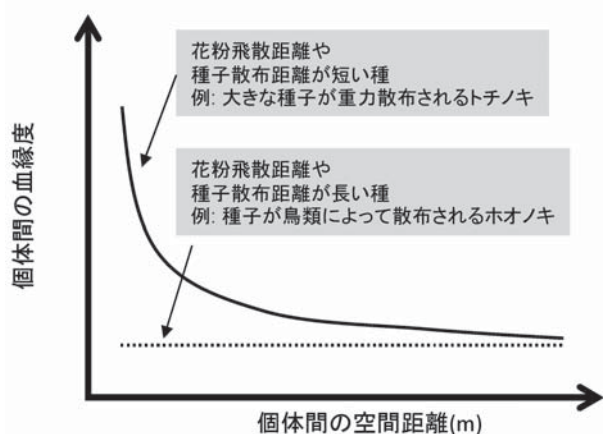


図-4 異なった散布様式を持つ植物個体群における空間的遺伝構造

種子を解析した研究では、一つの糞の中に最大 500 メートル以上離れた繁殖個体由来する種子が混在しており、ヤクザルの糞によって効率的に多様な遺伝的組成の種子が散布されていることが明らかになっている (Terakawa *et al.*, 2009)。

6. 樹木の更新と遺伝構造

トチノキの種子は日本に生育する植物の中でも最大級のものであり、種子は樹冠下に重力落下し、一部のものは小型哺乳類に散布される。このような性質を反映して、種子の散布距離は種子親から数十メートル以内に限定されている。これに対して、昆虫が関わる送粉は、より長い距離におよび、尾根を超えた樹木個体間でも活発に花粉の交換が行われている (図-3)。樹種ごとに特徴ある送粉と種子散布パターンは、世代交代をとおして次第に、種に特徴的な空間的遺伝構造をもたらす。トチノキのように、種子散布が限定的な樹種では、空間的に近接した場所により血縁度の高い個体が生育するようになる。反対に、ホオノキのように、鳥類によって種子散布される樹種では、空間的に近接する個体間に強い血縁関係は無い (図-4)。

明瞭な空間的遺伝構造を示すトチノキ個体群では、近接して生育する個体ほど互いの血縁度は高くなっている。トチノキは多くの樹種と同様に近親交配を行うと近交弱勢が強く発現する。近接した個体間では花粉のやりとりも多いが、そのような個体間で花粉を交換した結果生まれた個体は、近交弱勢の効果によって成長とともに

死亡し、集団から取り除かれてゆく。その結果、成長段階がすすむにつれて、次世代に遺伝子を伝えることのできた花粉の飛散距離は長くなることが報告されている (Isagi *et al.*, 2007)。この例は、空間的遺伝構造が近交弱勢を介して有効な送粉距離やパターンに影響しうることを示している。また、個体の繁殖成功や、花粉や種子の有効な飛散距離を評価するためには、より成長段階のすすんだ個体を対象とした遺伝解析を進めることが必要といえる。

7. おわりに

遺伝解析により明らかになってきた樹木の繁殖プロセスについて簡単に紹介してきたが、送受粉、種子散布ともに、樹種の種特性だけでなく、集団の遺伝的多様性、遺伝構造、生物相、生物間相互作用、履歴などにも影響を受けていることが明らかになってきている。繁殖プロセスに関する理解は、人為インパクト下にある森林を適切に保全・管理する上でも必要不可欠である。より包括的な理解のために、種特性や生物間相互作用の点で対照的な種群を対象に、攪乱の履歴も考慮しつつ、系統的な計画のもとに解析を進めることも重要であろう。

引用文献

- Ahmed S, Compton SG, Butlin RK, Gilmartin PM (2009) Wind-borne insects mediate directional pollen transfer between desert fig trees 160 kilometers apart. *PNAS* 106: 20342-20347.
- Crusinger GM, Collins MD, Fordyce JA, Gompert Z, Nice CC, Sanders NJ (2006) Plant genotypic diversity predicts community structure and governs an ecosystem process. *Science* 313: 966-968.
- Hirao AS, Kameyama Y, Ohara M, Isagi Y, Kudo G (2006) Seasonal changes in pollinator activity influence pollen dispersal and seed production in the alpine shrub *Rhododendron aureum* (Ericaceae). *Molecular Ecology* 15: 1165-1173.
- Isagi Y, Kanazashi T, Suzuki W, Tanaka H, Abe T (2004) Highly variable pollination patterns in *Magnolia obovata* revealed by microsatellite paternity analysis. *International Journal of*

- Plant Sciences 165: 1047-1053.
- Isagi Y, Saito D, Kawaguchi H, Tateno R, Watanabe S (2007) Effective pollen dispersal is enhanced by the genetic structure of an *Aesculus turbinata* population. *Journal of Ecology* 95: 983-990.
- Jordano P, Garcia C, Godoy JA, Garcia-Castano JL (2007) Differential contribution of frugivores to complex seed dispersal patterns PNAS 104: 3278-3282.
- Kameyama Y, Isagi Y, Naito K, Nakagoshi N. (2000) Microsatellite analysis of pollen flow in *Rhododendron metternichii* var. *hondoense*. *Ecological Research* 15: 263-270.
- Matsuki Y, Isagi Y, Suyama Y (2007) The determination of multiple microsatellite genotypes and DNA sequences from a single pollen grain. *Molecular Ecology Notes* 7: 194-198.
- Matsuki Y, Tateno R, Shibata M, Isagi Y (2008) Pollination efficiencies of flower-visiting insects as determined by direct genetic analysis of pollen grains. *American Journal of Botany* 95: 925-930.
- Matsuki Y, Tomita M, Isagi Y (2011) Pollination efficiencies of insects visiting *Magnolia obovata*, as determined by single-pollen genotyping. In Isagi Y & Suyama Y (eds.), *Single-Pollen Genotyping*. Springer, pp. 17-32.
- Miyazaki Y, Isagi Y (2000) Pollen flow and intrapopulation genetic structure of *Heloniopsis orientalis* on forest floor determined using microsatellite markers. *Theoretical and Applied Genetics* 101: 718-723.
- Suyama Y (2011) Procedure for single-pollen genotyping. In Isagi Y & Suyama Y (eds.), *Single-Pollen Genotyping*. Springer, pp. 7-15.
- Terakawa M, Isagi Y, Matsui K, Yumoto T (2009) Microsatellite analysis of the maternal origin of *Myrica rubra* seeds in the feces of Japanese macaques. *Ecological Research* 24: 663-670.

熱帯雨林における花粉散布と択伐基準、次世代実生の遺伝的組成と更新

谷 尚樹 (たに なおき、国際農林水産業研究センター・林業領域)

1. はじめに

他殖が優越する木本性樹種の更新のためには、他殖交配を保証し、遺伝的に健全な次世代を育成する必要がある。伐採が過度に行われて母樹密度が非常に低くなり花粉散布が不十分になると、自家受粉の割合が増えて、その実生集団では劣性の有害遺伝子をホモ接合で持つ個体の多い遺伝構造になり、集団の遺伝的劣化が進行すると考えられる。択伐林施業を行っている林分に対して、DNA マーカーを用いて花粉散布の状況や実生の遺伝的組成を解析することにより、良好な更新を維持するための伐採基準を考えることができる。本稿では、マレーシアにおける伐採システムを事例として、遺伝子解析の視点から択伐基準を考察する。

2. マレーシアにおける伐採システムの歴史

生物多様性の宝庫と呼ばれる熱帯雨林では商業伐採が盛んに行われ、中でも東南アジアの熱帯雨林は 1990 ～ 2005 年の 15 年間に、全体の約 20% の森林が消失したと推定されている。

この森林減少により生物多様性も急速に失われており、40 ～ 70% の野生動物が影響を受け、急激な速度で大量絶滅が進行していると言われている。持続可能な森林施業が提唱されて久しいが、現在においても熱帯における森林施業が持続可能で生物多様性を維持しているとは言い難い。

戦前のマレー半島では、イギリス植民地政府によって価値の低い樹種を排除し、利用価値の高い樹種の更新を目的とした Regeneration Improvement Fellings (RIF) と呼ばれる施業法が導入されていた (Wyatt-Smith *et al.*, 1963)。しかしながら、マレー半島において商業伐採が本格化したのは戦後であり、戦後の復興開発が引き金となった。この時期にチェーンソーやトラクターなどの林業機材も導入され、商業伐採が効率化すると共に、

輸出量も増大した。伐採後の森林の向上を目的として新しい施業法である Malayan Uniform System (MUS) が開発され、RIF に代わり MUS が導入されるようになった。MUS の試みは利用価値の低い樹種との競争を低減させ、価値の高い樹種の現存量を増加させることであった。このために、伐採後に苗畑由来の実生の補植 (enrichment planting) が行われたり、利用価値の低い樹種に対して環状剥皮と毒物の添加 (poison girdling) が行われた。伐採周期は 70 年と提案された (Wyatt-Smith *et al.*, 1963)。この長期間に渡る伐採周期を保証するため森林保護区 (forest reserve) が設定された。よって、マレー半島における森林保護区は自然公園のような保護地域ではなく、生産林を意味している。

しかしながら、1958 年から 1978 年の間に主にゴムやオイルパームのプランテーションへの転換が急速に進み、1958 年に 72% であった森林率は 1978 年に 48% にまで低下した。2006 年にはマレーシアの森林はサバ、サラワク州を合わせて 1,835 万ヘクタールであり、森林保護区はこの内の 73% を占め、1,343 万ヘクタールに及ぶ (Malaysian Timber Council, 2009)。よって、マレーシアにおける木材生産はほぼこの森林保護区において行われていると言ってよい。

ところで、1970 年代になると MUS は次第に放棄されるようになる。これは木材加工技術の進歩により、これまで利用価値が低いとされてきた樹種も利用可能になったこと、小径木も利用可能となり長い伐採周期の必要性に疑問符が付けられるようになった。さらに、低地フタバガキ林は殆ど収穫され、丘陵フタバガキ林が伐採の中心となった。ここでは樹種の更新がパッチ状で行われるため、MUS は適していないと判断された (Appanah, 1998)。

1970 年代後半になると Selective Management System (SMS) が開発された (Wyatt-Smith, 1987)。

SMS では伐採前の資源調査をもとに柔軟に伐採量を規定することができる。理想的には全ての林業樹種に対して伐採基準をもうけており、非フタバガキ種については胸高直径 45 cm、フタバガキ種については 50 cm 以下の個体を保残することにしている。また、伐採周期を 30 年としている (Thang, 1987)。SMS が導入されて初期の伐採からほぼ 30 年を迎えるが丘陵フタバガキ林では天然更新が上手くいかず荒廃した二次林も見受けられる。

そこで、持続可能な択伐施業法を目指して SMS を改善するため、下部丘陵フタバガキ林において現存量の多い優占種であるセラヤ (*Shorea curtisii*) について、遺伝子解析を用いて花粉散布から繁殖にいたる過程を調査し、健全な種子が生産される択伐強度の推定を試みた。

3. 父性解析と花粉散布のモデリング

花粉散布については、花粉そのものを追跡することは不可能なので、種子を採取してその遺伝子型を明らかにしたうえで、母樹と花粉親候補木との遺伝子型を比較し、花粉親を同定することによって花粉散布を推定した。

調査地はマレー半島のクアラルンプールから約 60 キロ北方の脊梁山脈の西側にあるセマンコック森林保護区の標高 430 ~ 510 m 地点の天然林に 1992 年に設定された 6 ヘクタールの試験地である (図-1)。また、隣接する択伐林内に 5.5 ヘクタールの試験地も設定されている (図-1)。

試験地内に生育する胸高直径 5 cm 以上の樹木には全て金属製のタグがつけられており、2 年毎に加入、死亡、生長量が記録されている。

東南アジアの熱帯雨林は一斉開花と呼ばれる現象が有名である。一斉開花とは様々な分類群に属する樹種が特定の時期に一斉に開花する現象で、特に季節性の無い湿润熱帯ではこの現象の進化的、生理学的、生態学的な要

因について研究者の注目を集めている。ここで、1998 年、2002 年、2005 年に一斉開花を観察し、天然林プロットにおいて 1998 年には 8 母樹、2002 年は 11 母樹、2005 年は 10 母樹より種子を採取した (表-1)。

遺伝子解析実験や父性解析の詳細は省略するが、花粉親を同定するためにプロット内の胸高直径 20 cm 以上の個体から DNA を抽出し、遺伝マーカーの一つであるマイクロサテライトマーカーを用いて種子、母樹、花粉親の遺伝子型を比較し、花粉親を特定した。父性解析の結果は、①プロット外からの花粉との交配による種子 (m_i)、②自殖種子 (s_i)、③プロット内に花粉親が見つかった種子 ($1 - m_i - s_i$) の 3 種類に分けられる。この内、花粉の散布距離が明らかなのは花粉親の位置が明確な③のケースだけである。自殖種子については自花受粉であるか隣花受粉であるか分からないし、他家花粉の散布パ

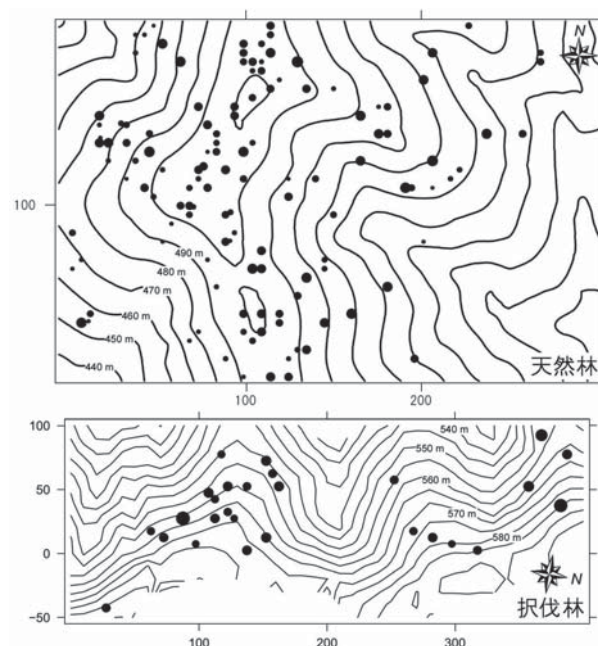


図-1 セマンコック森林保護区に設定された天然林、択伐林プロットとセラヤの位置とサイズ。

表-1 セマンコック森林保護区において採取した種子数と父性解析によって示された 3 カテゴリー (移入、自殖、プロット内成木との他殖) の比率

	解析した種子の数 (総数)	移入率 m_i	自殖率 s_i	プロット内成木との他殖率 $1 - m_i - s_i$
1998 年の一斉開花時の平均値	339	0.2419	0.0649	0.6932
2002 年の一斉開花時の平均値	409	0.2249	0.1418	0.6333
2005 年の一斉開花時の平均値	744	0.3212	0.0591	0.6196

ターンに焦点を絞るため解析には加えないことにした。父性解析の結果、花粉散布パターンの解析に十分な量のプロット内花粉親との交配による他殖種子が存在した(表-1)。

花粉散布のパターンは概ね近距離において高頻度で、距離が増すとともに、この頻度は低下していく。複数の一斉開花間の散布パターンの比較や、択伐の影響をシミュレーションによって明らかにするためには、このパターンを確率密度関数として表すことが必要である。

この確率密度関数は散布カーネルと呼ばれ、任意の花粉親が生産する花粉は散布距離の増加とともに、この確率密度に従って漸減し、一部が母樹に到達し、受粉を介して種子が生産される。この繁殖過程をモデル化し、父性解析の結果を元に散布カーネルと任意の花粉親の雄性繁殖成功(各花粉親の種子生産に貢献した割合)に関するパラメータの推定を試みた(Tani *et al.*, 2009)。

プロット内の各花粉親候補木の雄性繁殖成功のパラメータを F_j とした。散布カーネルは指数べき乗分布を用いた(Klein *et al.*, 2008, Oddou-Muratorio *et al.*, 2005, Hardy *et al.*, 2004)。この散布カーネルは二つのパラメータ a と b によって確率密度が決定され、それぞれ、スケールパラメータ、形状パラメータと呼ばれる。この二つのパラメータ(a と b)が推定出来れば、花粉散布の平均距離(δ)を算出することができる(Clark, 1998)。

次に、交配プロセスのモデリングを行った。プロット内各成木の雄性繁殖成功(F_j)は散布カーネルに従って減少し、各母樹に達する花粉における花粉親の構成は雄性繁殖成功と散布カーネルを乗ずることで表すことがで

きる。 j 番目の成木は F_j という雄性繁殖成功の量を持っており、これが母樹に到達するには散布カーネルに従って減少し、この雄性繁殖成功が種子の父性に反映しているというイメージである。このモデルに実際に父性解析実験から得られた父性データを与えてやれば階層ベイズ法によって各パラメータの事後分布を求めることができる。

プロット内の各花粉親候補木の雄性繁殖成功と散布カーネルのパラメータの推定値が得られれば、ある成木の雄性繁殖成功と散布カーネルから得られる散布確率を乗じ、全体の合計で除することで、母樹 i に到達する花粉親 j からの花粉の相対的な割合(π_{ij})を算出することができる。

$$\pi_{ij} = \frac{F_j p_{ij}}{\sum_{j=1}^N F_j p_{ij}}$$

ここで、 $P_{ij} = p(a, b; r_{ij})$ である。

4. 花粉散布パターンと雄性繁殖成功からみた現在の択伐施業

セマンコックの天然林プロットは6haと小さいにも関わらず、プロット外からの移入は低いレベルであった(表-1)。3回の一斉開花において採取した合計約1,500個の種子の約80%弱の花粉親がプロット内に見つかった。3カ年の一斉開花時の平均散布距離はそれぞれ、67.9m、83.2m、69.9mであった(表-2)。低地フタバガキ林の*Shorea*属樹種と比較すると非常に短い平均

表-2 散布カーネルのパラメータの事後分布と平均花粉散布距離 (m)

パラメータ	事後平均	事後標準偏差	事後中間値
1998年の一斉開花			
a	0.0300	0.0060	0.0292
b	1.0140	0.1269	1.0054
δ	65.0	—	67.9
2002年の一斉開花			
a	0.0189	0.0024	0.0186
b	1.1650	0.1277	1.1594
δ	81.6	—	83.2
2005年の一斉開花			
a	0.0272	0.0039	0.0268
b	1.0420	0.0924	1.0369
δ	67.1	—	69.9

