

森林総合研究所北海道支所研究情報誌
FFPRI Hokkaido Research Center Report

北の森だより

Vol.4
平成22年3月



— 研究紹介コーナー —

1. 森林流域における乾性沈着量の推定
2. 遺伝子組換え樹木の影響を明らかにする
— 遺伝子組換えカンバと野生カンバの交雑リスク —
3. 球果の豊作は樹高成長を鈍らせる
— アオモリトドマツの事例から —



独立行政法人森林総合研究所北海道支所

Hokkaido Research Center Forestry and Forest Products Research Institute

北の森だより

Vol. 4

目 次

■研究紹介コーナー

1. 森林流域における乾性沈着量の推定
植物土壌系研究グループ 相澤州平、阪田匡司、伊藤江利子— 1

 2. 遺伝子組換え樹木の影響を明らかにする
—遺伝子組換えカンバと野生カンバの交雑リスク—
森林育成研究グループ 倉本恵生————— 5

 3. 球果の豊作は樹高成長を鈍らせる
—アオモリトドマツの事例から—
森林育成研究グループ 関 剛————— 9
-

■報告コーナー

1. 水源林シンポジウム開催報告 1 3
2. 森林講座開催報告

1. 森林流域における乾性沈着量の推定

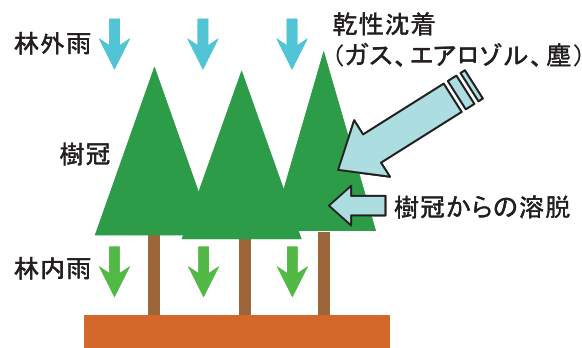
植物土壌研究グループ 相澤州平、阪田匡司、伊藤江利子

はじめに

森林流域には雨を通じて様々な物質が流入し、渓流水を通じて様々な物質が流出しています。流入量と流出量のどちらが多いかは物質によって異なります。例えば窒素は大気中から森林に比較的多量に流入しますが、樹木の成長や脱窒等によって消費され、渓流水への流出量は通常は流入量より少なくなります。しかし大気汚染等により窒素の流入量が増えると、森林内で消費しきれなくなり、流出量が流入量を上回るようになります。この現象を窒素飽和といい、過剰な窒素流入に森林の恒常性維持機能が追いつかない状態であるといえます。このように、森林流域における物質の流入量と流出量のバランスは森林の健全性を評価するための重要な指標となります。

森林総合研究所では酸性雨等の広域大気汚染物質が森林に与える影響を評価するため、全国各地の森林流域に試験地を設定し、物質の流入量と流出量を観測してきました。森林流域への物質の流入量は、森林内の空き地に降水の採取装置を設置して雨や雪の量と含まれる物質の濃度を測定することにより求めています。大気中から地面に流入する物質は、雨や雪に取り込まれて地面に到達するもの（湿性沈着）と、埃やガスのように降水以外の経路で到達するもの（乾性沈着）とがあります。我々の採取方法はロートを開放状態で放置するため、湿性沈着と乾性沈着が一緒に採取されます（バルク法と呼びます）。バルク法では、降雨終了後回収までの期間にロートに付着した乾性沈着成分は採取されないこともあり、乾性沈着の何割が回収されているかは不明です。また、森林は樹木の葉が茂っているため、空き地の地面に比べて大気との接触面積が大きく、乾性沈着の捕捉量も空き地より多いと考えられます²⁾。以上のことから、森林への実際の物質流入量はバルク法で観測した値より大きい可能性があります。乾性沈着の量は湿性沈着と同程度に達する例も報告されています³⁾。森林流域への物質の流入量を正確に測定するためには、乾性沈着も含めた全沈着量の測定が必要といえます。

乾性沈着はいろいろな方法で測定されていますが、多くの場合特殊な採取装置と電源を必要とするため、森林流域では直接測定することが



林内雨＝林外雨＋乾性沈着＋樹冠溶脱

図-1 林内雨による物質流入量の内訳

困難です。そこで、林内雨（樹木の葉や枝に触れて落ちてくる林内の雨）の成分を林外雨（空き地で採取した雨）と比較することにより、樹冠に捕捉された乾性沈着物質の量を推定することを試みました⁴⁾。林内雨には乾性沈着の他、葉などの表面から溶脱する成分（樹冠溶脱成分）が含まれています（図-1）。一方、樹体の表面で変質したり吸収されたりして失われる成分もあります。したがって、林冠を通過することで増えた分がそのまま乾性沈着量とはいえないので、何らかの方法で乾性沈着量と樹冠溶脱量に分離しなければなりません。

林内雨から乾性沈着成分を分離するにはいくつかの方法があります。ここでは樹冠での溶脱や吸収の影響を受けない物質を基準として各成分の乾性沈着量を求める養分収支法と呼ばれる方法を用いました。

方法

1)試験地と採取方法

森林総合研究所北海道支所定山溪森林理水試験地（札幌市南区定山溪）の「時雨1の沢」において林外雨、林内雨（2箇所）を採取しました。林外雨は試験流域下端の空地で（写真1）、林内雨1は左岸の尾根上で、林内雨2は右岸の尾根上で採取しました。林相はトドマツ、ミズナラ、カツラ、イタヤカエデなどの天然生針広混交林で、林内雨1はトドマツに覆われた場所、林内雨2は広葉樹とトドマツが半々程度の場所にあります。各地点に雨水を受けるための直径21cmのポリエチレン製ロートを高さ1.5mに設置し、試料は遮光したポリエチレン製容器に貯



写真－1 バルク法による林外雨採取

留しました。1週間毎に試料を回収し、採取量と溶存イオン濃度（Na、NH₄、K、Ca、Mg、Cl、NO₂、NO₃、PO₄、SO₄）を測定しました。降雪期はロートの代わりにポリプロピレン製コンテナを設置して雪を採取し、室温で融解後分析しました。

2) 乾性沈着の推定方法

林外雨、林内雨による物質流入量のデータを用いて、養分収支法⁽²⁾⁽⁴⁾により林内雨から乾性沈着成分と樹冠溶脱成分を分離しました。林内雨による物質流入量は林外雨による流入量に乾性沈着成分と樹冠溶脱成分を加えたものです（図－1）。SO₄は樹冠からの溶脱が起こらないとされているので、乾性沈着物質の組成が林外雨による流入物質の組成に一致すると仮定すると、ある物質の乾性沈着量はSO₄の乾性沈着量に林外雨による流入量におけるその物質とSO₄の比を掛けたものとして表すことができます。ある物質iの乾性沈着量D_iは、物質iの林外雨による流入量R_iとSO₄の林外雨による流入量R_{SO4}、SO₄の林内雨による流入量T_{SO4}を用いて以下の式で表されます。

$$D_i = (T_{SO4} - R_{SO4}) \times R_i / R_{SO4}$$

また、物質iの樹冠溶脱量L_iは物質iの林内雨による流入量T_iからR_iとD_iを引いたものなので、以下の式で表されます。

$$L_i = T_i - T_{SO4} \times R_i / R_{SO4}$$

養分収支法では乾性沈着は林冠から完全に洗脱されると仮定していますが、1週間毎の流入量では林冠への残留が無視できないと考えられるため、乾性沈着成分の分離は3ヶ月間の流入量を対象としました。計算には2008年4月～2009年6月のデータを使用し、2008年4月～2009年3月の積算値を年間流入量としました。