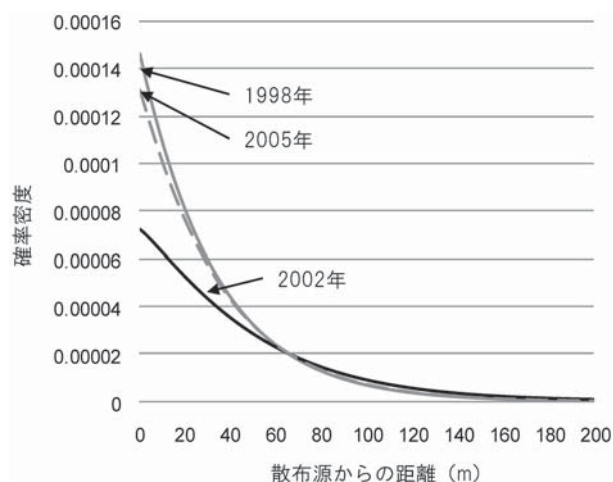


図-2 モデルから推定された花粉散布カーネル。横軸は距離(メートル)、縦軸は確率密度を表す。

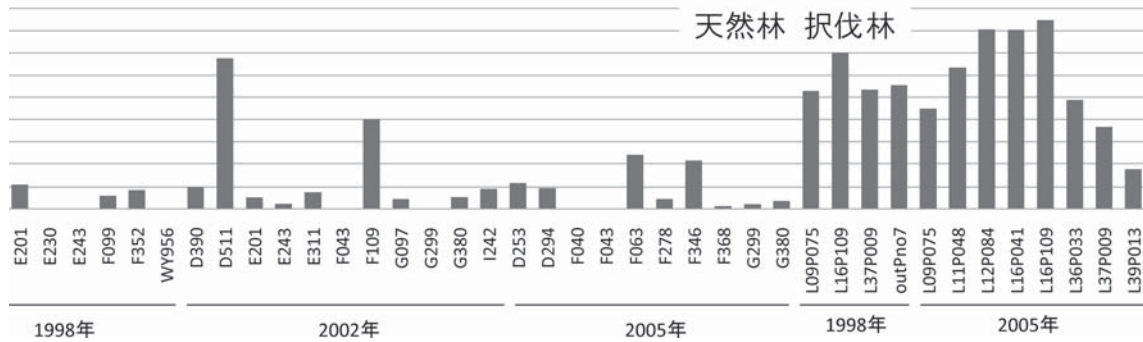


図-3 1998年から2005年の一斉開花時に観察された母樹ごとの自殖率。

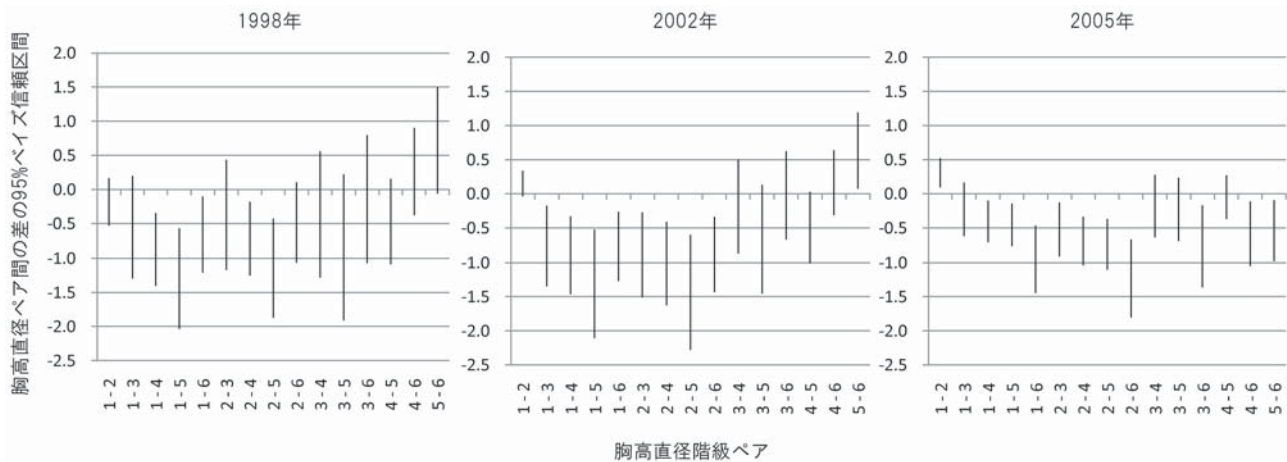


図-4 雄性繁殖成功のパラメータ (F_j) の個体サイズ階級平均値の階級間差。縦線は95%ベイズ信頼区間を表す。個体サイズは胸高直径によって以下の階級に分類された。1; 20～35 cm、2; 35～50 cm、3; 50～70 cm、4; 70～85 cm、5; 85～110 cm、6; 110 cm 以上。

距離である (Tani *et al.*, 2009)。これはセラヤが非常に高密度で丘陵地の尾根に偏在して分布していることが最も大きな要因であると考えられる。

図-2 にモデルから推定された散布カーネルの形状を示した。1998 年と 2005 年の一斉開花ではほとんど同じ散布カーネルが推定されたのに対し、2002 年では距離に対し、ゆっくりと漸減する散布カーネルが推定された。また、2002 年の平均散布距離も他の年よりも長かった。この原因は開花個体密度の違いであると考えられる。地上からの開花個体の観察によって、天然林プロットでは 1998 年は 89 本、2002 年は 51 本、2005 年は 75 本の個体が開花していたことが確認された。また、2002 年では一部の個体で自殖率の増加が確認された (図-3)。

熱帯林業においては択伐と呼ばれる手法で天然林からある基準に達した個体を抜き伐りする手法が取られてき

た。SMS においては理想的にはフタバガキ種の胸高直径 50 cm 以下の個体を保残することになっていることは説明したとおりである。個体サイズ別の雄性繁殖成功を明らかにすることは、択伐後の繁殖、森林更新を可能にさせる上で重要な要素である。

図-4 は胸高直径で各個体をクラス分けし、その時の F_j のクラス内平均値のクラス間差を算出し、その 95% ベイズ信頼区間を示したものである。各クラス間の雄性繁殖成功の差と考えてほしい。ここで胸高直径クラスは個体数を勘案して便宜的に以下のように設定した。20～35 cm をクラス 1、35～50 cm をクラス 2、50～70 cm をクラス 3、70～85 cm をクラス 4、85～110 cm をクラス 5、110 cm 以上をクラス 6 とした。この 95% 信頼区間 (図中の縦線) が 0 を跨いでいれば二つのクラス間に有意な差はないと判断できる。SMS で伐採されるのは 50 cm 以上の個体であるので、50 cm

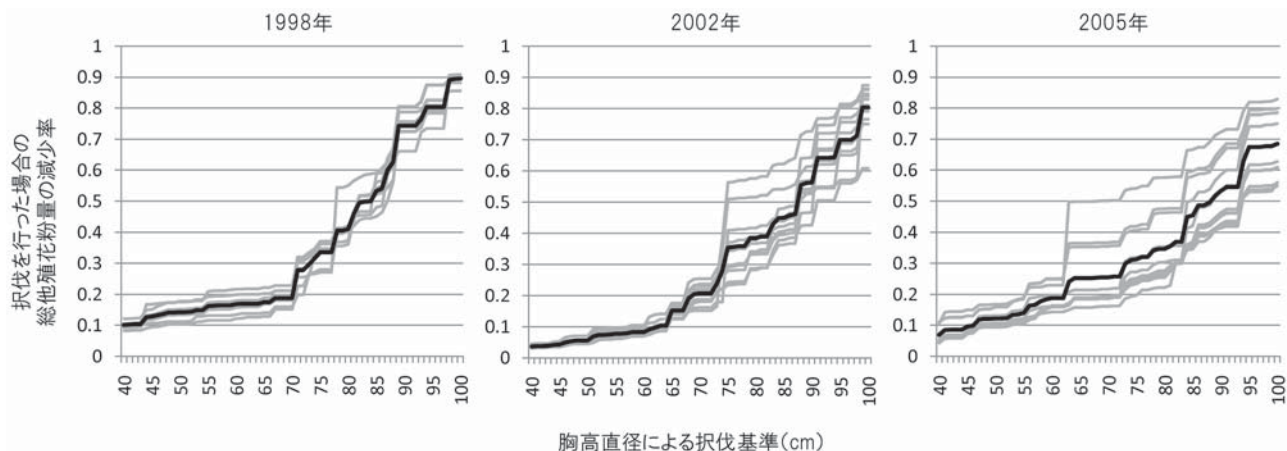


図-5 シミュレーションによって択伐を行った場合（択伐基準は胸高直径 1 cm 刻み）の総他殖花粉の択伐前の状態からの減少率（ $\sum_{j=1}^N F_j p_{ij}$ ）。灰色の実線は種子を採取した母樹ごとの総他殖花粉の減少率、黒線は前母樹の総他殖花粉の減少率の平均値を表す。

以下のクラス 1 および 2 がそれ以上のクラスと有意な差があり、負の値を取る場合、クラス 1 および 2 の個体は他のクラスよりも有意に父性繁殖成功が低いと判断できる。このことは SMS による択伐後の種子生産にとって好ましいことではない。図-4 の 1-3 から 2-6 までの 8 クラスペアで有意とならなかったペアは 1998 年の 1-3、2-3、2-6、2005 年の 1-3 のみである。このように 50 cm 以下の個体は父性繁殖成功が非常に低く、SMS を行った場合、短い花粉散布距離も影響し、他殖花粉の制限を強く受けることが示唆された。

このことは択伐林の自殖率に強く表れている。図-3 に調査した各母樹の自殖率を表した。一斉開花の規模が小さかった 2002 年に自殖率が高い母樹が 2 個体観察された以外は、天然林の母樹の自殖率は低かった。しかし、択伐林では種子の採取できた 2 カ年を通して自殖率は総じて高かった。このように、SMS による択伐によって個体密度が低下し、小径木が残された択伐林では他殖花粉の制限が生じ、自殖率が増加し、健全な種子の生産が妨げられている。

5. シミュレーションによる他殖花粉を保証した択伐法の改善

セマンコック天然林で得られた花粉散布カーネルと雄性繁殖成功のパラメータを用いて、外部花粉を保証するためには、択伐密度をどのように改善すべきかシミュレーションを行った。先述の母樹 i に到達する花粉親 j からの花粉の相対的な割合（ π_{ij} ）を表す式において、

分母の $\sum_{j=1}^N F_j p_{ij}$ は i 番目の母樹に到達する各花粉親からの雄性繁殖成功の総数（総他殖交配量）を表している。マレーシアで行われている胸高直径を基準とした択伐手法に則り、任意の択伐基準（胸高直径 40 cm から 100 cm まで 1 cm 刻み）以上の個体が伐採された時の総他殖交配量を算出した。すなわち、 j 番目の花粉親が任意の択伐基準より大きな個体の場合、これは伐採されたとして F_j の値を 0 とした。この手法は数学的に問題があるのだが、ここでは数学的正確性よりも実際に即したシミュレーションを行った方が択伐指針を示す上で有効であると判断した。

図-5 はこのシミュレーションの結果である。灰線は母樹ごとの結果で、黒線が平均値を示している。年ごとに少しばらつくが SMS の理想的と言われる基準である 50 cm 以上の個体を伐採した場合、総他殖花粉量は伐採前の 5～15% 程度にまで低下する。隣接する択伐林で自殖率が異常に高い理由と合致する。2005 年は顕著ではないが、総他殖交配量の減少率は胸高直径 70 cm 位までは緩やかにしか増加しない。これはこのサイズまでの個体の雄性繁殖成功の推定値が小さいためである。これ以上のサイズを保残すると総他殖交配量の減少率は急激に回復していく。総他殖交配量を伐採前の半分程度まで確保するためには、択伐基準を 85～89 cm まで厳しくする必要がある。

また、雄性繁殖成功の高い中径木を保残する場合のシミュレーションも行ってみた。例えば 50 cm 以上の個体は伐採するが 80～90 cm の個体を保残した場合、総

他殖花粉量の減少率は20～40%に回復する。さらに、保残するサイズを70～90 cmまでに拡大した場合、35～60%まで回復することが明らかになった。このように次世代の天然更新を保証するために択伐基準を更に厳しくしていくことは不可欠である。

6. おわりに

現在調査中ではあるが択伐林の実生の遺伝的な組成を調べてみると、これほど自殖率が高いにも関わらず、自殖由来の実生はごく少数にすぎない。生長のかなり早い時期に近交弱勢が働き、そのほとんどが死亡しているようである。また個体群動態のデータからは、天然更新を促進させ、現存量を維持するためには、30年の伐採周期ではほぼ不可能であることが示されている。これは生物多様性の維持などを考慮せず、セラヤそのものの林産物としての維持だけを考慮した数値である。丘陵フタバガキ林は低地フタバガキ林と比べると脆弱であることが明らかになりつつあり、その森林資源を維持し、生物多様性を維持するためには、より長い伐採周期を設定し、厳しい択伐基準を設けざるを得ない。その場合、経済的には成り立たない可能性もあり、熱帯地域においてもこれまでように天然林からの収穫に頼るのではなく、積極的な造林による木材の収穫が必要になると思われる。

なお、本稿で紹介した研究の推進にあたっては、日本とマレーシアの多くの研究者、フォレストアー、テクニシャンのご協力をいただいた。深く感謝を申し上げる。

参 考 文 献

- Appanah, S. (1998) Management of natural forests. A review of dipterocarps: taxonomy, ecology and silviculture (eds S. Appanah & J. M. Turnbull), pp. 113–149. CIFOR, Bogor, Indonesia.
- Clark, J.S. (1998) Why trees migrate so fast: confronting theory with dispersal biology and the paleorecord. *The American Naturalist*, 152, 204–224.
- Hardy, O.J., Gonzalez-Martinez, S.C., Colas, B., Freville, H., Mignot, A. & Olivieri, I. (2004) Fine-scale genetic structure and gene dispersal in *Centaurea corymbosa* (Asteraceae). II. Correlated paternity within and among sibships. *Genetics*, 168, 1601–1614.
- Klein, E.K., Desassis, N. & Oddou-Muratorio, S. (2008) Pollen flow in the wildservice tree, *Sorbus torminalis* (L.) Crantz. IV. Whole interindividual variance of male fecundity estimated jointly with the dispersal kernel. *Molecular Ecology*, 17, 3323–3336.
- Malaysian Timber Council. (2009) FAQs on Malaysian's Forestry & Timber Trade. pp. 6–7. Kuala Lumpur.
- Oddou-Muratorio, S., Klein, E.K. & Austerlitz, F. (2005) Pollen flow in the wildservice tree, *Sorbus torminalis* (L.) Crantz. II. Pollen dispersal and heterogeneity in mating success inferred from parent-offspring analysis. *Molecular Ecology*, 14, 4441–4452.
- Tani, N., Tsumura, Y., Kado, T., Taguchi, Y., Lee, S.L., Muhammad, N., Ng, K.K.S., Numata, S., Nishimura, S., Konuma, A. & Okuda, T. (2009) Paternity analysis-based inference of pollen dispersal patterns, male fecundity variation and influence of flowering tree density and general flowering magnitude in two dipterocarp species. *Annals of Botany*, 104, 1421–1434.
- Thang, H.C. (1987) Forest management systems for tropical high forest, with special reference to Peninsular Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 21, 3–20.
- Wyatt-Smith, J. (1987) The management of tropical moist forest for the sustained production of timber: some issues. Tropical Forest Policy Paper (IUCN), 4.
- Wyatt-Smith, J., Panton, W.P. & Mitchell, B.A. (1963) A manual of Malayan silviculture for inland forests. Kepong, Malaysia.

樹木の環境適応的遺伝子

津村 義彦 (つむら よしひこ、森林総合研究所)

1. はじめに

植物は種によって分布域が異なり、それぞれの環境に適応して生育している。広域に分布する種は種内でも多様な環境に生育している場合がある。高緯度と低緯度の場合には気温が大きく異なるだけでなく日射量も異なる、同じ緯度の高標高と低標高では日射量はあまり変わらないが気温に違いがある、日本海側の多雪地帯と太平洋側の寡雪地帯では冬季の湿度が大きく異なる。北海道の渡島半島から鹿児島の高隈山まで分布しているブナの場合、開葉、冬芽の形成時期、葉の大きさ、種子の大きさなどが地域によって明らかに異なる(図-1、Hiura *et al.*, 1996)。また日本海側と太平洋側のブナでは種子の発芽時期、開葉、冬芽の形成時期などが異なることが知られている。これは温度や日長と関連して淘汰を受けてきた結果であると考えられている。異なる産地の種子を集めて同じ場所に植栽して形質を調査する産地試験を行うことによって、これらの形質が遺伝子によって支配されているものが、環境によって左右されるものがある程度明らかになる。ブナについては産地試験の調査地が複数箇所を設定されているため上述の知見が得られてい



高緯度 ←————→ 低緯度

図-1 ブナの葉の大きさの違い

高緯度ほど大きな葉を持っている。これらは産地試験の結果、遺伝子によって決まっていることが明らかになっている。

る。

近年では分子遺伝学的解析の急速な進歩に伴い、適応に係わる遺伝子の解析が可能となってきた。本論では環境適応的遺伝子とは何か、またどのような解析を用いることによって検出が可能かについて解説したい。

2. 環境適応的遺伝子

樹木は同一樹種内でも様々な遺伝的変異を保有している。これを遺伝的多様性という。集団サイズが縮小して遺伝的多様性が低くなるとその種または集団は急激な環境変化に対応できず滅びてしまうかもしれない。十分な遺伝的多様性があれば、環境変化に適応した遺伝子型を持った個体が生き残る可能性がある。こうした遺伝子型をもった個体はどのようにして形成されたのか？ 遺伝的な変異は突然変異によって創出されるが、そのほとんどの突然変異は進化上、中立である。しかし、ごく稀に酵素活性などの強さを変える遺伝子が生まれることがある。この突然変異が特定の環境で生存に有利な場合に、この遺伝子を持つ個体は他の個体に比べ適応度が高くなり集団中に急速に広がり固定していく。このような遺伝子は上述のように特定の環境によって淘汰される。これらの遺伝子を環境適応的遺伝子と呼ぶ。集団中ではゲノム全体の中でこの遺伝子の周辺だけが世代が進むごとに同じ遺伝子型に固定されることになる。

3. 検出方法と事例

環境適応的遺伝子の検出には複数の方法がある(表-1)。単純に、ある遺伝子が淘汰を受けているかどうかの検定を行うだけで検出する方法もあるが、これは可能性のある遺伝子の検出にすぎず、次の段階で検出された遺伝子が本当に適応的かどうかを確認する必要がある。以下に現在用いられている方法とその研究事例について解説を行う。

(1) 遺伝子塩基配列による中立性の検定

遺伝子ごとの塩基配列を用いた中立性の検定は、遺伝

表-1 適応的遺伝子の検出方法

方法	データ	材料	ゲノム被覆度	直接性	費用
遺伝子塩基配列による中立性の検定	塩基配列	集団	小	小	小
ゲノムスキャン法	遺伝子型	集団	大	中	中
QTL 解析	遺伝子型、形質	家系	大	小	中
eQTL 解析、マイクロアレイ解析	遺伝子型、遺伝子発現量	家系	大	中～大	大
アソシエーション解析（環境、形質）	塩基配列、環境データ、形質データ	集団	小～大	中～大	小～大
混合マッピング	遺伝子型、形質データ	家系	大	中	中

子の塩基配列を複数個体で解析し、この遺伝子が進化上中立かどうかを集団遺伝のモデルに基づいて統計検定する方法である。検定方法には東京大学の田嶋教授が考案した Tajima' D (Tajima, 1989) を始め、いくつかの方法がある。これらの検定方法には一長一短があるため、複数の検定を同時に行うのが一般的である。森林の集団の大きさが歴史的に変化した場合もこれらの検定結果に影響を及ぼすため注意が必要である。