結果と考察

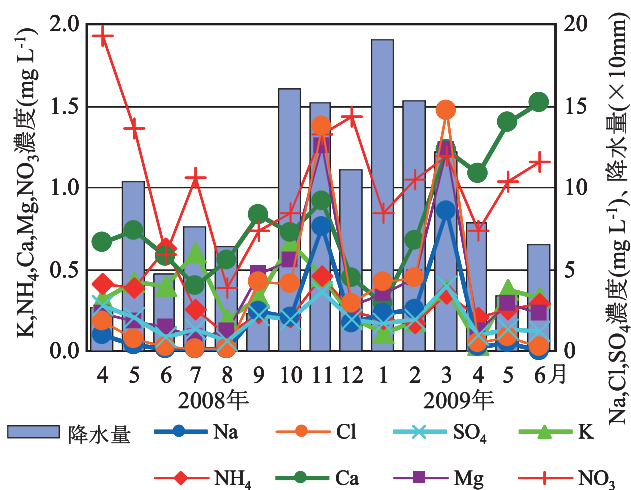
1) 林外雨の溶存物質濃度、流入量と林内雨による物質流入量

林外雨の月毎の降水量と溶存イオン濃度平均値を図－2に示しました。降水量は10～3月が多く、4～9月の約2.6倍でした。林外雨中の溶存イオン濃度が高かったのはNa、Cl、SO₄で、Na、Clの濃度は10～3月に高くなりました。SO₄濃度も変化の傾向は似ていましたが4～6月も高い値を示しました。MgもNa、Clと同様の变化傾向を示しました。降水量が冬季に多いこと、北西季節風が強まる11月から3月にかけて海水由来の成分であるNa、Cl、Mg濃度が上昇することから、当試験地は冬季の北西季節風による降雪とそれに含まれる海塩の影響を強く受けているといえます。K濃度は7月および10月に高くなりました。10月は落葉期なので、採取装置に舞い込んだ落ち葉の影響を受けていると考えられます。他のイオンは11月および3月に濃度が高い傾向がありましたが、季節的な変化は不明瞭でした。林外雨による物質流入量の3ヶ月毎の積算値を図－3に示しました。降水量、溶存イオン濃度とも冬季に高いため、10～12月および1～3月の物質流入量は他の期間に比べて非常に大きくなりました。

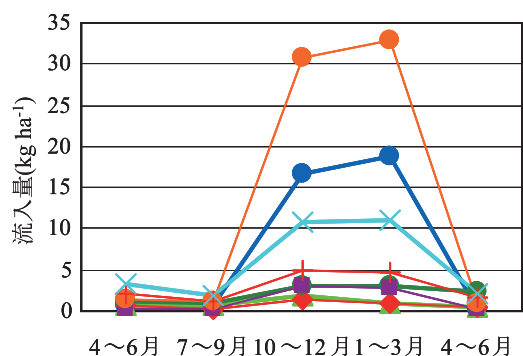
林内雨の溶存イオン濃度は林外雨より高いものが多く、特にK濃度は4～11月に林外雨より顕著に高くなりました。NH₄濃度は林外雨と同等以下でした。林内雨による年間の物質流入量はKが林外雨の6倍前後と顕著に大きく、ついでCaが林外雨の1.8倍であり、NH₄は林外雨の0.5～0.6倍と小さな値でした。他のイオンは林外雨の1.1～1.2倍程度でした。林冠で捕捉された乾性沈着成分と樹冠溶脱成分の付加により、多くのイオンで林内雨による物質流入量は林外雨より多くなっていました。

2) 乾性沈着量と樹冠溶脱量

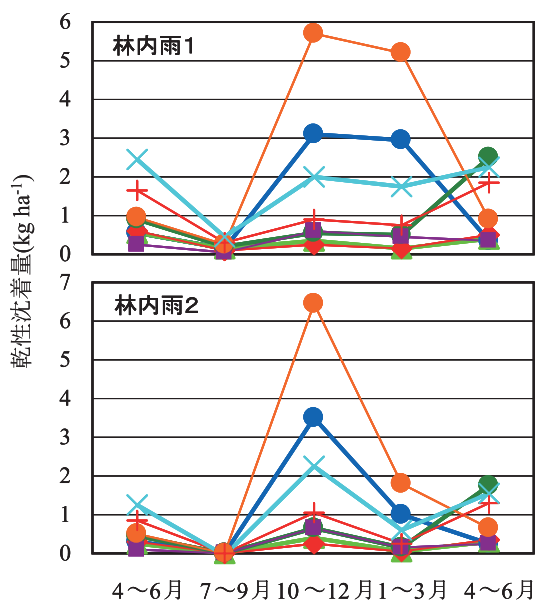
養分収支法により求めた3ヶ月毎の乾性沈着量を図－4に示しました。乾性沈着量も林外雨負荷量と同様に10～12月および1～3月に大きな値を示しました。ただし、1～3月の林内雨2の乾性沈着量は林内雨1より小さな値でした。林内雨1がほぼ完全にトドマツの樹冠下に位置するのに対して、林内雨2は半分以上広葉樹に覆われているため、冬季は広葉樹が落葉することにより林冠の葉の量が林内雨1より少なくなります（写真－2）。このため1～3月は林内雨2の乾性沈着の捕捉率が下がり、乾性沈着量が林内雨1より小さくなると考えられます。Ca、NO₃、SO₄の乾性沈着量は林外雨の変動傾向とは



図－2 月毎の降水量および林外雨の溶存イオン濃度



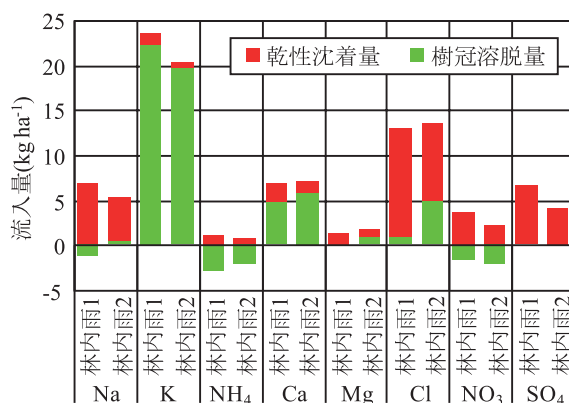
図－3 3ヶ月毎の林外雨による物質流入量
(シンボルは図－2と同様)



図－4 3ヶ月毎の乾性沈着量
(シンボルは図－2と同様)



写真－2 冬季の林冠の様子



図－5 年間の乾性沈着量と樹冠溶脱量

表－1 年間の林外雨による流入量に対する乾性沈着量の比率

	Na	K	NH ₄	Ca	Mg	Cl	NO ₃	SO ₄
林内雨1	0.18	0.28	0.31	0.26	0.20	0.18	0.28	0.25
林内雨2	0.13	0.17	0.18	0.15	0.14	0.13	0.16	0.15

異なり、4～6月が10～12月と同じくらいかそれより多くなりました。年間の乾性沈着量と樹冠溶脱量を図－5に示しました。乾性沈着量が多かったのはNa、Cl、NO₃、SO₄で、林内雨1の方が林内雨2より多い傾向が見られました。樹冠溶脱量はK、Caで多く、特にKではほとんどを樹冠溶脱量が占めていました。NH₄、NO₃では樹冠溶脱量がマイナスの値でした。これはNH₄やNO₃が葉の表面等で微生物の活動等により変質したり消費されたりしたことを示しています。バルク法で採取した林外雨による物質流入量に対する乾性沈着による流入量の割合は、Na、Mg、Clが林内雨1では18～20%、林内雨2では13～14%であり、その他のイオンが林内雨1では25～31%、林内雨2では15～18%でした(表－1)。

おわりに

年間の乾性沈着量は、バルク法で測定した林外雨による流入量の2～3割と推定されました。流域単位での物質収支を考える際は林外雨のみならず乾性沈着も考慮する必要があると考えられます。また、林相の違いにより年間の乾性沈着量が異なっていました。乾性沈着量の推定を流域単位に拡大するためには、林相の違いによる乾性沈着量の差異を明らかにし、流域内の林相の分布を把握する必要があります。

本研究における林外雨に対する乾性沈着量の割合は他の報告⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾に比べて小さめでした。乾性沈着量が小さい理由として、バルク法による採取のため林外雨が乾性沈着を含んでいること、樹幹流を無視していることが考えられます。また、林外雨による流入物質の組成と乾性沈着の組成が等しいと仮定しましたが、両者は異なる可能性があり、林冠への捕捉率もイオン種により異なります。森林流域への物質流入量を正確に求めるには、他の手法により乾性沈着の組成を測定するなど、さらに検討が必要と考えられます。

引用文献

- (1) 相澤州平・阪田匡司・伊藤江利子(2010) 定山溪森林理水試験地における乾性沈着量の推定. 日本森林学会北海道支部論文集58:87-88
- (2) 小林禧樹・中川吉弘・玉置元則・平木隆年・正賀充(1995) 森林樹冠への酸性沈着の影響評価－乾性沈着と溶脱の分別評価法の検討－. 環境科学会誌8(1):25-34
- (3) 尾保手朋子(2004) 乾性沈着による大気－森林系の物質輸送. 地球環境9:113-121
- (4) 佐々木重行(2005) 数種の落葉広葉樹とスギの幼齢林分における乾性沈着量と溶脱量について. 森林立地47:1-7

2. 遺伝子組換え樹木の影響を明らかにする

ー遺伝子組換えカンバと野生カンバの交雑リスクー

森林育成研究グループ 倉本恵生

はじめに

遺伝子組換えというとトウモロコシ、ダイズ、ナタネなどの農作物を思い浮かべますが、樹木でも遺伝子組換え体の開発が進められています。対象となる樹種は実に様々で、研究の約半数がポプラの仲間（ハコヤナギ属）で行われ、マツの仲間（マツ属）がそれに続きます。ほかにユーカリ属、フウ属、カバノキ属などで盛んに研究が行われています。

樹木の品種改良には非常に長い年数がかかりますが、遺伝子組換え技術を用いることで、目的の性質を持つ樹木を、これまでより確実に、飛躍的な速さで作り出すことができます。たとえば、乾燥などの環境ストレスへの耐性や病虫害への抵抗性を付けること、成長を高めセルロースなどの含量を多くすることや、材質を改良することが期待されています。遺伝子組換え樹木は、森林による二酸化炭素の吸収を高める、育林コストを低減する、バイオマス資源利用を拡大するといったことに大きく貢献するでしょう。

しかし、遺伝子組換え樹木をそのまま野外に植えると様々な問題を引き起こすと考えられます。そのため、どのような危険性があるかを事前に十分に検証する必要があります。そこで、国際的な取り決め（カルタヘナ議定書）とそれを受けた国内法によって、わが国でも遺伝子組換え生物が自然生態系に与える影響を事前に評価することが定められています⁽²⁾⁽⁶⁾。森林総合研究所では、遺伝子組換え樹木と野生種との交雑リスクに焦点を絞り、その影響がもっとも懸念される樹種であるカンバ類（カバノキ属）を対象にした研究に取り組んできました。

遺伝子組換え樹木のリスク

遺伝子組換え農作物の場合、食品安全性が真っ先に心配されるところです。その点、遺伝子組換え樹木は心配無用に思えます。しかし、遺伝子組換え体は周囲の生態系に対しても思わぬ影響を与えます⁽²⁾。まず、遺伝子組換え体が植栽された地域にもともと自生する同じ種や近縁種と交配して雑種を作り、組換え遺伝子を持った雑種が野外に広まってしまう危険性があります。これが交雑リスクです。交雑は遺伝子組換え体から飛散された花粉を野生種が受け取り種子を作ること、あ



写真－1 遺伝子組換えカンバの原種：シダレカンバ

写真は実験に使った花粉親（王子製紙森林博物館植栽：北海道栗山町）。名前の通り枝がしだれる、葉が小さく角がある、樹皮に黒い縦割れがあるなどの特徴があるが、シラカンバに見た目が似ている

るいは野生集団から飛散された花粉を遺伝子組換え体を受け取り種子を作ることでおこります。交雑によりできた雑種の方が野生種よりも成長が良く、繁殖力が強い場合は、競争に有利になり、野生種を圧倒してしまいます。こうした交雑の影響が積み重なると、見た目は変わらなくても、実は雑種だらけ、純粋な野生種がほとんど居なくなるということになりかねません。自然界には存在しない遺伝子が野外に広まるのはもちろんのこと、野生種が各地域で維持してきた遺伝的多様性を損ね、さらには野生種を絶滅の危機に追い込み、種の多様性を失わせる可能性がある点でこの影響は深刻です。

樹木は寿命が長く、たくさんの花をつけ、特に花粉は長距離に渡り飛散されるので、農作物よりも、交雑の影響はより大きく、長く積み重なるといえます^(4,10)。また、農作物よりも自然に近い環境で栽培されるため、野生種との交雑が起きやすく、雑種を取り除くことも容易ではありません。さらに、その影響は樹木を食物やすみかとして利用する生物や、物質の循環など森林生態系にも及んでいきます。