植物ではモデル植物であるシロイヌナズナを用いた研究がいくつか有り、その中で酵素多型の変異と関連している解糖系の酵素遺伝子である *PgiC* 遺伝子の 2 つのタイプの塩基配列のうち、一方が正の淘汰を受けていることが明らかになっている (Kawabe *et al.*, 2000)。この他、樹木でも針葉樹やポプラ、ユーカリで淘汰が検出された適応的遺伝子の候補が見つかった (Neale, 2007)。

(2) アソシエーション解析

アソシエーション（関連）解析は特定の形質や特定環境に関係すると考えられる遺伝子をデータベースから選び出し、これらの遺伝子配列と形質または生育環境との関係を調べる方法である。アソシエーション解析には様々な利点がある、1) 両親が分かっている人工交配家系を要しないため、自然集団でも特定の選抜集団でも解析に用いることができる、2) また材料のもっている全ての微量な効果の量的な遺伝子までも解析対象となる、3) 同じ遺伝子でも塩基配列が異なればその働きが異なってくるが、それら複数の対立遺伝子の効果を調べられる、4) 推定精度が高いため、遺伝子が組換えを起こして集団中の遺伝子が良く混ざっているランダムな状態では原因遺伝子の特定も可能な場合がある、5) 様々な系統で同様の効果を示す微細な効果の遺伝子が検出されることがあるため、DNA マーカーによる選抜 (MAS: Marker Assisted Selection) に利用できる。

樹木でのアソシエーション解析は、ユーカリでの材組

織のマイクロフィブリル傾角と cinnamoyl CoA reductase (CCR) 遺伝子の塩基配列との相関が最初の事例である (Thumma *et al.*, 2005)。その後、テーダマツの材の特性と遺伝子の塩基配列の関係が詳細に調査されている。例えば春材の比重と *sams-2* 遺伝子および *cad* 遺伝子、晩材の割合と *lp3-1* 遺伝子、春材のマイクロフィブリル傾角と α -tubulin 遺伝子との相関関係が明らかにされている (Neale, 2007)。この他、テーダマツ乾燥や病害抵抗性と複数の遺伝子との関連も明らかにされている。

(3) ゲノムスキャン法

多遺伝子座解析法（ゲノムスキャン法）はゲノム全体をカバーする遺伝子マーカーを作成し、複数の自然集団を対象にこれらの遺伝子型を調査して、個々の遺伝子座が集団遺伝学のモデルにあって中立であるかどうかを調べる方法である。統計手法には集団遺伝学の理論モデルを用いたものなどがある (Vasemägi and Primmer, 2005)。いくつかの方法があるが、現状では淘汰の方向性などが遺伝子によって異なるため、全てに万能な確実な方法はないので複数の方法を組み合わせて使用した方がよい。

これまでに数百から数千のマーカーを用いて研究した事例は 2005 年以降に多く見られる。北欧のサケの 8 集団を 95 座の EST-SSR で解析して、淡水、汽水、海水で有意に淘汰を受けていると考えられる遺伝子座が複数検出されている。樹木では、ケベック州のシロトウヒ (*Picea glauca*) の 6 集団を 534 の SNP_s で解析し、乾燥、耐寒性などに関連した候補遺伝子を多数検出している (Namroud *et al.*, 2008)。またスギでも分布域をカバーする 29 集団から材料を収集し、148 の遺伝子座について遺伝子型の調査を行っている (Tsumura *et al.*, 2007)。一般的に日本海側に分布するスギをウラスギ、太平洋側に分布するものをオモテスギと呼ぶ。形態的にはウラスギは針葉が短く枝がしなやかで雪を捕捉し



ウラスギ



オモテスギ

図-2 日本海側に分布するウラスギと太平洋側に分布するオモテスギの針葉。ウラスギは柔らかい枝で針葉の角度も浅いが、オモテスギは堅い枝で針葉の角度が広い。

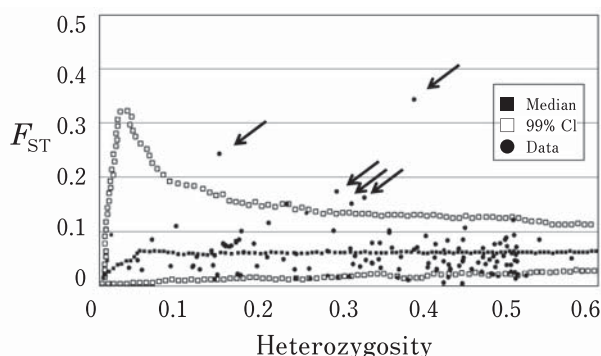


図-3 スギの天然林で検出された地域適応に関する候補遺伝子 (矢印, Tsumura *et al.*, 2007)

にくい形態をしているが、オモテスギは針葉や枝が固いものが多い(図-2)。このように異なる環境によって淘汰を受けている可能性がある。集団間の遺伝的な違いを示す遺伝子分化係数 G_{ST} の平均値は5%であったが(G_{ST} は集団間にある変異量を示す。逆の言い方をすれば集団内にはスギの全変異の95%が存在することになる。)、11 遺伝子座は遺伝子分化係数が10%を超えていた。これらは二つの系統の遺伝的分化に關与する遺伝子座の可能性がある。また、島モデルでの F_{ST} とヘテロ接合度の関係から非中立遺伝子を検出する Beaumont and Nichols (1996) の方法およびコアレッセントシミュレーションをもとにした Vitalis *et al.* (2001) の方法で遺伝的分化に係っている遺伝子座の検出を行った(図-3)ところ、それぞれ7 遺伝子座と13 遺伝子座が非中立遺伝子として検出された。しかし、共通に検出された遺伝子座はわずかに4 遺伝子座であった。今後、これらの研究で検出された候補遺伝子は真に適応に関連してい

るかを確認する必要がある。

(4) 量的形質遺伝子座 (QTL : Quantitative Trait Loci) 解析

量的形質遺伝子座 (QTL : Quantitative Trait Loci) 解析は特定の人工交配家系で遺伝子の地図を作成し、それぞれの個体の形質を測定し遺伝子型との関係を調べ量的に關与する遺伝子の地図上での位置と効果を明らかにすることである。量的形質とは樹高成長、肥大成長、花粉や種子の生産量など、単一の遺伝子によって決まるのではなく効果の異なる複数の遺伝子によって支配されている形質をいう。遺伝子座の位置や効果を調べるためには有効な方法であるが、連鎖地図の構築や正確な形質の評価が必要であるため、作物以外ではあまり研究が進んでいない。作物では生産性、開花などの農業上で重要な形質だけでなく、栽培化に係る成熟種子の非脱粒性、日長不反応性などの QTL のマッピングも精力的に行われてきた (Ross-Ibarra, 2005)。樹木でもマツ、ダグラスファー、ポプラ、ユーカリ、トウヒ、スギなどの有用樹種で成長、開葉時期、材質、耐寒性、着花性、発根性などの有用な形質の QTL 解析が行われてきた。QTL マッピングでは、それぞれの形質を制御している遺伝子の数や効果が明らかになり遺伝率の低い形質でもマッピングできる可能性がある。

(5) eQTL 解析、マイクロアレイ解析

cDNA マイクロアレイによる発現解析および eQTL (expression-QTL) は、近年に開発されたマイクロアレイ解析を用いた方法で、同じ遺伝子でも酵素活性が異なるような遺伝子の発現量の違いを用いて適応的な遺伝子を検出する方法である。cDNA は発現遺伝子であるが、部位、季節、環境によって発現量が変化する遺伝子も多い。これらを数万から数十万の遺伝子について同時に解析できる画期的な技術がマイクロアレイである。

cDNA マイクロアレイによる発現解析ではシトカトウヒの耐寒性のメカニズムを調べるために21840 遺伝子のマイクロアレイを使って緯度の大きく異なる3 集団の遺伝子発現の程度を比較して、耐寒性に関する遺伝子のスクリーニングを行っている。また得られた結果を RT-PCR で検証し、耐寒性に関する候補遺伝子を絞り込んでいる (Holliday *et al.*, 2007)。

(6) 混合マッピング法

混合マッピング法は QTL 解析の手法の一つであり、種間交雑や集団間交雑で得られた F_2 以降の集団を用い

て、地域環境に適応した種分化や集団間分化に関連した遺伝子領域を QTL 解析で特定する方法である。これも QTL 解析を用いるため、構築した家系で連鎖地図を作製し、目的の形質を測定し QTL マッピングを行わなければならない。種分化や集団間分化に係る遺伝子の数、位置や効果が明らかになるため有効な方法である。自然集団を対象とした研究では種分化に係る遺伝子をしらべたヒマワリ (Rieseberg, 1995)、*Mimulus* (Bradshaw *et al.*, 1995) の例が有名である。樹木での研究事例はまだない。

4. 統計上検出上の誤りと候補遺伝子の確認方法

遺伝子座ごとの中立性の検定、アソシエーション解析、マイクロアレイによる解析で得られた候補遺伝子には、少なからず統計検出上の誤り(擬陽性)が存在している。なぜなら検出には統計手法が用いられているため、100 遺伝子座を解析した場合、95%レベルの有意性水準では 5 遺伝子座が、99%レベルでも 1 遺伝子座が擬陽性として検出されることになる。これは 95%有意水準で 5 つの遺伝子が候補遺伝子として検出されても、それらは全てが擬陽性である可能性を示している。そのため、なるべく検定の基準を厳しくして行う方がよい。また手法によっては特定の条件で擬陽性が検出されやすいものもあるため、複数の手法を用いて確認を行う方がよい。検定基準を厳しくして複数の手法で検出された候補遺伝子でも、まだ本物かどうかは分からない。この確認にはさらに以下のような解析を続ける必要がある。

同じ染色体上に密接に連鎖した真の適応遺伝子が存在する可能性があるため、候補遺伝子の連鎖地図上での位置の確認を行う(Luikart *et al.*, 2003)。また QTL マッピングを行ってみて候補遺伝子と QTL の連鎖地図上での位置が同じであるか確認をする。また多遺伝子座解析で検出された候補遺伝子は塩基配列を読み取り、異なった形質間や環境間で比較を行う。また環境や形質の異なる多くの個体の候補遺伝子の遺伝子型を調べ再検定を行う。異なる系統間で候補遺伝子の発現量を比較する。最終的には候補遺伝子を用いた組換え体を作成して目的形質の比較を行う。このように適応的な遺伝子の検出はまだ容易ではないが魅力的な研究テーマである。

5. おわりに

適応的な遺伝子はどのくらいの数あるだろうか? 木村

資生の分子進化の中立説によると適応的な遺伝子はごく稀(全遺伝子の 1%以下)であるようだ。しかし、それぞれの環境に適応して生存しているため、多くの遺伝子座を調査することによって、地域適応的な遺伝子は必ず検出できる。さらに今後、分子遺伝学的な解析が簡単で安価になっていくと、どのような植物でも比較的簡単に分析ができるようになる。

このような遺伝子が見つかったとその応用性は広い。一つには保全目的の森林再生のための苗木生産の指標として使える。また造林対象種であれば苗木を作出する際に母樹が適応的な遺伝子型を保有しているかどうかを調べることで、造林が成功するかどうかを調べることができる。まさに遺伝子レベルの適地適木である。医学研究ではゲノム情報を用いたオーダーメイド医療が現実味を帯びてきている現段階で、植物でも同様のことができるようになるのも、そんなに遠い世界ではない。

引用文献

- Beaumont, M. A. and R. A. Nichols (1996) Evaluating loci for use in the genetic analysis of population structure. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. B* 263: 1619-1626.
- Bradshaw, H. D. Jr., S. M. Wilbert, K. G. Otto and D. W. Schemske (1995) Genetic mapping of floral traits associated with reproductive isolation in monkey flowers (*Mimulus*). *Nature* 376: 762-765.
- Hiura, T., Koyama, H. and Igarashi, T. (1996) Negative trend between seed size and adult leaf size throughout the geographical range of *Fagus crenata*. *Ecoscience* 3: 226-228.
- Holliday J. A., S. G. Ralph, R. White, J. Bohlmann and S. N. Aitken (2007) Global monitoring of autumn gene expression within and among phenotypically divergent populations of Sitka spruce (*Picea sitchensis*). *New Phytologist* 178: 103-122.
- Kawabe, A., K. Yamane and N. T. Miyashita (2000) DNA polymorphism at the cytosolic phosphoglucose isomerase (*PgiC*) locus of the

- wild plant *Arabidopsis thaliana*. *Genetics* 156: 1339–1347.
- Luikart, G., Pr. England, D. Tallmon, S. Jordan and P. Taberlet (2003) The power and promise of population genomics: from genotyping to genome typing. *Nat. Rev. Genet.* 4: 981–994.
- Namroud, M.-C., J. Beaulieu, N. Juge, J. Laroche and J. Bousquet (2008) Scanning the genome for gene single nucleotide polymorphisms involved in adaptive population differentiation in white spruce. *Mol. Ecol.* 17: 3599–3613.
- Neale, D. B. (2007) Genomics to tree breeding and forest health. *Current Opinion in Genetics & Development* 17: 1–6.
- Rieseberg, L. H., C. Van Fossen and A. Desrochers (1995) Genomic reorganization accompanies hybrid speciation in wild sunflowers. *Nature* 375: 313–316.
- Ross-Ibarra, J. (2005) Quantitative trait loci and the study of plant domestication. *Genetica* 123: 197–204.
- Tajima, F. (1989) Statistical-method for testing the neutral mutation hypothesis by DNA polymorphism. *Genetics* 123: 585–595.
- Thumma, B. R., M. R. Nolan, R. Evans and G. F. Moran (2005) Polymorphisms in cinnamoyl CoA reductase (CCR) are associated with variation in microfibril angle in *Eucalyptus* spp. *Genetics* 171: 1257–1265.
- Tsumura, Y., T. Kado, T. Takahashi, N. Tani, T. Ujino-Ihara and H. Iwata (2007) Genome-scan to detect genetic structure and adaptive genes of natural populations of *Cryptomeria japonica*. *Genetics* 176: 2393–2403.
- Vasemägi, A. and C. R. Primmer (2005) Challenges for identifying functionally important genetic variation: the promise of combining complementary research strategies. *Mol. Ecol.* 14: 3623–3642.
- Vitalis R., K. Dawson and P. Boursot (2001) Interpretation of variation across marker loci as evidence of selection. *Genetics* 158: 1811–1823.

「森林学の過去・現在・未来」(1)

フォーラム「森林学の過去・現在・未来」の趣旨

井上 真

(いのうえ まこと、日本森林学会 常任理事 (企画・広報・HP 編集担当))

今年は国際森林年です。国内外で様々なイベント等が行われることでしょう。また、昨年 10 月には「生物多様性条約第 10 回締約国会議 (COP10)」が愛知県名古屋市で開催され、「愛知目標」や「名古屋議定書」が採択されました。そして、COP10 での合意に基づいて提案された「国連生物多様性の 10 年」(2011-2020 年)および IPCC の生物多様性条約版である「生物多様性と生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム (IPBES)」の設置が国連総会で決議されたところです。

国内に目を転じてみると、政権交代に伴って 2009 年 12 月に「森林・林業再生プラン」が公表されました。それを受けて設置された「森林・林業基本政策検討委員会」の最終とりまとめ「森林・林業の再生に向けた改革の姿」が、2010 年 11 月に公表されています。今後は、市町村森林整備計画のマスタープラン化、森林経営計画 (仮称) の策定、意欲と能力のある主体に限定した「森林管理・環境保全直接支払制度」の導入、フォレスト制度の創設などを通し、10 年後の木材自給率 50%以上を目指しての施策が展開されることになるでしょう。3 月 11 日の未曾有の大地震災害からの復興についても考えなければならないでしょう。

こうした国内外の森林・林業・山村をめぐる激動する情勢のなかで、森林学は社会に対してどんな貢献ができ

るのでしょうか。現実の社会で生じている諸問題と研究行為との距離は、学問分野の性質により、また個々の研究者の信念によって異なるものでしょう。問題解決に直結する課題や技術開発を主目的とする実践的・実用的な研究もあれば、人類全体の知的財産の蓄積に貢献し 100 年後の人々に光明を与えるような基礎的な研究もあるでしょう。そのようなすべての研究に価値があることは疑いありません。実務に関わる方々も関わる森林学の場合は、まさにこの両者の共存とバランスが求められます。そして、実践的・実用的な研究だけが重視されがちな社会情勢のなかで、いかにすれば両者のバランスを維持し、実学としての森林学を発展させ、あるいは再構築することができるのでしょうか。

このような問題意識にもとづき、森林学を構成する代表的な分野の研究に携わっている本学会評議員の方々に「森林学の過去・現在・未来」について自由に論じていただく予定です。本号では日本森林学会会長である宝月 岱造氏が学会ウェブサイトに掲載したアピールを掲載します。次号 (63 号) から 1 号あたり 4 名づつ 3 号連続 (65 号まで)、合計 12 名 (1 人 1 ページ) の論考を掲載する予定です。そして、本誌への掲載と同時に学会ウェブサイトへ「ウェブ・フォーラム」としてアップロードいたします。どうかご期待下さい。

国際森林年にあたって

宝月 岱造

(ほうげつ たいぞう、日本森林学会会長)

今年は「国際森林年」(International Year of Forests)です。国連は重点的問題の解決を全世界の団体・個人に呼びかけるため年ごとに国際年を設定しており、2006 年 12 月の国連総会決議で「国際森林年」に設定された今年は、“Forests for People”をテーマに掲げています。また、我が国独自のテーマとして「森を歩く」が決まっています。このテーマのもと、現在と未来の世代が、全てのタイプの森林の持続可能な利用と保

全に向けた高い意識を育むよう、各国が森林に関する様々な行事を実施することになります。日本森林学会は、「国際森林年」にあたり、森林の重要性と森林に関わる私たちの役割を再確認するとともに、森林の持続的利用と保全への取り組みを、広く皆さんに呼びかけます。

森林は、木材やパルプの元となる樹木資源の生産の場として、私たちの生活を支える大切な生態系です。我が国でも、森林面積の 4 割がスギやヒノキを中心とする

人工林として利用されています。また、森林はその他にも多様な機能を発揮して、私たちの生存や生活に貢献しています。我が国では古くから、特に水質を浄化し保水する働き、河川の水量を安定させて水害を防ぐ働き、土砂災害を防ぐ働きに注意が払われており、現在では森林の5割がそのための保安林として保護されています。我が国は、国土の7割近くが森林で覆われている森林大国で、大変恵まれています。地球全体で見ると、森林は、地表の3割を占める陸地のそのまた3割しかありません。森林が存在することそのものが、日々生きていく上でとても幸運なことです。森林の様々な機能は、どれをとっても私たちの生活や生存にとって欠くことの出来ない大切なものです。私たちは、このことに改めて思いを致し、森林の保全に力を尽くさなくてはなりません。

近年地球全体の森林面積は、毎年日本の森林の3割分が無くなるという驚くべきペースで急激に減少しています。森林の持つ木材生産、水質の浄化・保水、水害や土砂災害の防止といった多様な機能を持続的に享受し続けるためには、この世界的な森林の減少を食い止め、既に破壊された森林を再生させる手だてを考えることが必要です。