日本ではカンバが懸念される

日本で遺伝子組換え樹木を実際に植えることは、研究目的のポプラの実験例（高セルロース含量ギンドロ⁽⁶⁾）を除いて行われていません。この例は、政府による厳正な審査を経て、区画は厳重に管理されています。またこの組換え樹木と交雑するおそれのある近縁種は周囲にほとんどありません。しかし周囲に近縁種が多い種類の遺伝子組換え樹木では交雑リスクが大きくなります。この点で、日本ではカバノキ属に注意が必要です。

遺伝子組換えが最も盛んに行われているポプラ属やマツ属は様々な種類を含み、組換え対象と近縁な日本の樹種は少なく、その量も多くはありません。フウ属やユーカリ属では同属の樹種は日本に自生していません。一方、カバノキ属では日本に11種が分布し、そのいくつかは森林の主要構成種になります。そのため、遺伝子組換え体と自生種との交雑リスクは大きいと考えられます。遺伝子組換え体はヨーロッパに自生するシダレカンバ（写真－1）を主な対象に盛んに開発が進められており⁽⁸⁾⁽⁹⁾、日本のシラカンバでも組換え技術が確立されています⁽⁵⁾。シダレカンバは庭園樹や育種材料として日本では北海道などで野外に植えられており、組換え体も日本で生育できると思われます。これらの点から、日本ではカバノキ属において組換え体の交雑リスクを明らかにしておく必要があるのです。そこで、北海道に植栽されているシダレカンバの花粉を用いて、主要な自生カンバ類に人工交配（写真－2）を行い、交雑が起こるか確かめました⁽³⁾。また交雑苗木の成長についても調べました⁽⁴⁾。研究目的といえ組換え体の花粉を使った人工交雑は危険です。カバノキ属の組換え体開発は成長や病虫害抵抗性の改良を目的にしてお



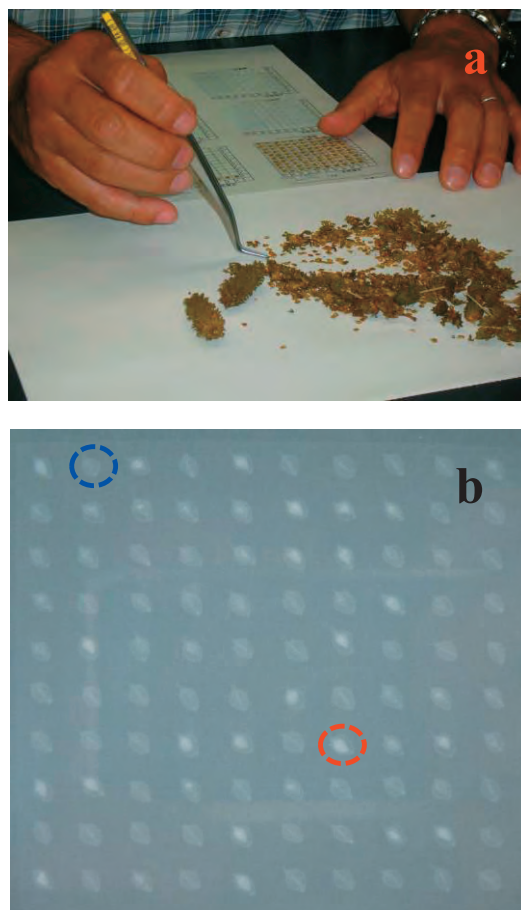
写真－2 人工交配の様子 雌花序の付いた枝に袋をかけ、外からの花粉を遮断する。目的の花粉を花粉銃という器具で袋内に噴射し受粉させる。黄色く見えるのが噴射された花粉

り、花着きや花粉の性質などは操作していません。つまり遺伝子組換え体でない原種の花粉を使っても十分な結果が得られるのです。

実験で確かめられた交雑の危険性

実験の対象とした自生種はシラカンバ・ダケカンバ及びウダイカンバです。この3種は北海道の天然林にごく普通にみられ、シラカンバは街路樹や庭園樹としてもよく植えられています。

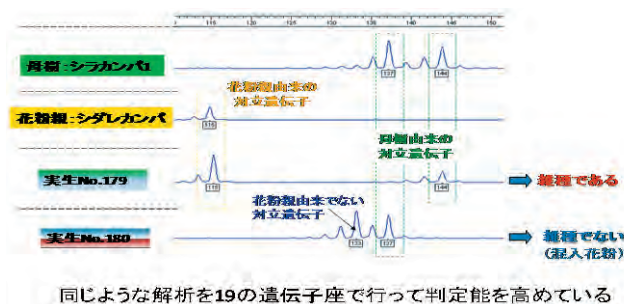
カンバでは受精の有無に関わらず種子の外形が作られ、種子が小さいこともあり、外観から種子の充実を知ることは困難です。そこで散布される前の種子を採取し、X線で透視することで、種子が充実しているか調べました（写真－3）。



写真－3 充実種子の確認方法

果序を分解し種子を取り出して並べ(a)、X線撮影する(b)。種子ができて(充実して)いれば種子の中が白く(赤丸)、できていなければ透明に映る(青丸)。

さらに、種子を発芽させ、ヒトの親子鑑定で用いられていると同様の方法で、実生（子供）、母樹（母親）および花粉親（父親）の遺伝子型を照合し、実生が真に雑種であるかを確認しました（図－1）。



図－1 雑種の確認（親子解析）結果の例

実生が真に雑種であれば、実生 No. 179 のように実生から両親由来の対立遺伝子が検出される（破線で括られたピークは母樹あるいは花粉親由来の対立遺伝子を示す）。実生 No. 180 からは花粉親由来の対立遺伝子が検出されないため、混入花粉による実生と判断される。

これらの分析の結果⁽³⁾⁽⁴⁾、シダレカンバとシラカンバの交雑処理では種子の充実率は高く、できた種子の半数以上は真に雑種であることが確認されました（表－1）。これに対し、シダレカンバとダケカンバの交雑処理では種子の充実率が低く、できた種子もほとんどが実は雑種ではないことが分かりました。ただし、ごくわずかに雑種ができるようです。交配処理では雌花のついた枝に袋をかけて目的以外の花粉を遮断しますが、隙間から他の花粉が流入したりして目的外の交配がどうしても起きます。さらに、ウダイカンバでは種子がほとんどできず、わずかにできた種子も雑種ではありませんでした。苗木を作る際に再度行った解析でも同じ結果になりました。

表－1 交配実生の遺伝分析の結果（実際にその交配組み合わせだった割合）

樹種→	シラカンバ		ダケカンバ		ウダイカンバ	
母樹→	Bp1	Bp2	Be1	Be2	Bm1	Bm2
交雑	50.0	62.5	14.3	-	(0.0)*	0.0
対照	87.5	100.0	93.8	-	100.0	-

—実生の得られなかった組み合わせ。*生存率調査後に発芽した実生(1個体)による分析結果

表－2 各母樹・交配処理の実生の生存率(%)

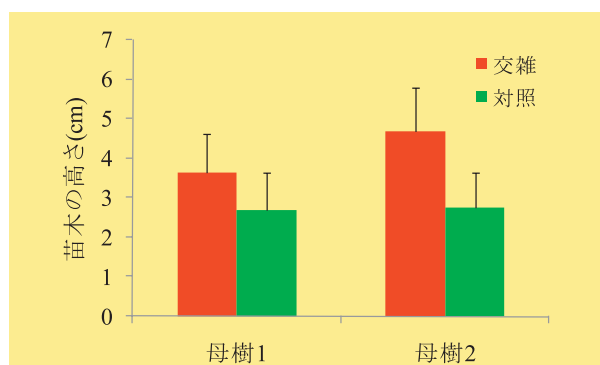
樹種→	シラカンバ		ダケカンバ		ウダイカンバ	
母樹→	Bp1	Bp2	Be1	Be2	Bm1	Bm2
交雑	16.0	63.6	77.8*	-	-	8.0**
対照	65.8	56.8	72.2	0.0	48.8	0.0

*遺伝解析の結果、本当の交雑個体は14.3%。**全てが交雑個体ではなかった(表－1参照)。—実生の得られなかった組み合わせ

雑種は野外で定着できそう

組換え体の原種であるシダレカンバはシラカンバと交雑しやすいことが分かったので、さら

に交雑種子から発芽した苗の定着や成長についても調べてみました⁽⁴⁾。実験ではシラカンバの母樹 2 本でシダレカンバとの交雑を行っており、それぞれの母樹での交雑種子から発芽した苗が秋までに生き残る割合を調べ、母樹どうしで交配したシラカンバ苗と比較しました。母樹によって差がありますが、交雑苗の生存率はいずれもシラカンバ苗より低くなっています（表－2）。いっぽう、苗の成長は交雑苗のほうが大きくなっていました（図－2）。苗ですから成長の違いといっても数 cm 程度の小さなものですが、成長がよいほど次の年にも多くの葉をつけて高く伸びることができます。明るい環境を好むカンバにとっては早く高く伸びるほど生存にとっても有利になります。苗木の生長が少しでも大きいほど後々の成長や生存に影響してくるのです。つまり、雑種の苗は純血のシラカンバに比べて発芽当年はやや生き残りにくいのですが、いったん定着すれば早く大きくなる可能性があります。これは、交雑苗が野外に定着でき十分大きくなれることを示しています。



図－2 シダレカンバ花粉によるシラカンバの交雑苗と、シラカンバどうしの交配苗の1年目の苗木伸長量の比較

なぜシラカンバと交雑しやすいのか

原種の花粉を使った実験から、組換えカンバは北海道に自生する3種のカンバのなかで、シラカンバと交雑しやすく、交雑苗が野外に広まる可能性が示されました。なぜ、シラカンバとは交雑しやすく、ダケカンバやウダイカンバとは交雑しにくいのでしょうか。これには種間の系統関係と倍数性の2つが主に関わっていると考えられます。

カバノキ属に関しては、5つのグループ（亜属）への分類が提唱されています⁽¹⁾。今回対象にした日本の3種のカンバはそれぞれ別の亜属に分類されます。一方、シダレカンバとシラカンバは、「樹皮の白いカンバ」（いわゆる“シラカ

ンバ”) を主とした同じ亜属に分類されます。

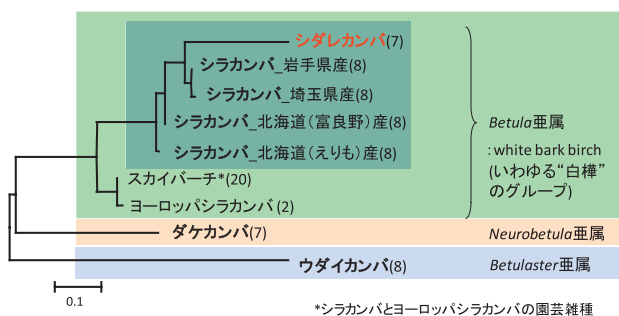


図-3 カンバ類の遺伝的関係 ()内は分析個体数。細胞核 DNA のマイクロサテライト (“CTCT...” のような単純反復塩基配列) を用いて各個体の遺伝子型を決定し、種間と集団間で遺伝的な類縁性を調べた。

本研究グループで行われた種間の遺伝的な類似性評価でも、シダレカンバはシラカンバに相対的に近縁で、ダケカンバやウダイカンバとは相対的に遠縁であることが確認されました (図-3) ⁽¹⁰⁾。さらにカバノキ属では一般に 2~12 倍体の種が知られており、シダレカンバ、シラカンバやウダイカンバは 2 倍体です。一方、ダケカンバは 4 倍体です。ダケカンバの母樹に、シダレカンバの花粉をかけた場合、交配雑種は (理論上) 3 倍体となりますが、3 倍体雑種はシラカンバ×シダレカンバのような 2 倍体どうしの交配に比べてできにくいと考えられます。このようなことから、シダレカンバはシラカンバと交雑しやすく、ウダイカンバやダケカンバと交雑しにくいと考えられます。

おわりに

今回の研究で、組換えカンバと野生カンバの交雑リスクを確認しました。しかし遺伝子組換え樹木の交雑リスクを回避するには、どのくらいの距離まで交雑が起きるのかなど、さらに詳しい解明を進める必要があります。また自然条件での交雑可能性を解明するには、開花時期の重なり具合などを確かめる必要があります。

遺伝子組換え技術を安全にするために、技術自体の改良や、技術自体を使ってリスクを減らそうとする (花をつかなくする) 研究も行われています⁽⁶⁾。こうした技術の開発・改良はリスク回避には直接に有効ですが、完成には時間もかかり、万全ではありません。技術改良とともに、技術を実際に使う際に危険が生じないように注意することも大事です。その意味で、リスクを解明するための取り組みは不可欠なのです。

この研究は農林水産技術会議プロジェクト「遺

伝子組換え生物における安全性確保総合研究」として行われており、本所生物学領域・森林遺伝研究領域と共同で研究を進めています。また、王子製紙森林博物館、北海道立林業試験場、東京大学北海道演習林、北海道大学農学部、北海道農業研究センター、ウプサラ大学進化生物学センターの各機関のご協力を得ています。