我が国の森林について言えば、森林面積はここ何年もほぼ一定に保たれています。農林水産省が平成21年12月に「森林・林業再生プラン」を発表するなど、森林・林業の未来を守るための議論も盛んになってきています。様々な立場から知恵を出し合って、森林破壊への道をたどらないよう注意深く管理し保全して行かなくてはなりません。

一方、森林生態系の重要性に対する国際社会の認識も、1992年の地球サミット以来ますます深まってきています。たとえば、気候変動枠組み条約(UNFCCC)でも、森林はかつてないほど注目が高まっています。世界各地で森林が破壊されていますが、それに伴う二酸化炭素の排出量が石油や石炭の燃焼によるものに次いで大きいことから、UNFCCCでは、地球温暖化に直結する森林破壊を防ぎ、森林を適切に利用・管理して保全することを求めています。また、こうした背景のもとで、現在、持続可能な森林管理の努力に対する費用負担メカニズムであるREDD+が、熱い議論的となっています。

生物多様性条約(CBD)でも、森林はきわめて重要な生態系としてその役割が期待されています。2010年

10月に名古屋で開催された第10回締約国会議(COP10)では、2011年以降の新戦略計画(愛知目標)が採択されました。その中で、保護地域設定の目標値として陸域17%、海域10%が合意されましたが、この陸域の相当部分は森林生態系になると予想されます。「名古屋議定書」において、遺伝資源へのアクセスと利益配分(ABS)が議論の対象になりましたが、その相当部分は熱帯多雨林や熱帯季節林に存在しています。会議では、「SATOYAMA イニシアティブ国際パートナーシップ」が発足し、人為の入った二次的な自然における森林の重要性についても国際的な認識が高まりました。また、「生物多様性と生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム(IPBES)」の早期設立を第65回国連総会に提案することも決定されました。本年の「国際森林年」を契機に、森林に関わる主要プレーヤーである国家、市民や企業、森林に居住する先住民等、様々な人々が等しく森林の恵みを受けられるよう、今後さらに力強い国際的取り組みが期待されています。

私たち日本森林学会は、森林を持続的に利用し環境保全機能を守ることが、私達の生活に不可欠なことだと考え、森林管理の現場や基礎研究の場において、広く社会に対して様々な貢献をするべく、日々努力を重ねています。「国際森林年」を機会に、このアピールを読んでもくださった皆さん一人一人が森林に興味を持ち森林の重要性を認識し、私たちと手をたずさえながら森林の保全にとってプラスになる活動に参加して下さいをお願い致します。

さて、最後に学会員の方々に一言申し上げます。私たち日本森林学会の会員には、森林の将来を決める重要な提案に対して様々な形で関わって行くことが求められています。学会員の皆様にも、日頃の研究成果を実際の森林管理の場で生かせるよう、この機会により一層の活発な活動をお願い致します。また、国内外の政策的取り組みにも積極的にに関わり、森林の持続的利用と環境保全機能の充実を実現できるよう、力を尽くして頂きたいと思っています。日本森林学会は、これまでの学術活動や実務活動を基盤とした取り組みにより、「国際森林年」をサポートしたいと考えています。実行可能な良いアイデアをご提案頂けると幸いです。

(平成23年1月1日、日本森林学会ウェブサイト掲載、<http://www.forestry.jp/contents/shinrinnen.html>)

大台ヶ原

古澤 仁美

(ふるさわ ひとみ、森林総合研究所)

はじめに

大台ヶ原は、三重県と奈良県の県境に位置しており、日本で一、二を争うほどの降水量の多さで有名である。さらに、ニホンジカが森林生態系に大きな影響を及ぼしていることでも有名かもしれない。また、関西地域としては比較的人為影響の少ない森林が見られる場所として有名な観光地でもある。今回は、大台ヶ原の概要、ニホンジカによる森林生態系改変の問題、そして観光地としての見所の紹介をしようと思う。

大台ヶ原の概要

大台ヶ原山は紀伊半島南東部に位置する台高山脈の一部をなしている。山頂域（標高 1,400 ～ 1,700 m）は隆起準平原であり、緩やかな台地状になっており、周囲には断崖・絶壁が多数ある。この台地部分が通称「大台ヶ

原」である（図-1）。最高峰は日出ヶ岳で 1,695 m である。年平均気温 5.7℃、年降水量 4,700 mm と日本有数の多雨地帯であり霧も多い。地質は、砂岩と泥岩の互層である。土壌は大部分は褐色森林土で、急峻な尾根などにポドゾルが分布する（岡田 1957）。

大台ヶ原は、東大台地域と西大台地域の 2 つに大きく区分され、それぞれ植生タイプが異なる（柴田・日野 2009）。1960 年初頭 ～ 1970 年代の植生調査によれば、日出ヶ岳をふくむ東大台地域にはトウヒを主とした針葉樹林が分布し、林床に蘚苔類が優占していた。東大台地域よりも標高の低い西大台地域には、ブナ林（ブナウラジロモミ群集）が分布し、林床にスズタケあるいはミヤコザサをとまっていた。トウヒ林は日本の南限付近にあたり、ブナ林は太平洋型のブナ林としては西日本最大規模であり、いずれも希少性が高い。台高山脈一帯は 1936 年に吉野熊野国立公園に指定され、大台ヶ原は 1978 年から特別保護地区になっている。

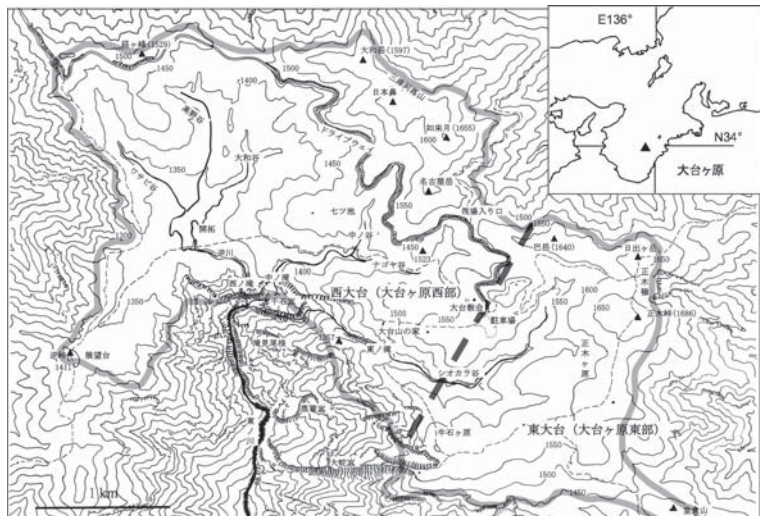


図-1 大台ヶ原の地形的概要と地域の名称。等高線の緩やかな台地上の部分（淡い線で囲まれた部分）を大台ヶ原と称する。図の中央やや右側にある線で、東大台地域と西大台地域が概ね分けられる。柴田・日野（2009）大台ヶ原の自然誌、東海大学出版会より転載。

大台ヶ原の森林生態系とニホンジカ

大台ヶ原では、大正年間に一部の場所で伐採が入った以外には、1950 年代まで植生の変化は比較的小さかったと考えられている。しかし、1960 年代以降植生は急速に変化してきた。その変化の要因としては、台風や大台ヶ原ドライブウェイ開通なども挙げられるが、ニホンジカの影響が大きいと考えられている（柴田・日野 2009）。1982 年 ～ 2006 年までの間、ニホンジカは特別保護地区内において 12.0 ～ 39.5 頭/km² と高い密度で安定しており、植生に影響を与えつづけてきた（柴田・日野 2009）。

東大台地域においては、1959 年の伊勢湾台風によってトウヒの倒木が発生した。そして、明るくなった林床にミヤコザサが分布を広げ、ミヤコザサを食料として利用するニホンジカが



写真-1 立ち枯れたトウヒが残るミヤコザサ草原



写真-2 林床植生がほとんどないブナ林



写真-3 シカ・ネズミ・ササの生物間相互作用を調査するための操作実験区。手前側タン板の囲いの中がネズミ排除区。奥には柵と網で囲ったシカ排除区がある。

侵入して増加したといわれる。風倒の後トウヒの立ち枯れが生じるようになったが、これにもニホンシカによる剥皮が関与していると考えられている。今では立ち枯れて白骨化したトウヒの下にミヤコザサ草原が広がる景観が大台ヶ原の代名詞のようにになっている（写真-1）。

一方、西大台地域において、林床にスズタケをともなうブナ林で1990年代からスズタケが消失して、林床植生の乏しい状態になっている（写真-2）。また、実生更新も阻害されて後継樹が育たず（Akahi and Nakashizuka, 1999）、森林の維持が危ぶまれている。これらもシカの関与によると考えられている。

このように、ニホンシカは植生を変化させてきたが、植生の改変は森林生態系のほかの構成要素（たとえば動物や土壌）に影響を及ぼすだけでなく、構成要素間の相互作用にも変化をもたらす。長年維持されてきた構成要素間の相互作用が大きく変化することで、森林生態系の回復力が減少している可能性もあり、森林生態系の保全再生計画をつくる際には構成要素間の相互作用を考慮に入れる必要がある。大台ヶ原ではニホンシカをふくめた構成要素間の相互作用について、多くの研究者が調査・研究を行っている（写真-3）。これらの研究成果が1冊の単行本（柴田・日野 2009）にまとめられているので、興味のある方はそちらを参照してほしい。

ちょっと観光案内

昔、大台ヶ原は山深く人も近づかない秘境であった。雨と霧が多く冷涼な自然環境と迷いやすい地形などのため度々起こった遭難事故が妖怪伝説を生み、人々が恐れをなして入山を敬遠したという。現在は、昭和36年に開通した大台ヶ原ドライブウェイをつかって自動車で山頂付近まで行くことができる。山頂駐車場からは遊歩道

が完備されている。東大台地域をめぐるコースには眺望の良い地点が多く、日出ヶ岳付近から熊野灘をのぞむ景色や、大蛇ヶ（だいじゃが）という断崖絶壁は一見の価値ありである。一方、西大台地域をめぐるコースでは、静かな森林散策が楽しめる。現在、西大台地域は利用調整地区となっていて、立入りにあたっては事前に手続きが必要となっている。大台ヶ原は、神秘に包まれていた昔とは大きく変わってしまったが、霧に包まれた森は今なお幻想的な雰囲気がある。一方、晴れるとからっとして、さわやかである。ぜひ、足を運んでいただけたらと願っている。

謝辞

東海大学出版会が図の転載を許可してくださったことに謝意を表する。

引用文献

- 柴田叡弐・日野輝明編著（2009）大台ヶ原の自然誌 森の中のシカをめぐる生物間相互作用． 300pp, 東海大学出版会．
- Akahi, N and Nakashizuka, T (1999) Effect of bark-stripping by Sika deer (*Cervus nippon*) on population dynamics of a mixed forest in Japan. *Forest Ecological Management* 113 : 75-82.
- 岡田隆夫（1957）大台ヶ原山周辺部の森林土壌について（I）地形、気象と土壌分布の関係．日本林学会大会講演集 67 : 118-120.

カンボジア国 コンポントム州・常緑林流域試験地

鳥山 淳平

(とりやま じゅんぺい、森林総合研究所)

今回紹介する流域試験地はカンボジア中央部、コンポントム州に位置し、森林総合研究所とカンボジア森林局が共同管理する森林気象観測タワー（12°45'N 105°28'E）を中心とする試験地です（図-1）。カンボジアの森林は、比較的現存量の大きく構成樹種の多様な常緑林と、より現存量の小さく樹種の少ない落葉林から構成されています。常緑林の代表的な分布域としては、南西部のココン、南東部のモンドルキリ、北東部のラタナキリ、そして中央部のコンポントムが挙げられますが、コンポントム以外の地域が国境に接する山地林・丘陵林であるのに対し、コンポントムは低地林であることが特徴です。コンポントムは熱帯モンスーン気候下にあり、年平均気温が27°C、年平均降水量が1600mmで12月～4月に明瞭な乾季がみられます。

この試験地には、シルト質の第四紀堆積物に由来する極めて貧栄養な土壌条件下にもかかわらず（写真-1）、樹高40mに達するフタバガキ科（*Dipterocarpus costatus* など）の林冠木が生育しています（写真-2）。高さ60mのタワーでは蒸発散量の観測を中心とした各種気象観測が行われており、その周囲で樹冠遮断量観測、樹液流速に基づく単木蒸散量の観測など森林の水循環に関わる各種観測が実施されています。タワー付近には、深さ約10mの大型土壌断面が作成され、土壌の形態を明らかにするとともに、地下水位の観測が継続されています。このように地下10mから地上60mまでの水分

移動を把握するとともに、さらに広域的に複数の流域からの河川流出量をモニタリングすることで（写真-3）、流域全体の水収支を明らかにする研究が行われています。

コンポントム州における研究プロジェクト

森林総合研究所は2002年から文科省プロジェクト「人・自然・地球共生プロジェクト（5年間）」の中の「アジアモンスーン地域における人工・自然改変に伴う水資源変化予測モデルの開発（代表、山梨大学）」における森林分野の構成課題に参加しました。また翌年度から農水省プロジェクト「地球規模水循環変動が食料生産に及ぼす影響の評価と対策シナリオの策定」において、メコン流域にある森林地域の水循環の実態把握および水資源賦存量の評価に関わる研究課題を担当しました。これらの研究プロジェクトにおいて、それまで観測データの得られていなかったカンボジア国を観測サイトとすることが決まり、入念な実地踏査によりコンポントムが試験地として選定されました。研究課題は、研究開始当初から①森林水文分野、②リモートセンシング分野、③森林土壌・生態分野の3分野によって構成されています。より詳細なプロジェクト開始の経緯、観測内容、研究目的、成果の概要については文献1、2、3をご覧ください。

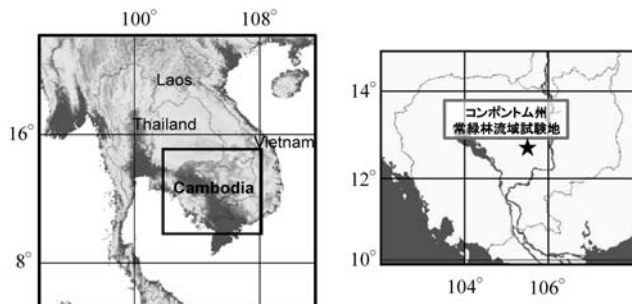


図-1 常緑林流域試験地の位置



写真-1 森林土壌の調査風景。白っぽいシルト質の土壌が深さ何メートルも続きます。



写真-2 道路沿いの森林の様子。200m程離れた場所（写真中央）でスコールが降っています。



写真-3 河川流出量の計測（メコン中・下流プロの紹介パンフレット⁵⁾より抜粋）



写真-4 大型土壌断面の調査風景

各分野の研究で明らかにされた本試験地での科学的知見は実に多くありますが、ここでは紙面上十分にご紹介することができない為、今回は私自身が関わってきた森林土壌・生態分野で得られた知見を簡単に紹介します。

常緑林の成立と厚い土層の関係

コンポントムと同様に厳しい乾季に特徴づけられるカンボジアのクラティエ州や、東北タイに分布する森林は乾季に葉を落とすのに対し、コンポントムの森林は乾季にも着葉し、蒸散を続けています。本試験地における土層厚や土壌孔隙特性、土壌水分の季節変化の調査結果から、コンポントムでは厚い土層が十分な水を貯えることで、常緑林の成立を維持していることが明らかとなっています。簡易貫入試験の結果によると、コンポントムの土層厚は13m以上に達しています⁴⁾。さらに深さ10mの大型土壌断面における土壌水分の季節変動と根系分布の観察結果から（写真-4）、森林が乾季に土層深くからの水を、深さ9m以上まで張りめぐらせた根系から取り込んで生育していることが明らかとなっています⁴⁾。このような地下深部の根系の直接観察によるアプローチは他地域にない本試験地独自のものであり、ここで得られた数々の知見は熱帯季節林における深層土壌や地下深部の根系の役割を示す重要なものです。

試験地の役割と今後の研究展開

コンポントムに広く分布するような低地常緑林は、すでに他の東南アジア地域では多くが消失しています。そのため、低地から丘陵地まで含めた熱帯モンスーン林の水文観測ネットワークにおいて、本試験地が含まれる意義はとて

も大きいといえます。現在は環境省プロジェクト「メコン中・下流域の森林生態系スーパー観測サイト構築とネットワーク化」において本試験地の観測データのさらなる充実とアーカイブ化を進めており、将来的にはアジアのみならず全球環境の観測ネットワーク構築への貢献を目指しています。また農水省プロジェクト「アジア地域熱帯林における森林変動の定量評価とシミュレーションモデルの開発」においては森林の成長を考慮したリファレンスシナリオの策定にも対応できるシミュレーションモデルの開発を目指した研究を進める予定です。

参考文献

- 1) 清水 晃（2006）カンボジア森林流域における水循環研究について．山林 1467：18-27.
- 2) 沢田治雄（2007）カンボジア平地林における水循環観測研究．熱帯林業 69：2-8.
- 3) Sawada H *et al.* Eds. (2007) Forest Environments in the Mekong River Basin. Springer, Tokyo.
- 4) 大貫靖浩ほか（2009）熱帯モンスーン気候下での常緑林の成立—厚い土層のはたらき—. 水利科学 52(6)：1-16.
- 5) FFPRI, Japan and FWRDI, Cambodia (2009) “Research Project on Change of Water Cycle Mekong River Basin CWCM-Phase II” -Construction of Integrated Forest Ecosystem Observation Site and Observation Site and Observation Network Formation in middle and lower Mekong River Basin-.