引用文献

- (1) De Jong P. C. (1993) An introduction to *Betula*: its morphology, evolution, classification and distribution, with a survey of recent work. In D. Hunt (ed.), *Proceedings of the IDS Betula symposium*, 2-4 October 1992. International Dendrology Society, Richmond, UK.
- (2) 環境省ホームページ (日本版バイオセーフティクリアリングハウス) (2010) <http://www.bch.biodic.go.jp>, 2010.1.25
- (3) 倉本恵生・津田吉晃・篠原健司・竹田貴彦 (2009) ヨーロッパシラカンバと道産カンバ類 3 種の交雑における果実の形質. 日林北支論 57: 183-185.
- (4) 倉本恵生・津田吉晃・竹田貴彦・篠原健司 (2010) 遺伝子組換えカンバと北海道産カンバ類の交雑リスクの推定—遺伝子組換えカンバ原種花粉による交雑種子の発芽と実生の生育状況—. 日林北支論 58: 59-62
- (5) Mohri T., Mukai Y. and Shinohara K. (1997) *Agrobacterium tumefaciens*-mediated transformation of Japanese white birch (*Betula platyphylla* var. *japonica*) Plant Sci. 127: 53-60.
- (6) 農林水産技術会議ホームページ (遺伝子組換え技術の情報サイト) (2010) <http://www.s.affrc.go.jp/docs/anzanka/index.htm> 2010.1.30
- (7) OECD (2003) Consensus document on the biology of European white birch (*Betula pendula* Roth). Series on Harmonisation of Regulatory Oversight in Biotechnology. No.28: 48pp, OECD, Paris.
- (8) Pasonen H. L., Vihervuori L., Sanna-Kaisa Seppänen S. K., Saarenmaa P. L., Ylioja T., Weissenberg K. and Pappinen A. (2008) Field performance of chitinase transgenic silver birch (*Betula pendula* Roth): growth and adaptive traits. *Trees* 22: 423-421.
- (9) Tiimonen H., Aronen T., Laakso T., Saranpää P., Chiang V., Ylioja T., Roininen H. and Häggman H. (2005) Does lignin modification affect feeding preference or growth performance of insect herbivores in transgenic silver birch (*Betula pendula* Roth)? *Planta* 222: 699-708
- (10) 津田吉晃・倉本恵生・毛利武・吉田和正・松本麻子・津村義彦・竹田貴彦・幸田秀穂・井出雄二・篠原健司 (2009) 遺伝子組換えカンバの生物多様性影響評価に向けて—スカイパーチを用いた日本産カンバと外国産カンバの種間交雑性評価—. 北方林業, 61: 108-111

3. 球果の豊作は樹高成長を鈍らせる

—アオモリトドマツの事例から—

森林育成研究グループ 関剛

樹高成長とは

森林に生育している樹木の高さ（樹高）は、森林の重要な構成要素の一つです。樹高の大きい森林では、多くの場合木々の幹も太いため、過去に多量の二酸化炭素を吸収したと考えられます。また、樹高の大きい森林では、複雑な空間構造と不均一な環境が形成されます。樹木はそれに対して、堅さの異なる葉、花や果実を生産する枝などを配置します。結果的に、こうした森林は葉や花・果実を利用する生物にとって生活空間と餌資源の宝庫となる可能性があります。樹高は、二酸化炭素の吸収量や生物多様性に深く関わる要素の一つといえます。

森林の上層部分（林冠）に達している樹木は、樹高をさらに増大（樹高成長）することがあります。樹高成長は、基本的に光条件のよい空間に葉を配置する一段階です。現時点で上層に達している個体でも、周囲の個体が樹高成長を続けている場合、光を遮られないように樹高成長する必要があります。一方、大きくなった個体は次世代個体を多量に生産します。子孫を作るには、炭水化物などの物質が必要です。光条件のよい空間では、物質を種子・花粉生産にも配分しながら樹高成長していくことが重要になります。

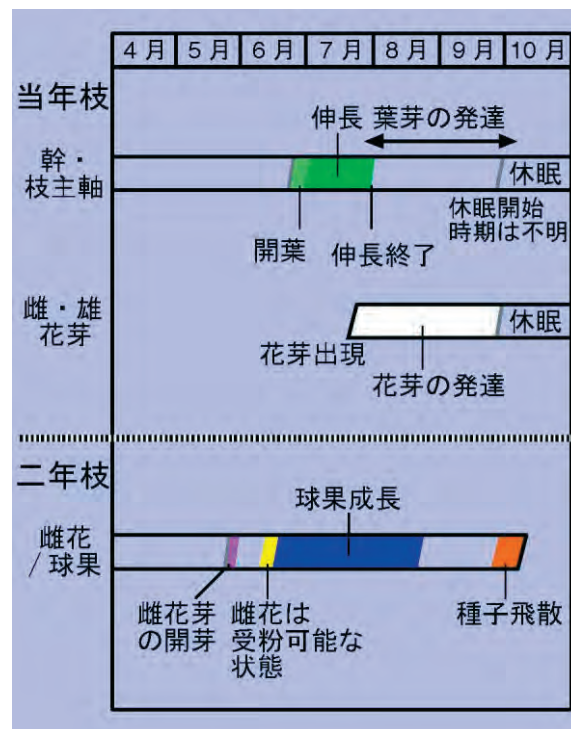
林冠にある樹木の樹高成長は、気象要因や花・果実の生産の影響を受けていると予測されます。これらの要因は成長に配分される物質の生産・利用と深く関わっているためです。樹高成長の年次間変動に影響を及ぼす要因は、気候変動下で森林がどのような構造に変化するかを予測する上で重要な情報です。

ここで一例として、青森県八甲田山におけるアオモリトドマツを対象に、樹高成長量に影響を及ぼす要因について紹介します。同時に、幹の先端に近い部分での枝の伸長量との比較も行い、樹形がどのように形成されていくのかを紹介します。

アオモリトドマツの幹の伸長と球果生産

アオモリトドマツ（*Abies mariesii*）は、オオシラビソとも呼ばれるマツ科モミ属の針葉樹です。本州の高海拔地域に生育し、青森県・八甲田山から石川県・白山までの範囲に分布が知られています⁽²⁾。名前は似ていますが、北海道に分

布するトドマツ（*A. sachalinensis*）や本州・四国に分布するシラビソ（*A. veitchii*）は、モミ属の中で本種と異なるグループに属しています⁽¹⁾。



図－1 アオモリトドマツにおける生物季節

アオモリトドマツでは、幹の先端部分に損傷がない場合、幹の伸長量が樹高成長量に相当します。幹の伸長は一年に一回です（図－1）。翌年幹になる芽は、夏から秋まで成長を続けます。一般に、幹や枝の伸長量は芽の大きさを反映することがあるため、幹・枝の伸長期間だけでなく、芽の成長期間の気象条件や栄養状態も重要である可能性があります。

アオモリトドマツの球果生産には明瞭な豊作・凶作があります。モミ属の他の樹種同様、雌花芽が伸長中の枝上に形成され、その翌年の秋には成熟した球果になります（図－1）。球果1個の重量は、青森県八甲田山の針広混交林の例で、乾燥重量で平均 30g ほど⁽³⁾、生重量で 70g ほどでした。1個体が生産する球果数は、豊作年の多い個体で 800 個あまりでした。個体あたりでは 56kg の重量という計算になります。このため、物質を球果に利用する問題もさることながら、球果を力学的に支えるために枝を太らせる必要も出てきます。球果生産と幹や枝の成長に

対してどのように物質を配分していくのかは、樹木にとって切実な問題と推察されます。

過去の樹高成長量と球果生産を追跡する

樹高成長量に及ぼす要因を検出する方法の一つとして、過去の成長量をさかのぼって解析する方法があります。ここでは、その手順と観察された年次変動を紹介します。

幹や枝の伸長量の計測は、冬芽を覆っていた鱗片の基部が痕跡として残ることを利用します。痕跡は毎年一回形成されますので、痕跡どうしの間隔から過去の幹・枝の伸長量を求めることができます。今回の調査では、幹（主幹）と主幹から直接分枝した枝の主軸（一次枝主軸）で長さを計測しました（図-2）。一次枝主軸の長

さは、主幹から分かれた年数が同じ主軸どうしについて、年次間の変動を調べました。調査では木に登り、主幹・一次枝の出現年次を、一次枝における枝分かれの回数によって確認しました。

過去における球果数の追跡にも痕跡を用いました。モミ属では成熟した球果から種子がはずれていきますが、その軸の基部は枝に残ります。枝の樹皮は薄いので、軸の基部は樹皮に埋もれません。枝が著しく削れるような環境（風衝地など）でなければ、この痕跡を10年間以上前の枝について追跡できます。今回は幹から分かれて2～10年目の一次枝の主軸について、痕跡の数を足し上げて「着果指数」とし、球果生産の豊凶を評価しました。

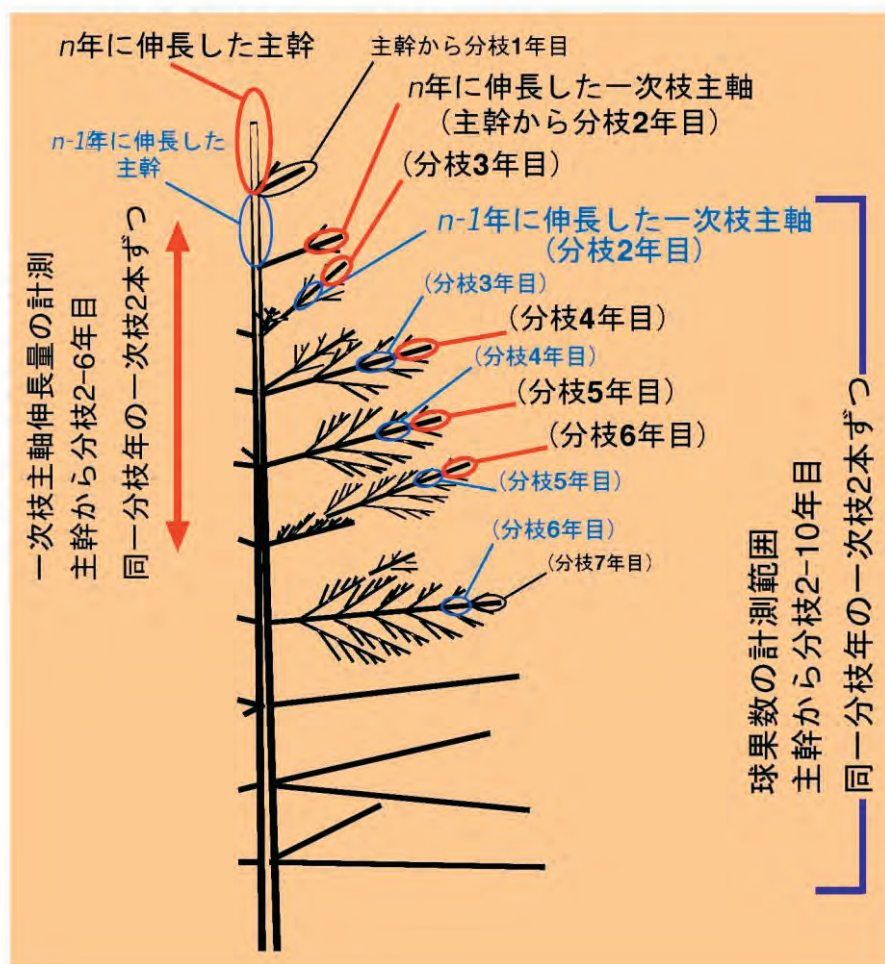
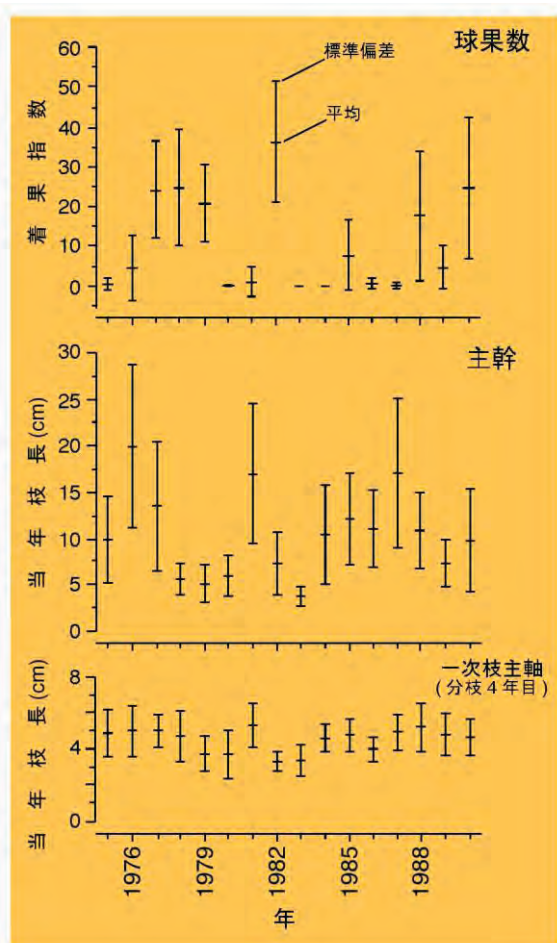


図-2 伸長量を計測した幹・枝と球果数を計測した枝の位置

主幹・一次枝主軸の伸長量・着果指数は顕著に年次間で変動していました（図-3）。一次枝主軸については、主幹から分かれて4年目の部分について表示していますが、他の部位でもほぼ同様の変動パターンでした。これら3つの中で

は、着果指数の年次間変動が最も明瞭で、主幹の伸長量の年次間変動も大きいことがわかります。なお、変動の周期性は不明瞭でした。



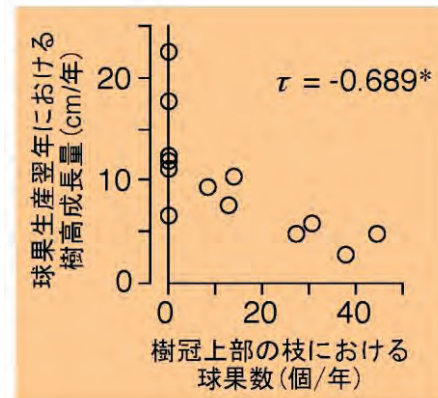
図－3 球果数・主幹伸長量・一次枝主幹伸長量における年次間変動（一次枝主幹は、主幹から分枝4年目の位置のものについて示す）