樹木は動かない

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)



私の勤務する筑波実験植物園にはセコイアメスギという常緑針葉樹が植栽されています。英名をレッドセコイアといい、樹高115mのギネスブック記録をもつ樹としてよく知られています。植物園に植栽されている彼らの高さはというと、残念ながら20mとまだまだ小さい。それでも、プロムナードにメタセコイアと交互に植栽された延長100mの並木はなかなか壮観で、秋に見られる紅葉と常緑のコントラストは見事です。私はそのセコイアメスギのすぐ脇でバックホーに乗っていました。忘れもしない平成23年3月11日午後2時40分頃のことです。

作業を終え、地面に降り立つと少し揺れているように感じました。操縦中はかなりの振動を受けるので、その余韻だろうと思っていたのですが、周囲の反応で地震だと知りました。つくば市は日ごろから地震が多いので、少々大きい揺れがあっても特に騒いだりしません。しかし、いつもならすぐに終わるそれが、今回はなかなか収束に向かわない。次第にあちこちで声が上がり始めました「何かが変だ、この地震はいつもと違う…」その直後です、今まで聞いたことのない大きな地響きが、はるか遠くから凄い勢いで植物園を襲ったのは。突如始まった轟音と地面のうねり、その場で硬直する私たちに、激しさを増してさらに迫り続ける。その揺れの上限がどこにあるのか、いつ止むのか、まったく経験したことのない大変な事が起きていることを理解しました。呆然としている私の目の前にトチノキの大きな枯れ枝が落ち、「そうだ、樹を見なければ!」と、初めて植物園全体に意識を向けました。最初に視界へ飛び込んできたのは、震度6弱に揺れる温室。振動やゆがみによって、狂ったように乱反射をするガラスに目を奪われました。次に見たのはセコイアメスギをはじめとする大きい樹々達。彼らはあるという、振動に身を任せるかのように、ガクガクユラユラと不規則に揺れていただけでした。私たちの狼狽ぶりに反し、何も問題が無いと言わんばかりに、ずっしりと立っていたのです。それを見た私は、この地震で園の植物に大きな被害は生じることはないと判断し、同時に、その地に根を張った存在に安堵しました。そして彼らの様子を見ている間に、約2分間続いた記録的な大地震

は収まりました。その後の園内調査では、事実、樹木の被害は無いに等しいものでした。その場に芽吹いたが最後、その場所から動くことなく長い生涯を生きる構造を得た樹木にとって、地面が揺れるというのは大したことではなかったようです。

地震により、3日後に開催予定だった蘭展は中止となり、温室は修繕が完了するまで全面閉鎖となりました。さらに空気中には、それまでなかった不穏なものが漂うようになってしまいました。そんな所在ない落ち着かない毎日でも、植物達にはいつもどおりの春がやってきました。福寿草の黄色、節分草の白、そして梅や桜の赤や桃色、動かない彼らはこの場で春にやるべきこととして花を咲かせ始めたのです。私は樹木の何かに惹かれ、学生時代から現在に至るまで約20年間樹木に係わり続けてきましたが、あの震災以来、樹木は動かないという基本的なことの裏に、長年求めていた答えを得たような気持ちになっています。樹木にとって、生涯をかけてやるべきことはただ一つ、その場所で育ち生涯を終えることです。何もかもに耐え、何もかもを受け入れる。岩手県の名勝「高田松原」の7万本あったマツが1本を残し津波に流されました。己の限界を超える力を受ければ直ちに死が待っている。動かないとはそのようなことなのだ、おぼろげながら気がつきました。そこには、生に対する圧倒的な骨太さと潔さ、そして儚さがあるのだ。そんなふう思うようになったのです。では、動ける私が彼らに対してできること、なすべきことは何なのでしょう。折しも、今年の4月から私は筑波実験植物園の屋外エリア全域を管理する立場になりました。現在被災中のこの植物園で、しかし止まることなく進む植物の芽吹きと成長の中、私の自分自身への問いかけはまだ続きそうです。

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。

山形県のナラ枯れ被害で研究者と現場技術者が活用する被害予測技術と総合防除システム

斉藤 正一 (さいとう しょういち、山形県森林研究研修センター)

1. 拡大するナラ枯れ被害

ブナ科樹木萎凋病（以下ナラ枯れ）は、ミズナラやコナラを主とするブナ科の樹木に枯れを引き起こす流行病です。ナラ枯れの原因はナラ菌と呼ばれるカビの一種で、このカビはカシノナガキクイムシ（以下カシナガ）と呼ばれる材の穿孔虫によって媒介されます。被害は最北端の青森県から最西端の山口県まで日本海側各地を中心に太平洋側も含めて全国的な規模で発生しており、今なお被害は拡大増加傾向にあります（図-1）。東北地方では2010年度に新たに岩手県と青森県で被害が発生し、東北全県が被害地になりました（図-1）。東北地方では、枯死しやすいミズナラの現存量が多いことから、今後の被害量の増大と被害地域の拡大・分散が危惧されます。

山形県での最初のナラ枯れ被害は、1959年日本海に面した鶴岡市（旧西田川郡温海町早田）での発生が記録されています（図-1）。当時、被害地周辺では燃料に使用する薪や炭を得るため、民有林の広葉樹は定期的な伐採により小径の若い山になっていました。一方、国有林の広葉樹は大径木生産を目指した壮老齢の山という構図でした。被害は、大径木が多く生育する国有林で発生し、伐採を繰り返して山を利用し萌芽で更新していた民有林にはありませんでした。被害発生地域の住民は枯死木の払い下げを即座に国有林に申し出たため、枯死木は直ぐに伐採され燃料として利用されました。当時は知らず知らずのうちに、ナラ菌の媒介者であるカシナガは、焼却という最高の駆除方法によりほぼ全量殺虫されていたのです。1959年以降、同地区の被害は国有林内を飛び火して数年続きましたが、枯死木の燃料利用＝カシナガの駆除により、やがて終息したと古老は語っていました。

このように、里山の樹木が薪炭材やその他の用途で継続的に活用されていれば、現在の被害も減少あるいは終

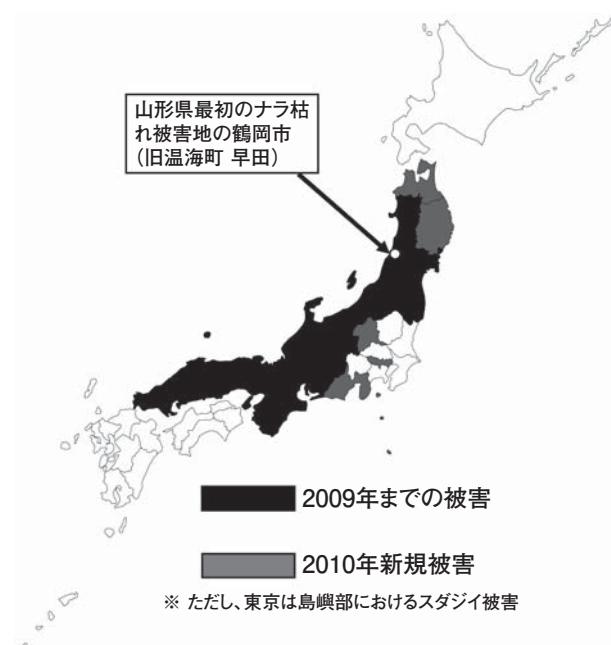


図-1 2010年までのコナラ・ミズナラを主としたナラ枯れ被害地と山形県最初のナラ枯れ被害地

息していく可能性は十分にあります。しかし、燃料革命により燃料が薪や炭から石油や電気に変化したことで、当時の被害林分周辺の民有林はその後利用されなくなりました。放置され、伐採されなくなったナラ類は成長し続けて、45年を経て今度は国・民有林を問わず再び被害が発生しました。日本各地のナラ枯れ被害が発生している広葉樹林では、住民が枯死木を燃料に利用しないばかりか、伐倒すること自体に経費がかかることから、枯死木が放置される事態に陥っています。これが、被害が終息していた昔と、被害が終息しなくなった現在との大きな違いです。日本の山林には所有者がいて保全管理する事になっていますが、伐採による萌芽更新を繰り返し

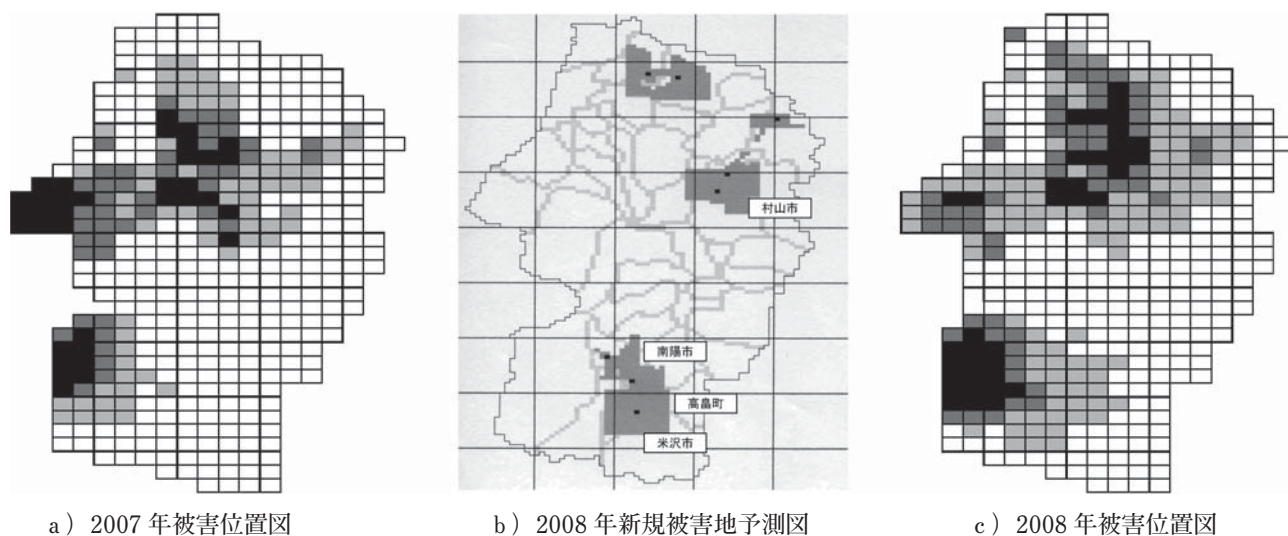


図-2 ナラ枯れ被害位置図と被害予測図

ていた森林は燃料革命以降はただ放置され、カシナガに繁殖場所を提供しているため被害が激化しています。また、奥地林の国有林には、この病気で枯死しやすい大径のミズナラが多く分布しています。このように、現在ではナラ枯れ被害が発生しやすくなっています。

私たち森林病虫害の研究者と行政担当の技術職員は、こうした背景をかかえたミズナラやコナラの広葉樹林をナラ枯れ被害から守り、発生した被害を可能な限り軽減する技術の開発と防除事業の実施を県民から強く求められてきました。

2. ナラ枯れ被害と向い合う1段階

～被害予測技術を作り そして 使う～

(1) 被害地の予測

ナラ枯れは、ミズナラの附存量が多い森林で被害が激化します。被害を最小限に留めるには、枯死木の効率的な駆除に向け、被害をいち早く発見する事が重要です。すなわち、今年または来年被害がどの地域で発生するか予測できれば有効な対策に繋げることができます。

山形県では、1993年からの調査結果をもとに、ナラ枯れ被害の予測技術を開発しました。そして、予測により得られる情報を整理して、2007年から次年度の被害

予測として県内全域の市町村に伝えています。その手法は次のとおりです。

まず、環境省が配付する山形県の自然環境 GIS の植生図をもとに、ナラ類を中心とする植生図に編集します。これを Excel のワークシート上でメッシュ図に作り直し、被害が発生するミズナラなどナラ類が多く生育する位置の情報を整理しました。次に、前年に被害の発生した場所をメッシュ図に記録して前年の被害位置図を作成します(図-2a)。次に、前年の被害先端地を点(●)でメッシュ図に落とします(図-2b)。この被害先端地から被害が拡大する範囲は、これまでの被害拡大距離データより最大で約14kmと想定しました(表-1)。すなわち、前年度の被害先端地(●)から14kmの範囲内に生育するナラ林を当年度の新規の被害発生が予測される場所とみなしました。この場所を当年度の被害予測地域として灰色で表示して、新たに被害が発生する可能性のある市町村名を記入した新規被害地予測図を作成しました(図-2b)。新規の被害が予測された多くの場所で、実際に被害の発生が確認されました(図-2c)。前年の被害位置図と当年の新規被害予測図は、春季に行政が開催する森林病虫害担当職員の会議資料などで県内の市町村に配布できるようにしました。この新規被害地

表-1 ナラ枯れ先端被害地の前年と当年の距離

年度	先端地での被害 拡大距離 (km)
1994	3.825
1995	7.700
1996	6.450
1997	1.075
1998	5.375
1999	7.350
2000	3.100
2001	3.275
2002	8.950
2003	3.850
2004	22.100
2005	26.600
2006	15.215
2007	13.400
平均	9.5
95% 下限	4.9
95% 上限	14.1

予測図は、新規被害が予想される市町村で、被害監視や被害調査、さらに防除計画に活用する事ができました。

(2) カシナガ新成虫の初発日の予測

カシナガの新成虫は枯死木から羽化脱出しますので、枯死木の駆除を新成虫の羽化脱出前までに完了していれば、被害の軽減には大変役に立ちます。そこで、山形県では 1992 ～ 2000 年の 9 年間におけるカシナガの初発日調査から山形県内におけるカシナガの初発日を予測する技術を開発しました。予測された初発日は市町村に対して 2000 年から広報しています（斉藤ら 2003）。

カシナガの捕獲には、エタノールを誘引剤とした衝突板トラップを用いました。このトラップに最初にカシナガが捕獲された日を初発日としました。山形県でのカシナガの平均的な初発日は 6 月 20 日ごろですが、年次により大幅に変動します。この変動は、4 ～ 5 月の気温により樹幹内のカシナガ幼虫の生育期間が変化して生じる事が、気象データの解析から考えられました。これを踏まえた初発日の予測式を作成するため、4 月 1 日から初発日までの日数と 4 ～ 5 月の気温の回帰式を算出しました。4 ～ 5 月の気温については、発育に最低限必要な温度、いわゆる発育ゼロ点を基準温度とし、4 ～ 5 月の日平均気温が基準温度を超える日の日平均気温と基準温度の差を積算した値、いわゆる有効積算温度を適用しました。カシナガは飼育が非常に難しく、まだ基準温度となる発育零点が決まっていますが、各地のあてはまりの良さを検討した結果、地域により 10℃と 9.5℃に決

めることができました。回帰式と各地域の基準温度は次のとおりです。

$$y = -0.1273 \times x + 107.7170 \quad r^2 = 0.8491 \quad (n = 9)$$

y：初発日：4 月 1 日からの日数、x：基準温度を超える 4 ～ 5 月の日平均気温の累計

※気象データの測点と基準温度

・置賜地方以外 国土交通省国道 112 号線上名川観測点

（北緯：38 度 35 分、東経：139 度 51 分、標高 130m）、基準温度 10℃

・置賜地方 気象庁山形県小国町小国アメダス測点

（北緯：38 度 5 分、東経：139 度 44 分、標高 140m）、基準温度 9.5℃

この回帰式に 4 ～ 5 月の気温を当てはめて計算した初発日予報は、山形県森林研究研修センターが 6 月 1 日に県庁森林課に市町村単位の予報を伝えます。県庁森林課は、即日、県内関係市町村に電子メールで連絡します。市町村では、この予報をもとに春季の駆除作業の終了予定日を作業委託先の森林組合などに伝えます。このように初発日予測とあわせて情報を迅速に伝達するシステムを構築することで、効率的な防除の実施を可能にしています。

被害が北進している東北地方では、秋田県と山形県が協力して、秋田県版のカシナガの初発日が予測できる回帰式を作ろうとしています。このため、秋田県職員と国有林職員が協力して、被害地の現場にカシナガ捕獲用トラップを標高を変えながら複数設置してカシナガの初発日を観察しました。この観察結果をもとに、山形県は被害の北進スピードが早い秋田県沿岸部を中心とした地域でカシナガの初発日を予測する暫定的な回帰式を作成しました。この回帰式は、2011 年度から駆除や予防作業終了の目安として利用される予定です。同様に沿岸部で被害が出ている青森県でも、被害地の緯度や標高に合わせたデータに変換して利用するための検討や情報提供をしています。このように、初発日予報を山形県に留まらず、広域的な防除の一手法として東北全体で使える技術に発展させることを目指しています。

3. ナラ枯れ被害予測技術を有効に生かすには

ナラ枯れ被害軽減のための防除技術はこれまで多数開

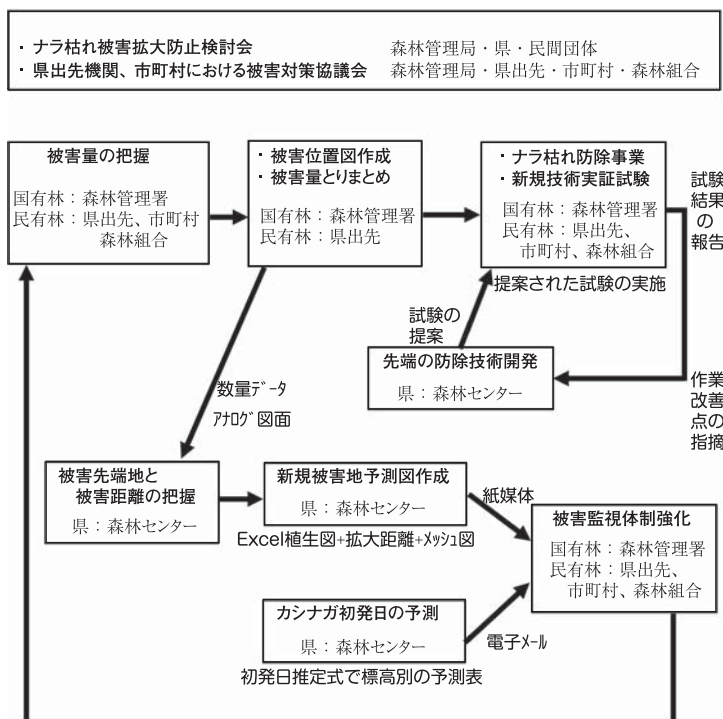


図-3 山形県におけるナラ枯れ防除システム

発されました。山形県森林研究研修センターが開発した技術には、材内のカシナガを駆除するためくん蒸剤 NCS を立木に注入する NCS 立木駆除法（斉藤ら 1999、2000）、ナラ菌を駆除する殺菌剤を被害を受ける前に注入する殺菌剤樹幹注入予防法（斉藤ら 2008）、カシナガ合成フェロモン剤を活用したおとり木トラップ法（斉藤ら 2010）と、おとり丸太法（斉藤ら 2011）などがあります。

ナラ枯れ被害の軽減に結びつく予測技術や防除技術は、実用的な事業として活用されなければ意味がありません。これらの技術を統合してナラ枯れ防除システムとして機能させるためには、人と組織のネットワークが一番大切です（図-3）。

ナラ枯れ被害は民有林と国有林の区分なく発生しますので、これを前提とした協議会などの共同組織により、民有林と国有林の防除計画と実施に関して集中的な対策をとるために協力体制を築き上げる必要があります。民有林と国有林が連携して、被害位置や被害本数といった基本的な情報を共有化することにより、組織的・段階的な防除エリアの設定、それぞれの事情に応じた被害軽減

のための防除計画や事業の実施が可能になります。研究機関の役割は、よりよい防除技術の創出と実用化を意識して改善の手を緩めず、多数開発した技術を各地の現場に合せた実施可能なパターンでメニュー化して提示し、改善点を現場の事業実施担当から細かく聞き出して対応する事にあります。

これらの実現に向け、山形県の研究者と技術者は、現場とともに出かけ、3つの合い言葉をもとにナラ枯れ被害に向き合っています。1つ目は否定しない。否定するときは対案を出そう。2つ目はできることからやろう。3つ目はあきらめないでいこう。このように前向きに取り組むことで、山形県は日本一の被害本数でありながら、研究者と現場の技術者が一体となって広葉樹林を守るための総合的防除システムの構築に成功しています（図-3）。

引用文献

- 斉藤正一・中村人史・後藤 徹（2003）山形県におけるカシノナガキクイムシの初発日の予測．東北森林科学会誌 8：99-101．
- 斉藤正一・中村人史・衣浦晴生・所 雅彦・岡田充弘（2010）ケルキボロールを装着したナラ類立木トラップによるカシノナガキクイムシの大量誘殺．第 121 回日本森林学会学術講演集：CB-ROM（Pb2-05）．
- 斉藤正一・中村人史・三浦直美・小野瀬浩司（1999）ナラ類集団枯損被害の薬剤防除法．森林防疫 48：84-94．
- 斉藤正一・中村人史・三浦直美・小野瀬浩司（2000）ナラ類集団枯損被害立木への NCS 注入によるカシノナガキクイムシとナラ菌の防除法の改良．林業と薬剤 152：1-11．
- 斉藤正一・野崎 愛（2008）ナラ枯れと里山の健康 第 7 章被害形態別の防除方法．林業改良普及双書 No.157．135-157．
- 斉藤正一・岡田充弘・衣浦晴生・所 雅彦（2011）集合フェロモン剤と大量集積丸太によるカシノナガキクイムシの誘引．第 122 回日本森林学会学術講演集：CD-ROM（Pa2-100）．