樹高成長量と枝の伸長量に影響を及ぼすのは？

幹や枝の伸長量に影響を及ぼす要因については、気温・降水量・球果生産を候補として解析しました。解析するにあたっては、本種の幹・枝・球果が成長する生物季節（図－1）を前提に考えました。要因候補の対象期間は、（1）気温では伸長期間の他に、伸長前年に芽ができる期間、（2）降水量では伸長期間、（3）球果生産では伸長期間からその3年前までの各年としました。樹高11～17mほどの14個体を対象とし、候補とした要因について線型混合モデルを用い、AIC（赤池の情報量基準）によって可能性の高い要因を選択しました。

詳細な結果は省略しますが、樹高成長量に最も影響を及ぼす要因として検出されたのは、伸長前年の球果数でした。また、二つの要因が樹高成長量に影響を及ぼすことを想定したモデルにおいても、伸長前年の球果数が主要な要因の一つとして検出されました。すなわち、球果数が多いほど、その翌年の樹高成長量が小さくな

ると判定されました。図－4に、球果数が樹高成長量に顕著な影響を及ぼした個体の例を示します。もう一つの要因としては、伸長期間（7月）の降水量が伸長を促進する要因として検出されました。



図－4 生産された球果数と翌年における樹高成長量との関係（14個体のうちの1例について示す。rは順位相関係数）

一次枝の主軸の伸長量については、樹高成長量とは異なる結果となりました。いずれの位置の枝においても、伸長期間（7月）の気温と芽が成長している期間（伸長前年9月）の気温が伸長を促進する要因として検出されました。また、この二つの要因の間には負の交互作用があるために、一つの要因が主軸の伸長量に及ぼす効果が一見不明瞭になることもわかりました。

球果生産後に樹高成長量が枝の伸長量よりも大きく低下するのはどのような意味があるのでしょうか？球果生産は炭水化物を多量に必要とするために、他の成長に利用できる炭水化物の量が減少します。この状況でも、一次枝主軸の伸長は重要な成長なのではないかと考えました（図－5）。枝の主軸が短くなると、翌年主軸から分かれる枝どうしが混み合い、針葉を配置する空間が小さくなります。結果的に将来の生産性が低下すると予測されます。これに対し樹高成長は、よほど競争が激しくなければ、1年程度低下しても大きな問題はないと推察されます。この考えが正しいのかどうかは、枝・針葉の量・配置を詳細に調べる必要があります。



図－5 樹高成長と一次枝主軸の伸長の概念図

開葉前で、枝上に若い球果が存在する。これらの球果の影響が出るのは、翌年の伸長終了後。

おわりに

球果の豊作が樹高成長を鈍らせるという今回の結果は、樹木の一生を考えると大きな矛盾はないようにみえます。一方で、気象要因が樹高成長量に及ぼす影響が球果生産ほど顕著ではなかったことは、環境変動下で樹木の成長予測をする際には気象要因のみに着目しても予測が難しいことを示唆します。球果生産自体が気象要因による影響をどのように受けるのかについては、今後解決すべき課題です。

球果の豊作と樹木の成長という観点からみると、樹高成長と枝の伸長が必ずしも同じ年次間変動パターンを示さないことが示されました。成長に制限があるときに樹木が何を優先させるのかについては、多くの樹種について検討すべき問題です。

北海道に分布するトドマツなどの針葉樹の成長が環境変動下でどう変化するかを予測する場合、球果生産は無視できない要素であると予想されます。⁽⁴⁾

引用文献

- (1) Farjon, A. (1990) *Pinaceae. Drawings and descriptions of the genera. Abies, Cedrus, Pseudolarix, Keteleeria, Nothotsuga, Tsuga, Cathaya, Pseudotsuga, Larix and Picea.* Koeltz Scientific Books, Königstein.
- (2) 梶幹男 (1982) 亜高山性針葉樹の生態地理学的研究－オオシラビソの分布パターンと温暖気候の影響－. 東京大学農学部演習林報告. 72: 30-120.
- (3) Seki, T. (1994) Dependency of cone production on tree dimensions in *Abies mariesii*. *Canadian Journal of Botany* 72: 1713-1719.
- (4) Seki, T. (2008) Influence of annually fluctuating seed-cone production and climatic factors on the upper-crown expansion of canopy trees of *Abies mariesii* Masters (Pinaceae). *Plant Species Biology* 23: 129-139.

報 告 コ ー ナ ー

水源林シンポジウム 開催報告

平成 21 年 10 月 19 日（月）に札幌市教育文化会館 1 階小ホールにおいて森林総合研究所が主催し、東京大学北海道演習林および南富良野町森林組合が共催する水源林シンポジウムが林業関係者や一般市民等 250 名の参加者を得て開催されました。「豊かな水を育む森林ー水源林の役割ー」と題したこのシンポジウムでは 5 人の講師により森林の水土保持機能のメカニズムや北海道の水源林の造成や管理の状況、さらには森林生態系に配慮した択伐施業や生物多様性の問題まで幅広い話題の講演が行われ、当北海道支所からは尾崎研一氏が「昆虫類から見たカラマツ人工林の生物多様性」と題する講演を行いました。



シンポジウム会場の様子



尾崎研一氏の講演

森林講座 開催報告

平成 21 年 11 月 2 日（月）に平成 21 年度第 3 回目の森林講座を開催しました。講師は倉本恵生氏。「シラカバの花はいつ咲くの？」と題したテーマでシラカバの花粉についての話題が取り上げられました。特に世界的な技術革新（遺伝子組換え樹木による交雑）と、身近な生活レベル（シラカバ花粉症）という 2 つの問題にからんで、シラカバの咲く時期を調べ始めた経緯とその取り組みが紹介されました。当日は 26 名が参加し、講演終了後にも熱心な参加者から数多くの質問が出されました。

平成 22 年 1 月 14 日（木）には平成 21 年度第 4 回目の森林講座を開催しました。講師は高橋正義氏。「山菜採り遭難」と題した講演では北海道地方での山菜採りに伴う遭難状況や統計が示され、参加者は熱心に聞き入っていました。参加者 14 名の中には、自身が山菜採りに入った際、山で道に迷った体験を披露する方もいらっしゃいました。



第 3 回森林講座の終了後の質問風景



第 4 回森林講座の様子



森林総合研究所北海道支所研究情報誌
『北の森だより』 Vol.4

編集・発行 独立行政法人森林総合研究所北海道支所
〒062-8516 北海道札幌市豊平区羊ヶ丘7番地
TEL(011)851-4131 FAX(011)851-4167
URL <http://www.ffpri-hkd.affrc.go.jp>

印刷 株式会社アイワード
〒060-0033 札幌市中央区北3条東5丁目5番地91
TEL(011)241-9341(代) FAX(011)207-6178

2010年3月12日発行

本誌から転載・複写する場合は、森林総合研究所北海道支所の許可を得てください。

表紙写真：北海道に自生する主なカンバの雌花序（上からシラカンバ、ウダイカンバ、ダケカンバ）

裏表紙写真：開花中のシラカンバ樹冠（太くて下垂しているのが雄花序、細くて直立しているのが雌花序）

撮影：倉本恵生

この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。