里山利用で森をうごかす

宮浦 富保

(みやうら とみやす、龍谷大学)

シリーズ
うごく森 16

はじめに

「うごく森」には「機能を発揮する森」「状態が変化する森」という意味を読み取ることができるでしょう。「うごく」という語を辞書で調べてみると、最初に出てくるのは「物の位置・方向などが変わる」という説明ですが、他に「機能する」「状態が変化する」などの意味が記されています（松村 2006）。里山環境は持続的に利用されることで人の生活に役立つ機能を発揮し、多くの生き物の生存を支えてきました。化石燃料を中心とする資源利用のグローバルな普及により里山が利用されなくなった結果、里山の森はかつての機能を果たさなくなってきました。「うごく森」ではなくなってしまったのです。里山の森を「うごく森」にする取り組みの事例をいくつか紹介したいと思います。

里山の歴史

昔の日本では、里山の落ち葉を掻き集めて燃料や肥料にし、若葉のついた小枝を刈り取ってきて田畑に鋤き込み（刈敷き）、養分を補っていました。現在のようにグローバルな規模の経済はありませんでした。人々はローカルな里山の資源に依存して生活していました。限りある資源を持続的に利用するための入会（いりあい）のような利用規制（三坂 2007、鈴木 2006、2007）や、お互いに労働力を提供しあう結（ゆい）のような制度が各地にありました。里山から得られる恵みは、食料、染料、紙の原料、生活の道具など多岐にわたっており、地域の食文化や生活様式、行事などと密接に関係していました。持続的な利用が行われている里山は、その地域の文化や制度にも関係する重要なものでした。

図-1 は、江戸時代末期の嘉永2年（1855年）、琵琶湖南湖の湖上から周囲の風景をスケッチした「琵琶湖眺望真景図」という絵図（大津市歴史博物館 1999）のうち、比叡山が描かれている部分です。図の左上に1本の針葉樹と思われる樹木が描かれています。現代の地図

帳で、この木が描かれている場所を調べてみると、「一本杉」という地名が見つかりました。元治元年（1864）に、京都の市内から比叡山を望んで描かれた「再撰花洛名勝図会」という絵図があります（小椋 1992）。別の作者が描いたものですが、「琵琶湖眺望真景図」に描かれている樹木の位置と対応する部分にスギの木と思われる樹木が描かれています。この当時、比叡山の近くのこの場所に大きなスギの木が立っていたのでしょうか。両方の絵図とも、この1本のスギの木を除いて、目立った樹木が描かれていません。1800年代の中頃、比叡山の回りには樹木がほとんど生えておらず、草刈りの場所として利用されていたと考えられます。刈り集めた草は、家畜の餌や田畑の肥料に用いられたのでしょうか。江戸時代には里山の草木は人間の生活に大いに利用されており、日本の多くの場所で樹木がまばらな風景が広がっていたようです。

資源利用が過度に行われた例が、琵琶湖南部の田上（た

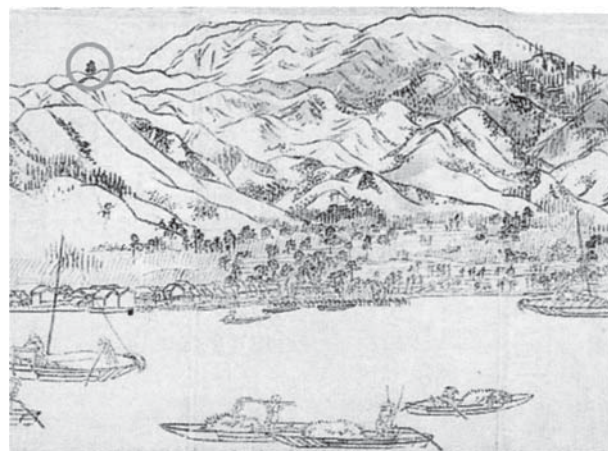


図-1 嘉永2年（1855年）、琵琶湖南湖の湖上から周囲の風景をスケッチした絵図。

大津歴史博物館所蔵の琵琶湖眺望真景図（広瀬柏園画）（大津市歴史博物館 1999）のうち比叡山の部分。

なかみ) 山系にみられます。滋賀森林管理署の資料にもとづいて(滋賀森林管理署 2002)、田上山の歴史を簡単に振り返ってみましょう。

田上山の木材が最初で大規模に利用されたのは7世紀終わり頃のことでした。藤原京造営のために、田上山のヒノキが大量に伐られ、瀬田川、宇治川そして木津川を流して奈良まで運ばれました。8世紀の中頃には、石山寺の造営のための木材が田上山から伐り出されました。その後、周辺の住民による建築資材や薪の採取が継続して行われたようです。

田上山系には風化の進んだ花崗岩が広く分布しています。大昔の田上山はヒノキの大木からなる森林に覆われていたといわれています。そのため、崩れやすい花崗岩土壌でも土砂災害などは起こりにくかったと思われます。大量の木材が伐り出され、継続して樹木が伐採されるようになると、土壌をつなぎ止める根の働きが弱くなり、土砂崩れが発生するようになりました。17世紀後半には、田上山から流出した土砂によって大戸川の河床が上昇し、水害が多発したことが記録されています。

この地域では、マツの根の掘り取りが行われたという記録もあります。マツの根は夜なべ仕事の明かりとして利用されました。樹脂を豊富に含んでおり、容易に燃え、明かりとしても優れています。マツの根の掘り起こしは冬の間の男の仕事であり、17世紀初めには始まっていたものと思われます。

枯れたマツの根も土壌をつなぎ止める効果が多少はあったのでしょう。根を掘り起こされることによって、土砂崩れがさらに発生しやすくなりました。明治元年(1868年)に、淀川水系一帯で大規模な水害が発生しました。これをきっかけに、明治政府は本格的な砂防工事、治山工事を開始しました。

現在では田上の山は遠目には緑に見えます。しかし、岩が露出したところもあちこちに見受けられます。千数百年以前にヒノキやスギの鬱蒼とした森林があったことを想像するのは難しい状態です。田上は過剰に利用された里山といってよいでしょう。

適度に利用されてきた里山は、人間と自然との共生の場であったということが出来るかもしれません。里山環境には多くの生物が存在しており、里山環境を維持することが生物多様性の保全のために重要であることが指摘されています(田端 1997、守山 1988)。しかしながら、その共生のあり方は必ずしも調和的なものであったとは

いえないでしょう。人間が自分にとって都合のよい自然利用を行い、そこに維持されてきた環境にたまたま適応できる生き物たちがいたということなのかもしれません。ただし、里山環境が持続的に維持管理されてきたことは生物の生存にとって大変重要であったでしょうし、里山が空間的にも時間的にも多様に利用されてきたことは生物多様性の豊富さと密接に関係していたと思われます。

里山の現状

かつての日本では、里山は地域共同体の中核を占めるような大きな存在であったといえるでしょう。ところが現在、里山は利用されなくなり、放置されています。藪が鬱蒼と茂り、暗く見通しのきかない森林になってしまいました。

かつて日本の里山にはアカマツがたくさん生えていました。痩せた土地でも元気に育つことができるアカマツにとって、落ち葉掻きをしたり、柴刈りをしたり、定期的な伐採が行われるような里山は、好都合な環境といえます。3世紀頃にはアカマツは日本でほとんど目立たない樹木でしたが、日本社会が急速に発展した6世紀以降、アカマツの分布が全国に広がったといわれています(只木 1988)。里山の管理が行われなくなり、落ち葉が堆積して、土壌中の養分が増加し、暗い環境に強い他の樹種との競争が激しくなり、さらにマツ材線虫病による松枯れが広がり、アカマツはどんどん枯れていってしまいました。

アカマツが衰退していったのと対照的に、現在の里山ではタケが大繁殖しています。元々は、農家などの近くに植えられていて、タケノコが収穫され、竹製品の材料として使われてきましたが、安いタケノコの輸入やプラスチック製品などの利用増加に伴って、国内でのタケノコ収穫や竹材の利用がほとんど行われなくなってしまいました。管理されなくなったために、竹林の面積がどんどん広がっています。タケは地下茎に栄養を蓄えていて、新しいタケの成長にはこの栄養を回すことができるので、暗くなった里山林の中でも勢力を拡張できるのです。

イノシシやクマ、ニホンザル、シカ、タヌキなどの獣による農作物などの被害が大きな問題になっています。この問題の一端には里山の現状が関係しています。手入れされないために見通しの悪くなった里山は、野生の動物たちに格好の隠れ場所を与えています。

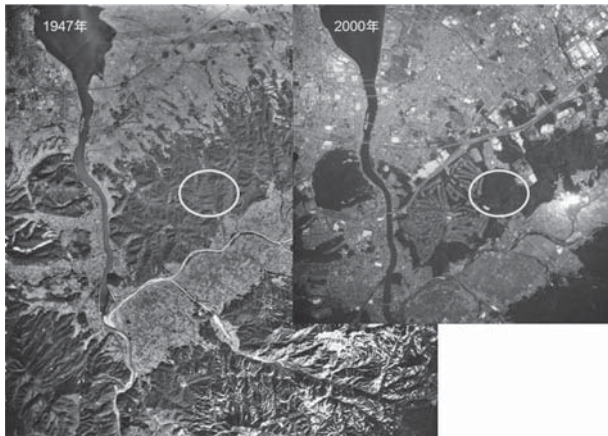


図-2 1947年と2000年に撮影された航空写真による
瀬田丘陵の比較
○で囲んだ場所が「龍谷の森」

龍谷の森での取り組み

琵琶湖の南部に丘陵地帯があり、そのほぼ中央部に龍谷大学が所有する森林があります。龍谷大学は1994年に、このキャンパスに隣接する約38haの森林地域（龍谷の森）を購入しました（図-2）。

瀬田丘陵は、かつては里山として利用されていたと考えられます。1947年当時、瀬田丘陵は全体が森林に覆われていました。その後、ゴルフ場や図書館、高校、大学、公設市場などが建設され、2000年には、まともに残っている森林の面積は1947年の2～3割程度に減少しました。滋賀県南部地域は、大阪や京都のベッドタウンとして急速に人口が増加しており、商工業が発展しつつあります。龍谷の森を含む瀬田丘陵の森林は、都市化が進行するこの地域において貴重な存在となっています。

龍谷大学はキャンパスの拡張や運動施設の造成を主な目的として龍谷の森を取得しましたが、アセスメントによりオオタカの営巣が確認されました。このため龍谷の森の開発計画は中止され、現在は森林を利用した研究・教育と里山保全の実践の場として利用しています（須川2007、丸山2009）。

文部科学省の補助事業として里山学・地域共生学オープン・リサーチ・センター（2004～2008年度）および里山学研究センター（2009～2011年度）という研究組織を作り、里山に関する総合研究を実施しています。生態学、社会学、経済学、法学、民俗学、哲学などの分野の研究者が集い、龍谷の森を拠点として研究を進めて



図-3 「龍谷の森」での落ち葉集めと堆肥作り

います。得られた知見について、学術報告を行うことはもちろん、学生や地域住民を対象とした講義やセミナー、講演会などで公表し、教育や地域貢献に活かしています。

里山（森林）を所有し、これを拠点として研究・教育を行っているいくつかの大学が連携し、大学間里山ネットワークを形成しています（高桑2009）。金沢大学、京都女子大学、九州大学、龍谷大学の4大学で、教員・学生の相互交流を開始し、さらに中部大学、長野大学、宇都宮大学、金城学院大学が加わり、定期的に研究会を開催しています。2011年度は宇都宮大学で研究会が開催される予定です。

龍谷の森もかつてはアカマツ林が優占していましたが、松枯れによって多くのアカマツが枯死し、コナラが優占する林となってきました。そして現在、ナラ枯れによりコナラの大量枯死が進行しています。長期間にわたって人間が関与することによって形成されてきた里山環境ですが、数十年という比較的短期間の放置によって植生は大きく変化しつつあります。こうした里山環境の変化の観察と里山保全の活動を、大学内のカリキュラムとして実施することはもちろん、地域住民との協働で行っています（図-3）。

里山で地域おこし

里山の環境と資源を利用して、地域の再生と活性化を目指した取り組みが各地で行われています。ここでは、林野庁の森林総合利用推進事業として2010年度から実施されている3つの事例を紹介します。この事業は、現在放置されている里山林の整備を自立的・継続的に行うための指針を作成することを目的としています。具体的には、地域の特性に応じた持続可能な里山林再生のた

めのモデル構築、人材育成と実行指針の作成、里山利用の情報蓄積と共有化を当面の目標としています。

飯豊町（いいでまち）

山形県飯豊町中津川地区には約 12000 ha の広大な財産区有林があります（図-4）。約 6 割はブナ、コナラ、ミズナラ等の広葉樹の森であり、古くから用材や薪炭材の生産が行われてきました。1 戸あたりの利用面積は、山林 3 反歩（3 a）、燃料林 4 町歩（4 ha）、営場として 3 反歩であったそうです。1 戸あたりの薪の使用量は年間 1 反歩の雑木林で間に合ったそうです。燃料林 4 町歩という割り当ては、40 年程度で伐採が一巡する面積ということになります。

昭和 30 年代には約 3000 人（500 世帯）の人口でしたが、ダム建設に伴う転出などもあり、現在は 360 人（138 世帯）まで減少し、深刻な過疎化が進行しています。伐採されなくなり、コナラなども大径木となってしまって萌芽力の低下が心配されています。また、ナラ枯れの被害が急速に拡大しており、景観上も資源の有効利用の面からも問題となっています。

過疎化や森林資源の低質化といった問題を深刻に受け止めて、村づくり協議会や財産区委員会のメンバーが真剣な話し合いを行い、他の地域にはない貴重な財産区有林を有効に利用することがなによりも大事なことであるという認識を共有しつつあります。森林資源の種類・量・質に関する基本調査を行って財産区有林の現状を正しく把握した上で、地域住民の合意形成を図りつつ、活用のための基本的な計画の策定を進めています。財産区有林



図-4 飯豊町の広大な財産区
写真中の森林のほとんどが財産区。

のうち、比較的集落に近い所は現代版の里山として木質ペレットやキノコ栽培用の菌床の供給を主な用途とする計画です。集落から離れた奥山的な森林は観光や用材・銘木などの資源目的に利用したいと考えています。

川場村（かわばむら）

群馬県川場村は武尊山の南麓に位置しており、森林率 88% の村です。かつては養蚕とこんにゃく栽培が大きな産業でした。養蚕での暖房を目的とした薪炭生産が里山利用の大きな部分を占めていました。ここでも里山の資源が利用されずに放置された状態になっています。シカやイノシシなどによる農業被害もだんだん深刻になっています。ツキノワグマも民家のすぐ近くまで出没するようになっています。

川場村では昭和 50 年代から農業と観光を結びつけた活動を展開しており、世田谷区と縁組み協定を結んで様々な取り組みを行ってきました。それらの成果を利用しながら、里山の環境と資源を多角的に活用する村作りを推進しています。里山の山菜や薬草となる植物を育てて特産品を開発することや（図-5）、薪やチップなどの木質バイオマスの需要拡大と供給体制の構築などを目指しています。自然観察を目的とした歩道整備を進めるとともに、ガイドブックの作成やインストラクターの養成も計画されています。

世田谷区から多くの人が訪れており、川場村は世田谷区民の“ふるさと”的な存在になっています。“ふるさと”の景観に対して世田谷区民から多くの注文があり、それらに対して誠意を持って対処してきています。例えば、コンビニエンスストアの開設の是非についても、世田谷



図-5 かつて桑畑であった森林内で山菜や薬草の栽培に取り組む山口氏（左）

区民の意見を入れて決定しているそうです。このような取り組みにより、相互の信頼関係も深まっています。

里山整備とそれに伴う地域産品の開発や里山資源の有効利用を進めることにより、地域産業の担い手の育成、鳥獣害の防止、自主自立の村づくりを目指しています。世田谷区との縁組み協定で培ってきた信頼関係や地域の景観、“ふるさと”づくりの自信は川場村の大きな力になっているようです。

春蘭の里

能登半島の北部、石川県能登町宮地地区は80%以上が森林に覆われています。森林の多くの部分は、かつての薪炭林に由来するコナラ・クヌギなどを主体とした広葉樹林であり、一部にスギ・ヒノキの植林地があります。過疎化の進行に対応するために「春蘭の里実行委員会」という有志の団体が結成され、山野草の栽培、遊歩道の整備、山菜利用の加工品開発、体験活動の企画などに取り組んできました。

春蘭の里では農家民泊に力を入れています。農業体験とグリーンツーリズムを提供し、この地域の里山から得られる旬の食材による食事でもてなしたいと考えています。現在のところ約30軒の農家民宿で年間3,000人程度の来客があるそうです。中国からの修学旅行も受け入れています。年間1万人くらいの来客を期待しています。

農家民泊を中心とした取り組みを成功させるために、山菜やキノコ、春蘭などの山野草が生育し、自然体験活動もできるような恵み多い里山林作りを行っていく予定です。現在は歩道作りと間伐等の手入れを進めています。今後は、地場のキノコ・山菜の一覧表を作成し（図-6）、里山地域のゾーニングを行って、一年を通して里山の恵みが得られるような環境整備を進めることにしています。企業との連携や里山のオーナー制度の導入も視野に入れており、地域の伝承や生活の知恵などの文化的資源も地域資源として活用したいと考えています。

おわりに

里山の森を「うごく森」として機能させるために、龍谷大学では里山を研究するとともに、大学教育や地域貢献の場としての里山利用を目指しています。また、ここで紹介した3つの地域では里山を中核とした地域おこしを試みています。広大な面積の資源豊かな里山を持つ飯豊町、都市住民との連携を基盤としている川場村、農家民泊とツーリズムを中心活動としている春蘭の里、そ



図-6 里山林内でのキノコ調査

れぞれに特徴のある取り組みであり、大きな成果が期待されます。

飯豊町では近年ナラ枯れの被害が急速に拡大しつつあります。ナラ枯れはかつての松枯れと同じように全国的な問題になってきています。龍谷の森でも2009年夏以降、ナラ枯れ被害が広がってきています。江戸時代にも長野県内の神社社叢においてナラ枯れが発生していたことが指摘されており（井田・高橋 2010）、古くから日本に存在していた樹木の被害であることがわかります。ナラ枯れを媒介するカシノナガキクイムシは大径木への加害が多く、小径木への加害はほとんどないことが知られています（井田・高橋 2010、小林・上田 2005）。近年全国的にナラ枯れ被害が広まっているのは、カシノナガキクイムシが穿孔しやすい大径の個体が増えていることが大きな要因であると考えられます。里山が薪炭林などとして利用されていた頃には、15～30年という比較的短伐期で繰り返し更新が行われており、カシノナガキクイムシが好む大径のコナラが存在していませんでしたが、里山が管理放棄されて老齢の大径木が多くなってきたことにより、現在のナラ枯れ被害の急速な拡大を招いたのでしょう（大住 2008）。

人間が与えた攪乱を取り除けば、その場所の植生は徐々に潜在自然植生へと戻っていくと観念的に考えられていたことがあります。「龍谷の森」がある近畿地方の場合、放置された森林の下層には暗い環境でも育つこと

のできる常緑広葉樹が進入してきて、やがては照葉樹の森林になっていくと考えられてきました。しかしながら実際には、遷移が一定方向に進んで安定した森林が形成されることにはならず、むしろ優占樹種となったアカマツやコナラの大量枯死という不安定な環境をもたらしています。このような優占樹種の大量枯死が起こった場合、耐陰性の強い常緑樹よりもむしろパイオニア型の樹種が侵入し、分布を拡大してくる可能性があります。里山として長期間利用してきた森林の場合、積極的に管理し、バイオマス資源を利用することにより、動的に安定な環境を作り出すことが大切でしょう。

ここに記した内容は宮浦（2007）および宮浦（2009）と重複する部分があることをお断りします。龍谷大学政策学部の谷垣岳人氏には図-3の写真を、東京農業大学農山村支援センターの福島空氏には図-4～図-6の写真を御提供いただきました。御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 井田秀行・高橋 勤（2010）ナラ枯れは江戸時代にも発生していた，日林誌 92，115-119.
- 小林正秀・上田明良（2005）カシノナガキクイムシとその共生菌が関与するブナ科樹木の萎凋枯死－被害発生要因の解明を目指して－，日林誌 87，435-450.
- 丸山徳次（2009）「森のある大学」をつくる〈物語〉，「里山学のまなざし 〈森のある大学〉から」（丸山・宮浦編），昭和堂，394-422.
- 松村 明（2006）大辞林第三版，三省堂.
- 三坂佳弘（2007）近代日本の入会林野，「里山学のすすめ 〈文化としての自然〉 再生にむけて」（丸山・宮浦編），昭和堂，218-224.
- 宮浦富保（2007）森と人の関わり－滋賀の里山，「里山学のすすめ 〈文化としての自然〉 再生にむけて」（丸山・宮浦編），昭和堂，51-63.
- 宮浦富保（2009）里山における生物多様性保全と環境教育，生物の科学 遺伝 63(5)，5-10.
- 守山 弘（1988）「自然を守るとはどういうことか」，農山漁村文化協会.
- 小椋純一（1992）「絵図から読み解く 人と景観の歴史」，雄山閣.
- 大住克博（2008）変容する里山林－ナラ枯れの舞台－，「ナラ枯れと里山の健康」（黒田慶子編著），社団法人全国林業改良普及協会，89-107.
- 大津市歴史博物館（1999）「特別陳列図録 琵琶湖観光の幕開け」.
- 滋賀森林管理署（2002）「田上・金勝の国有林」.
- 須川 恒（2007）里山保全のための道具類，「里山学のすすめ 〈文化としての自然〉 再生にむけて」（丸山・宮浦編），昭和堂，340-351.
- 鈴木龍也（2006）コモンズとしての入会，「コモンズ論再考」（鈴木・富野編著），晃洋書房，221-252.
- 鈴木龍也（2007）里山所有の過去・現在・未来，「里山学のすすめ 〈文化としての自然〉 再生にむけて」（丸山・宮浦編），昭和堂，201-217.
- 田端英雄（1997）「里山の自然」，保育社.
- 只木良也（1988）「森と人間の文化史」，日本放送協会.
- 高桑 進（2009）里山を活用した新しい環境教育の取り組み：大学間里山ネットワークの構築と展開，「里山学のまなざし 〈森のある大学〉から」（丸山・宮浦編），昭和堂，356-393.

土地分類図を定量化する

佐野 真琴 (さの まこと、森林総合研究所)

はじめに

ランドスケープエコロジーという比較的新しい生態学の一分野があります。この分野は、生態学的プロセスや生態系間の相互作用の影響に関する認識の高まりにより出現しました。そして、土地管理の指針やガイドライン作成といった実社会への応用という面も期待されています。ランドスケープエコロジーの焦点は、土地分類（たとえば、森林、農地、住宅のようなもの）がモザイク状に分布しているランドスケープの構造、機能、変化にあります。ここで、構造とは、モザイク状に分布する土地被覆の大きさ、形状、配置などのことです。今回は、この土地分類の構造を定量化するプログラム FRAGSTATS とその応用例について述べたいと思います。

FRAGSTATS とは？

FRAGSTATS は、土地分類図のようなカテゴリー区分された地図のための空間パターン分析プログラムです。分析される地図は利用者が定義し、さまざまな空間事象を表現することが可能です。ただし、利用する地図に関して、利用者に注意を呼びかけています。はたして、その地図の大きさやきめ（精度）が知りたいことをうまく表せているのか。このため利用者は、最初に地図の大きさやきめを検討する必要があります。また、FRAGSTATS からの出力は、その土地分類図が解析したい内容をうまく表している場合だけ有効となります。出力内容は、各パッチ、各パッチタイプ（クラス）、全体（ランドスケープ）という3つのレベルで、面積、密度、エッジ、形状、コア面積、最近傍、多様性、集中・散在などさまざまなカテゴリーの指数を計算します。ここでパッチという用語が出てきましたが、これは、同質の土地をひとまとまりとした区画のことです（たとえばひとまとまりの森林）。

実際に計算するには

FRAGSTATS は、フリーのソフトウェアですから皆さんがダウンロードし利用することが可能です。グーグルなどの検索サイトで「FRAGSTATS」と打ち込むと、ダウンロードサイトが現れますので、ここから、プログラムやドキュメントをダウンロードしユーザーガイドラインに沿ってインストールします。分類図のデータフォーマットは、ArcGrid (ArcGIS のベクターデータから変換可能。グリッド属性を入力しなくて良いため扱いやすい)、ASCII、8、16、32 ビットバイナリ、ERDAS、IDRIS などがあります。データを用意したら、後は FRAGSTATS を立ち上げ、実行パラメータを入力するとたちどころにさまざまな指数を計算してくれます。

計算例

それでは、指数でどのようなことが分かるか示すために2時期の土地分類図を使用し指数を計算してみます。対象地域は、沖縄県北部の国頭村内にある西銘岳（420m）を中心とした東西約8km、南北5kmの地域です（図-1）。図-1より、1977年から2006年にかけ右下部の白で表された比較的大きな土地分類の面積が減少していることが分かります。また、全体的に2006年の土地分類図の方が細かい要素から構成されていることが分かります。しかし、これらの判断はあくまで視覚的なものです。そこで、この分類図を FRAGSTATS により定量化して、数値でどのような変化が起こったのかを全体レベルで調べてみます（表-1）。

表-1より、パッチ密度が増加し平均面積が減少していることから断片化（分裂と収縮）していることが分かります。このような変化に伴い、エッジ密度が増加し形状指数も上昇しています（形状の複雑化）。さらに、分布の偏りを示す散在並置指数、シャノンの多様性指数は大

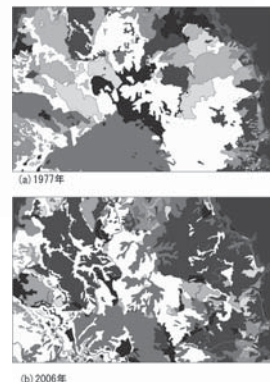


図-1 土地分類図

表-1

	1977	2006
パッチ密度 (/100ha)	9.5	13.3
エッジ密度 (m/ha)	84.8	122.1
形状指数	14.5	20.4
平均面積 (ha)	10.5	7.5
散在並置指数	72.7	68.8
シャノンの多様性指数	2.1	2.0

きく変化がないことから、分布の様式は大きく変わっていないことが分かります。

おわりに

今回は、土地分類図を定量化する手法を紹介しました。このような手法を用いると森林施業の結果としての森林配置が定量化され、森林管理を考える上での重要な情報を提供可能となります。また、今、話題となっている森林の劣化、減少の把握にも役に立つと考えられます。私自身は、頼もしい分析ツールが出来たと実感しています。

参考文献

- Forman, R. T. T. (1995) Land mosaics The ecology of landscapes and regions, pp632, Cambridge university press.
- Forman, R. T. T. and Godron, M. (1986) Landscape ecology, pp.620, John Wiley.
- Mcgarigal, K., Cushman, S. A., Neel, M. C., Ene, E. (2002) FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Available at the following web site: www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html

山菜・キノコ採りの生態系サービスをはかる

松浦 俊也 (まつうら としや、森林総合研究所)

はじめに

山菜・キノコ採りは、都市近郊から山村まで、古くから多くの人々に親しまれています。美しい写真とともに採り方や食べ方を記した図鑑類も多く、季節感に富む趣味としても定着しています。このように、山菜・キノコ採りは身近な自然がもたらす恵み(生態系サービス)のひとつです。とくに、ブナ林などの広がる東北・北陸地方では山菜・キノコの生産量が多く、生業にしてきた集落もあります。個々の地域住民の日常的な採取の実態を観察・記録した研究は、これまでもいくつか行われています(例えば、池谷 2004; 齋藤 2006)。しかし、ある地域における採取活動の全体像や、種ごとの採取環境条件、採取物の潜在的な経済価値などの定量的な調査はほとんど行われていませんでした。

そこで本稿では、山菜・キノコ採りの盛んな福島県南会津郡只見町・檜枝岐村において、質問紙調査(アンケート)やGPSと採取日誌の分析を通じて山菜・キノコ採りの生態系サービスの大きさや特徴の定量化を試みた調査研究の一端を紹介します。この調査は、人工林化や森林への人的管理の低下が生態系サービスに与える影響を評価する手法の開発を目的とした研究プロジェクト(環境省地球環境総合推進費:E-0801)の一環として行われました。

質問紙調査

いくつかの集落の全戸を対象に、よく採る山菜・キノコの種類、時期ごとの採取頻度、採取物の使途などに関する質問紙調査を行いました。その結果、個人差はあるものの、雪解け後の山菜採りや秋のキノコ採りのピーク時には平均で週に1~2回と高頻度に山に入り、様々な山菜・キノコ(それぞれ10数種類)を採取している様子が捉えられました。

GPSと採取日誌

山菜・キノコ採りでは個々人がめいめいに山の中を歩くので、ある地域における採取活動の全体像を地理的に捉えるには工夫が必要です。近年、GPSロガーの小型・高精度化が進み操作が容易になり、電子機器の操作に不慣れな高齢者を含む多くの人々の行動観察に使えるようになってきました。そこで、採取場所や個人情報(非公開を前提に)の協力を得られた10数名にGPSロガーを配布し、頭頂部にポケットのある専用の帽子に入れて採取時に携帯してもらいました(図-1)。また、採取時刻、種名、重量、使途(自家消費、贈答、販売)を、採取日ごとに日誌に記録してもらいました。これらを半月~1ヶ月ごとに回収し、個別に面談し、春先から晩秋までの採取活動を2年間にわたり記録しました。さらに、GPSログと日誌の時刻から採取地を同定し、GISと統計モデルを用いて、地形や植生、道路からの距離などの影響を種ごとに調べました。ここから、伐採跡地やスギ植林地などの人為攪乱地に多いワラビ、雪崩地に多いゼンマイ、溪畔域に多いクサソテツ(こごみ)、林道や沢沿いで採られるフキなど、山菜の種類により採取環境や依存する攪乱条件が異なる様子が捉えられました。また、秋のキノコ類は斜面上部や老齢広葉樹林などで多く採られていました。多雪山地の里山から奥山にかけてのモザイク状の植生を面的に利用し、季節を通して多様な山菜・キノコを採取している実態が捉えられました。

山菜・キノコ採りの経済的価値

質問紙調査と採取日誌から推定される総採取量と、直売所などでの種ごとの平均単価を掛けあわせると、

潜在的な経済価値を試算できます。自家消費や贈答分などもこの単価と同程度の価値をもつと仮定すると、2、3ヶ月間の春の山菜採りのみで、対象地の採取者ごとに平均数万円に相当する収穫が毎年ありました。地域全体でみれば、過疎・高齢化により採取量が大幅に減った現在でも、木材生産と比べて無視できない価値があると考えられます。また、質問紙調査では、山菜・キノコ採りには食材としての価値(供給サービス)と同じくらい楽しみとしての価値(文化的サービス)があると地域住民に評価されていました。両者を合わせた山菜・キノコ採りの生態系サービスはさらに大きいと考えられます。

おわりに

本稿では、ある地域における採取の現況を定量化する試みを紹介しましたが、採取活動には地域差があり、とくに過疎・高齢化が進む山村では活動は縮小傾向にあります。山菜・キノコ採りの生態系サービスを定量化するためには、地域ごとの多様性や過去からの変遷を捉える試みがさらに必要と考えています。

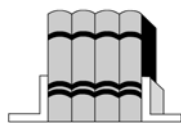
引用文献

- 池谷和信(2004)山菜採りの社会誌-資源利用とテリトリー-204pp, 東北大学出版会, 仙台.
- 齋藤暖生(2006)岩手県沢内村における山菜・キノコ資源充足度の変動-山菜・キノコ採りの生態的側面と社会的側面-. 林業経済 59 (3): 2-16.

GPSロガー(専用の帽子に入る)



図-1 GPSと採取日誌による採取活動把握



ブックス

葉で見わかる樹木 (増補改訂版)

林 将之著、小学館、2010年7月、
304ページ、2,037円(税込)、ISBN
978-4-09208-023-2 (4-09208-023-9)

近所の街路樹や公園の植木、野山の散策で出会った樹木の名前を知りたい時に頼りになる本が登場した。スキャナーを用いて葉を撮影するアイデアで、まだ青々とした葉の表裏を鮮明に捉えることに成功している。本書の中で掲載されている画像は、実際に現場で見る葉に極めて近く、野外で見つけた木々の名前を知りたい時に大いに役に立つであろう。

私の話して恐縮だが、まだ学生の頃、スマホで熱帯雨林の生態調査を行っていたとき、試行錯誤の末、最終的に行き着いた樹木の同定ノートの形が、実は本書に良く似たものであった。その当時はスキャナーなどという便利なものはなく、標本用に採集した葉の表裏を接写し、現像して1枚1枚ノートに貼り付けていたのだが、このような地道な作業により、30種を超えるカシの仲間が調査地域に分布していることを明らかにすることができた。本書の鮮明な葉の写真を見たとき、すぐに現場での使い勝手の良さを想像できた次第である。

本書の著者は「わかりやすい樹木図鑑がない」ことをきっかけに、葉で見分ける方法を独学で学び本書を執筆するに至っており、葉のどのような点に注目すべきなのか、ポイントを絞って明快に説明してある。これに加えて秀逸な点は、葉だけではなく、樹皮の写真を数多く掲載していることである。街であれ森であれ、我々が会える樹木は、まず目の高さには大抵は樹幹があり、最初に樹皮を目にするのが普通だ。私も樹皮の情報は常に大切にしますが、樹種を大まかに分類するときに大変有効な情報であり、本書の樹皮のカラー写真は葉のスキャナー写真と共にとても役に立つであろう。もちろ

ん、樹皮だけでなく、樹種判定の決め手となる花や種子の美しい写真も数多く掲載されており、パラパラとページをめくっているだけでもとても楽しい。巻末には、最初に話した葉のスキャンのコツが書いてあることも申し添えておこう。街路樹や公園の樹など、「気になる樹」がある方は、本書を持って出かけることをお勧めする。「気になる樹」の正体を解明する、とても頼もしいガイドブックとなるであろう。

西村 千

森林の持続可能性と国際貿易

島本美保子著、岩波書店、2010年2月、
202ページ、4,410円(税込)、ISBN
978-4-00-023473-3

生物多様性があり、二酸化炭素の吸収や固定に重要な役割を發揮する森林について、その管理や利用の在り方が問われている。その中で、林産物の貿易自由化が社会厚生を増加に貢献できるか、林産物の貿易自由化と森林の持続可能性とがどういう関係にあるかも重要なテーマである。「林産物の自由貿易と森林の持続可能性の関係について、理論的・実証的な分析を行い、政策提言を行う」ことを目的にした本書は、持続可能な社会の実現に向けて重要なテーマを検討している。

序章では、1980年代後半からの「林産物貿易と森林の持続可能性」論争を整理した。この分野の研究において林産物自由貿易を支持した時代、つまり林産物輸出入関税の引き下げなどで貿易自由化へ進んだ時代から、貿易自由化を批判する時代になったことを論考している。フィリピンとタイとインドネシアを事例として森林管理と林産物貿易の状況を紹介し、林産物の貿易自由化は森林の持続可能性と相容れないという懸念を示した。第1章では、森林資源の状況、熱帯林の森林消失とその原因、ロシアなどの北方林の森林劣化とその原因を紹介した。熱帯林では、移動耕作、商業伐採、大規模農場の開発などによる農地転換、

鉱山開発、道路建設を含む様々な要素が森林消失の原因として挙げられている。その背景には、人口圧力と貿易という二つの原因を提示した。第2章では、森林の持続可能性の定義と世界の林産物貿易の動向についてまとめた上で、林産物貿易に関するマクロ実証モデルを紹介している。本章の最後では、森林に関する基礎データの収集や精度の限界があるから、「統計的実証・理論・フィールドこれらの手法を総動員して、森林問題の実実への切れ味を少しでも向上させるしかない」という論点を出した。第3章では、社会的限界費用曲線と私的限界費用曲線と需要曲線などを通じて、「貿易と環境」理論を紹介し、ピグー税とポーモル＝オーツ税を論じている。その中では、社会的費用の計測可能性、政府の行政執行能力問題による制度の失敗、分配問題といった三つの理論の限界を論じた。第4章では、三つの貿易パターンをまとめた上で、輸入側が人工林を経営して、他国の天然林からの林産物を輸入するというパターンを主に取り上げている。そこでは、木材生産量と森林資源量との関係、関税政策、生産補助金政策、森林認証制度などを論考し、行政コストなどの実情を考えると関税より“生産補助金のほうが優れているとは必ずしも言えない”と指摘した。また、天然林伐採地域では、森林の持続可能性を確保するために、森林認証制度に全面的に依存してはいけなとも述べている。第5章と第6章では、レントシーキングと自由貿易体制と林産物貿易との関係を、第7章では、国際金融論的視点およびグローバル企業と日本の経済利益を論じている。ここでは、レントシーキング、国際資本移動と不安定な国際通貨制度などの影響を議論した。最終章では、林産物貿易体制へ提言し、経済学の新たな課題などを論考している。「適正なレベルに森林資源を制御するために、輸出関税と輸入関税を組み合わせた関税協定が有効なのではないか」とし、これまでの議論では明確に示されてこなかった林産物貿易の在り方を指摘している。

自由は良いものである。しかし、制限されないわけにはいかない。林産物の貿易自由化も同じだと思われる。本書は、レントシーキングや国際資本の移動などを検討し、自由化の背後の原因にも触れている。多くのページを費やし、貿易理論を援用して関税などの政策を説明する一方、理論の限界も指摘している。本書は、森林政策学や環境経済学を勉強している学生はもとより、関連分野の研究者や政府の貿易政策担当者など多くの方にとっても、良い参考になるとと思われる。関税協定に関して、3か国以上の協力体制を築くことが必要であることも指摘した。本書は出版直後、話題になった環太平洋戦略経済連携協定（TPP）の締結の検討に対しても参考になるだろう。

道中哲也（森林総合研究所）

新時代の自然資源論 —統合管理の方法論—

文部科学省科学技術・学術審議会
資源調査分科会編、クバプロ、2010
年10月、256ページ、2,625円（税込）、
ISBN978-4-87805-112-8

我々の生活は、多種多様な資源を利用することによって成り立っている。石油や石炭、鉱物などの天然資源が利用によっていずれ枯渇する再生不能な資源であるのに対して、本書で「自然環境のうち人類の日常生活にとってより身近であり、かつ、働きかけが可能で有益な価値を持つ水や森林、土地、生態系等の資源」と定義している自然資源の多くは再生可能な資源であったり、人間の取り扱い方法によって持続可能性を高めることが可

能な資源であったりする。成長から持続可能性へと社会の在り方が変化している現代においては、自然資源と人間との関係も変化し、自然資源管理の在り方も変えなくてはならない。本書では、たとえば水資源は、地表水と地下水や、生活用水と農業用水と工業用水など、水資源の存在様式や利用目的によって管理主体や管理規則が異なっており、多様な管理者が目的を共有しないまま管理することは、時として水資源の有効活用や持続可能性の弊害となること、また森林資源の利用が、別の自然資源である水資源の量と質や生物資源の多様性に影響を与えることもあることなどを例に挙げ、現在の自然資源管理の問題点を指摘している。

そのような問題意識をもって、文部科学省科学技術・学術審議会資源調査会分科会では、平成21年9月から22年4月にかけて、自然資源管理に関する今日的な問題点を、有識者からのヒアリングを重ねることによって整理し、その統合管理の重要性を指摘する報告書「我が国における自然資源の統合管理のあり方について」を作成した。本書で言う統合管理とは、単一資源内での多面的な利用調整のための統合、関連する複数資源間での相互作用を踏まえた利用調整のための統合、多様なステークホルダーの参画等を通じた統合、スケール別に生じる現象の相互作用を踏まえた時間軸・空間軸の統合からなっている。本書は、その報告書の内容をまとめ直したものであり、現代社会における自然資源管理の課題から統合管理の必要性と在り方、実践にあたっての課題まで、非常にコンパクトに

まとめられている。そして巻末には有識者ヒアリングの発表要旨が収録されており、それが本書の大半の部分を占めている。

有識者ヒアリングのテーマは、農業研究における自然資源の統合管理の概念と方法論について（稲永忍氏）、水資源の統合管理の概念整理（高橋裕氏）、気候・気象が自然資源に与える影響（吉野正敏氏）、環境と資源の統合的管理（植田和弘氏）、資源とは何か？—日本における資源論の系譜と展望—（佐藤仁氏）、森林の統合管理について（吉川賢氏）、サステナビリティと統合的資源管理（武内和彦氏）、中国の自然保護区制度と社区共管について（蘇雲山氏）、自然と人間のかかわりについて（内山節氏）、自然資源の統合管理を支えるソフト資源の在り方（大橋正和氏）、わが国の自然資源の統合的管理のあり方と必要な技術開発等（高橋裕氏）、土壌資源の統合管理について（八木久義氏）、と自然科学から社会科学まで非常に多岐に亘っており、それぞれの分野での第一人者が自然資源の統合管理についての考えを具体的な例をあげながら説明しており、本書の理解を助けるものとなっている。多面的な機能の持続可能性が重視される森林の管理こそ統合管理が必要であり、森林管理の今日的な在り方を考えるうえで、頭を整理させ多くの示唆を与える本である。

丹下 健（東京大学）

読者の皆様からのご意見を募集しております!!

森林科学編集委員会では、読者の皆様の声を反映した誌面作りを心がけています。さらに一層親しみ易い「森林科学誌」を作っていくために、皆様のご意見を伺えたらと考えています。つきましては、下記のアンケートにご記入いただき、FAX あるいはメール等にてお気軽にお送り下さいますようお願い致します。

1. 性別 ☐ 男 ☐ 女 年齢 _____ 歳
2. 職業 ☐ 林業家 ☐ 森林関連事業体職員 ☐ 会社員 ☐ 公務員
☐ 森林関係団体職員 ☐ 大学教員 ☐ 高校教員 ☐ 小・中学教員
☐ 研究機関職員 ☐ 学生 その他 ()
3. 本号の記事で興味を持った記事、印象に残った記事 (複数回答可)
☐ 特集 ☐ 森めぐり ☐ フォーラム
☐ 森の休憩室Ⅱ ☐ 現場の要請を受けての研究 ☐ うごく森
☐ 森をはかる ☐ 北から南から ☐ Information
4. 本号記事についてご意見があればご自由にお書き下さい。
5. 以下の最近の特集記事で面白かったものをお知らせ下さい (複数回答可)。
☐ 遺伝子から読み解く森林 (62 号) ☐ 深刻化するシカ問題 ―各地の報告から― (61 号)
☐ REDD+ 熱帯林を保全する新たな取り組み (60 号) ☐ 広葉樹林への誘導の可能性 (59 号)
☐ 拡がるタケの生態特性とその有効利用への道 (58 号) ☐ その他 ()
6. 今後取り上げて欲しいとお考えの記事 (企画) をお知らせ下さい。
7. 購読会員の方におたずねします。本誌をどのようにして知りましたか。
☐ パンフレット ☐ 知人の紹介 ☐ シンポジウム会場等 ☐ 学会等のホームページ
☐ その他
8. 「森林科学」の記事・編集に対するご意見をお聞かせ下さい。

送り先 FAX: 03-3261-2766 日本森林学会事務局
 メール: tomokun@affrc.go.jp 編集主事 高橋與明

60 周年、そして支部から北方森林学会へ

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，北方森林学会事務局）

日本森林学会北海道支部は今年で60周年を迎えました。そして、本会の法人化を受けて支部から「北方森林学会」に組織・名称が変わりました。

北方森林学会は、北方林を中心とした森林学の向上と林業および森林関連産業の発展を図ることを目的にした学会として、これまでの伝統を引き継ぎ、さらに発展していきたいと考えています。

今年11月に開催する大会は北方森林学会の第一回目、支部会から数えて60回目の大会でもあるため、これを記念した行事を計画しています。一つ目は記念シンポジウムの開催で、もう一つの企画は、記念本の刊行です。

シンポジウムは、「森林管理の人材育成」をテーマとしています。今後の森林管理において何が問題なのか、それに立ち向かうためにはどのような人材が求められているのか、その育成にはどう取り組むべきかについて議論します。「(准)フォレスター」や「森林施業プランナー」で知られるように、昨今、人材育成が重要なテーマとして取り上げられています。森林・林業再生プランの下で進められている人材育成に議論の焦点を置き、学会らしく長期的なビジョンを議論すると同時に、准フォレスター・プランナー育成の現状・評価・今後の方向性について、様々な立場からの意見を交換したいと考えています。最終的には、人材育成の取り組みに貢献できるようなシンポジウムにしたいと、現在、企画を練っているところです。

また、記念刊行本は「北海道の森林」と題し、北海道にみられる森林の現状と危機をオムニバス形式で解説します。執筆者は、北方森林学会の会員を中心に70名を超える予定です。仮章立ては、1. 森林をとりまく現状と危機、2. 森林の

特徴、3. 森林の働き、4. 森林の恵みをいただく、5. 森林と野生生物、6. 森林の再生、7. 森林再生の新しい技術、8. 森・里・海をつなぐ、となっています。さらに3月11日に起こりました東日本大震災の復興に関連する話題も加える準備をしています。中高校生や一般市民の皆さんから森林科学を学ぶ大学生まで、幅広く沢山の皆さんに読んでいただけるように、専門的な内容もわかりやすく解説します。北海道を対象とした内容にしていますが、道外の皆さんに読んでいただいても、おそらく喜んでいただけるものが出来上がるものと、今から楽しみにしています。

北方森林学会は、北海道を拠点に活動して参りますが、道外からも多くの方に参加して盛り上げていただきたいと考えています。北方森林学会に今後とも変わらぬご理解とご支援を賜れますよう、心よりお願い申し上げます。

最後に、最近の筆者の雑感を少し申し上げます。3月11日午後、東北地方を中心に、我々が経験したことのない大地震と津波に見舞われました。この東日本大震災で亡くなった方のご冥福をお祈りし、被災された方々には、お見舞い申し上げます。震災からの復興のために活動する人々の姿を見て、「いま自分には何ができるのか？」を考えた時に、ある先輩の言葉を思い出しました。その先輩は、定説に対して何のためらいなく「それって本当なの？」と疑問を投げ掛け、その言葉が何とも角の立たない方でした。その先輩が、後輩の私達に残したフレーズに次のようなものがありました。「科学的根拠って科学的なの？」 科学者、とくに実学として社会との関わりが深い分野の研究者・教育者にとって、たいへん重みのあるフレーズだと私は感じ入りました。

した。科学者の役割の範囲と責任の大きさ、それに対してあるべき真摯な姿勢。そのフレーズは、まるで今の震災後の混乱を予見していたかのようです。いわゆる想定外の自然現象によって甚大な被害を出した原子力発電所、逆に犠牲者を一人も出さなかった新幹線など、今回の大地震は多くの問題点を浮き彫りにしました。私たちが関わる森林科学は大きな自

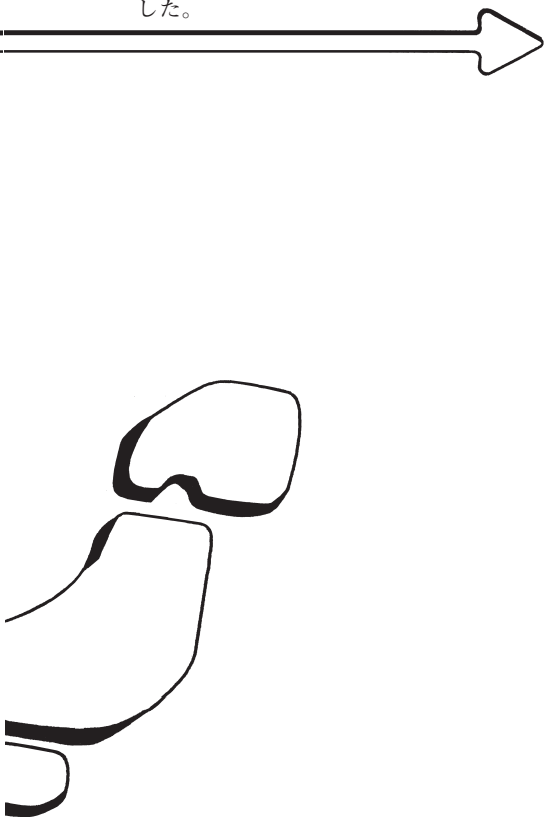
北から



筆

筆者らは、少し前になるが、九州地域における再造林放棄地に関する研究を

然が相手ですので、想定外のことも珍しくはありません。しかし、それでも科学的根拠は社会に求められます。大震災を経て、復興を支援する人々の姿を見て、一度は「このような時には科学は無力だ」と思った私ではありましたが、先輩のこの言葉を思い出して、その言葉と真摯に向き合うことこそが、長い目でみた私のできる復興支援だと考えるようになりました。



南から

日本森林学会支部だより

タビューをしては、我々の本意とは別のところでの記事を数度書かれたので、それ以降、文書を先に見せて、取材を受けることにした。その結果、それ以後は変な記事もなく、というより変な記事にされずに今日を迎えている。今後、また同じような問題を取り扱う方がおられるかもしれないので、このコーナーでお示ししたい。なお、我々の研究の結果、放棄地は林地を大きく攪乱したり、鹿の被害が甚大でない限り、あまり問題なく広葉樹林に戻っていることがわかっている。一方で、再生した広葉樹林の中には、九州であるので常緑広葉樹林となり、スギ以上に真っ暗な林内になっている場所も数多く見られた。近年、広葉樹であれば何でも良いような風潮があるが、落葉広葉樹であれば問題は少ないが、九州のような温暖な地域では、常緑がかなり高い標高でも存在し、その存在はスギ施業放棄林と同等かそれ以上にやっかいなものであると私は考えている。

さて、公表した文書とは、

『最近、人工林を伐採した後に再造林(植林)を行わない、いわゆる再造林放棄地* (林野庁は造林未済地*と呼んでいる) が、九州を始め日本全国で大きな問題となりつつある。再造林放棄地に関する研究を実施している研究者として、その問題点をここに紹介したい。(中略)一言に再造林放棄地というが、現実には面積と伐採方法でその状態が大きく異なっている。現在、新聞等で「放棄地＝斜面災害」の図式で取り上げられている周辺住民に甚大な被害を及ぼしていると考えられている放棄地は、伐採コストを下げるために、一箇所の面積が100haを越え、さらに急斜面に重機用の無理な作業道を入れたような違法伐採に近いものである。はじめてから再造林を考えてい

ない大型の放棄地で斜面崩壊が発生していることは事実であるが、これが放棄地のすべてではない。現在、筆者らは、九州全域を対象に、1998年から2002年の5年間に発生した放棄地の植生回復状況を正確に把握する現地調査研究を実施しており、それによれば、放棄地の多くが、伐採方法(具体的には作業道の作り方)、伐採前の森林内の状態さらには周辺の森林状態に応じて、決して裸地化することなく自然に植生回復していることが明らかになりつつある。

この再造林放棄地の問題を通して、持続型社会の構築の中で、多面的な機能を持ちかつ再生産可能な資源を生み出す森林・林業を日本としてどのように効率的に維持していくかを、国民全体で正確な情報をもとに真摯に考える必要がある。また現在、そのような状況が整いつつあると筆者は考えている。

【参 考】

造林未済地：林野庁が利用している名称で、人工林を伐採して3年経過後も植栽をしていない林地を呼ぶ。ただし、天然更新等で、天然林になった場合には、造林未済地から除外される。

再造林放棄地：上記の造林未済地と同様で、人工林を伐採して3年経過後も植栽をしていない林地の総称。天然更新等で、天然林になった場合でも、人工植栽(造林)をしていないので、再造林放棄地である。』

といった具合である。この研究は、2009年3月に終了をしたが、そのとりまとめを日林誌の特集という形で公表することを今現在行っている。そこで再造林放棄地がどのような意味を持っているかについて、皆さんに正確にお示しできれば、この上ない喜びである。

再造林放棄地の何が問題なのか？

吉田 茂二郎 (よしだ しげじろう、九州大学大学院農学研究院)

行った。そのときに、テーマがテーマだけにマスコミが取材にやってきて、イン

森林科学 63

予告

特集

森林の生物多様性 (仮)

森をはかる

レーザーで樹木の変化をはかる (仮)

土壌の硫黄含有量をはかる (仮)

森林科学 63 は 2011 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、双方向情報交換を実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	高橋 興明* (経営/森林総研)
	壁谷 大介* (造林/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)
	井上真理子 (経営/森林総研)
	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)
	斎藤 秀之 (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

本誌 62 号は、千年に一度と言われる歴史的な災害による日本社会の混乱の中、編纂されました。その日、皆さんは何をされていたでしょうか。

2011 年 3 月 11 日午後 2 時 46 分、東北地方太平洋沖地震（マグニチュード 9、最大震度 7）と巨大津波によって引き起こされた東日本大震災は、防災と科学技術が進んだ日本で、自然の威力と脅威を改めて見せつけました。福島原発事故による避難を含め、2 ヶ月が経つ今なお多くの方が困難な生活を強いられています。所有する森林に被害を受けた方も多いと思います。被害に遭われた皆様に心よりお見舞い申し上げると共に、長期化に備え、復興にご尽力されている皆様の安全とご健康をお祈り申し上げます。

こうした災害に遭遇し、「森林科学」の研究者や関係者など、森林にたずさわり自然と向きあって生きる私たちは何をどうしてゆけばよいのでしょうか。

私事になりますが、10 年前の三宅島噴火に遭遇し（2000 年 6 月）、全島避難をしました。鉛筆一本がない状況、自宅に帰れない事の心労、明日への不安の中、とにかく毎日を過ごすのに精一杯でした。何にどう困っているのか、当事者に見えないことも多く、周りの方々の優しさと温かさ支えられました。生きること、ただそのことが単純に、どんな欲に感じられました。今回の震災で、東京では計画停電があったこともあり、自然と早起き、早寝になりました。

ところで今回の震災に際して、研究者仲間には、電気やガスがない災害地に出向き、薪やペレットを活用した暖房、入浴施設の整備に奔走した人がいます（避難所生活の中で、

入浴は本当にありがたいです）。災害地に近い所に居た別の仲間は、自然の中での活動で身につけた生活力と行動力を活かし、いち早く被災者支援の拠点づくりに取り組み、ブログでの情報発信を続けながら、救援物資やボランティアの調整などで存在感を発揮しています。木材産業では、復興のための資材不足に対応する供給体制や、木材での仮設住宅づくりの動きがあると聞きます。砂防など防災関係者や防潮林の研究者も、危険がある災害地に出向き、奮闘されていることと思います。

このような自然災害に際して生活が脅かされる中、自然との関わりを基本とした「森林科学」は、木材資源や安全管理、生活支援などさまざまな面で本領を発揮しています。復興に必要な長期的な視野も、百年の計のある林学の伝統を受け継ぐ「森林科学」は、得意とする分野のはずです。災害地日本で、これから私たちにできること。それは、2011 年が、持続可能な社会の実現に向けた新たな人の生き方や社会づくりの第一歩となるように、現場に役立つ実学を志した研究や取り組みをしていくことだと思っています。

本誌の編集は、第 122 回日本森林学会大会の開催が見送られた時期、本誌編集の主要な機能がある茨城県つくば市では研究室の棚の書籍が散乱したり、パソコンが落下したりした中で、作業が進められたと聞いています。特集のコーディネーター吉丸氏をはじめ編集担当主事や関係者のご尽力があったことを、最後に記載させて頂きます。

この災害をずっと心に、被災地と共に。

(編集委員 井上真理子)

「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が解説、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

ブックス：書評、出版物の紹介

その他：上記以外の内容についての投稿。編集主事まで問い合わせること。

3. 原稿の形式

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
ブックス：紹介する印刷物の書誌情報(書名、編著訳者名、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 高橋與明

〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

森林総合研究所

森林管理研究領域

Tel 029-829-8314

Fax 029-873-3799

e-mail tomokun@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/contents/publish/outline.html

(森林科学)

GIShop

ジーアイショップ

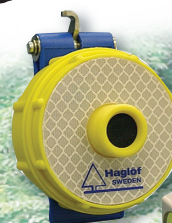


ジーアイショップ

検索



サイト OPEN!!



林業機器多数取り扱い

電子輪尺
クリノメーター
成長錘
樹高測定器
トレイルカメラなど



GIShop
ジーアイショップ

<http://www.gishop.jp>

フリーダイヤル

0800(600)4132

GIShop (ジーアイショップ)

株式会社ジーアイサプライ

〒071-1424 北海道上川郡東川町南町3丁目8-15

TEL 0166 (73) 3787 FAX 0166 (73) 3788 E-mail info@gisup.com