

スギ花粉症対策品種の開発

| | |
|-------|------------|
| 誌名 | 日本森林学会誌 |
| ISSN | 13498509 |
| 著者 | 斎藤, 真己 |
| 巻/号 | 92巻6号 |
| 掲載ページ | p. 316-323 |
| 発行年月 | 2010年12月 |

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



スギ花粉症対策品種の開発

齋藤真己^{*1}

スギ花粉症に対する育種的な対策として、着花量の少ない少花粉、花粉中の Cry j 1 量が少ない低花粉アレルゲン性、花粉を生産しない雄性不稔性に着目した。着花量の少ないスギ精英樹は全国で 135 クローン選抜された。この性質は複数箇所の検定林で再現性が確認され、親子回帰による遺伝率も 0.34 と比較的高い値であった。花粉中の Cry j 1 量を全国の精英樹 420 クローンについて調査した結果、0.38~10.23 pg/個と大きな変異を示し、その狭義の遺伝率は、1.0 と高い値であった。このことから次世代での選抜効果が顕著に現れると期待された。無花粉になる雄性不稔性は一対の劣性遺伝子支配であることが明らかになり、その遺伝子をヘテロ型で保有した精英樹が 4 クローン発見された。優良な無花粉スギの作出に向けて、これら精英樹同士の交配家系が育成されている。スギ花粉症対策品種は、現在、さし木等によるクローン増殖やミニチュア採種園による種子生産が図られており、これらを上手く活用することによって従来の木材生産性を損なうことなく、花粉飛散量の軽減に繋がると考えられた。

キーワード：花粉症対策品種、少花粉、スギ、低花粉アレルゲン性、雄性不稔性

Maki Saito^{*1} (2010) Special Issue "For Countermeasures against Sugi Pollinosis in Forest Science", Breeding Strategy for the Pollinosis Preventive Cultivars of *Cryptomeria japonica* D. Don. J. Jpn. For. Soc. 92: 316-323.

Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) pollinosis has become a serious allergic disease. Therefore, an important issue is to reduce the amount of airborne pollen by breeding method. There was a great difference in male flower setting among plus tree clones. From the investigation in clonal test plantations, 135 clones were selected with few male flowers. The heritability of male flower setting was high at 0.34. Cry j 1 content of 420 plus tree clones showed variation from 0.38 to 10.23 pg per pollen grain and the heritability of Cry j 1 estimated by parent-offspring regression was very high at 1.0. From these results, it was suggested that a large number of seedling with low allergens could be created by crossing the clones selected low pollen allergen. Male sterility of *C. japonica* is controlled by a recessive allele at a single locus and is expressed only in homozygotes (aa). We selected that 4 plus tree clones that are heterozygous for a male-sterility gene. It is possible to create superior male-sterile trees by crossing with plus trees possessing the male-sterility gene. The use of these pollinosis preventive cultivars would reduce *C. japonica* pollen production while maintaining the yield of high quality timber.

Key words: *Cryptomeria japonica* D. Don, few male flowers, low pollen allergen, male sterility, pollinosis preventive cultivar

I. はじめに

近年、スギ花粉症が社会問題になっていることから、林業サイドではスギ林からの花粉飛散抑制が強く求められている(佐橋, 2002)。遺伝的に花粉(アレルゲン)がない、もしくはその生産量が少ないスギの遺伝的特性を利用して育種的に空中アレルゲン量を抑制する方法は、その効果が現れるまで時間を要するが安定性や持続性の面で優れており、将来、その量を確実に減少させる対処法になると期待されている(齋藤, 2006)。育種による花粉飛散抑制では、大きく分けて①着花量の少ない少花粉スギの利用(岩澤・小平, 1995)、②低花粉アレルゲン性を保有したスギの利用(佐々木ら, 1996)、③雄性不稔性を保持した無花粉スギの利用(平ら, 1993)、④三倍体(佐々木, 1983)や異数体(中村ら, 1991)の利用、⑤遺伝子組み換え技術による不稔スギの作出(谷口, 2007)などの手法で研究が進められている。いうまでもなく、スギは木材生産を目的に造林されている樹種であるため、スギ花粉症対策品種の開発にあたって重要なことは成長や材質、気象害に対する抵抗性な

ど林業上、重要な性質を備えていることである。このことから、木材生産性など総合的に優良な性質を保持している精英樹の中から、花粉飛散抑制となりうる性質あるいは遺伝子を保有したクローンを選抜し、それらを品種改良や増殖に利用するのが効果的であり、育種期間を短縮するうえで重要といえる。

以上のことから、本稿では精英樹の中からすでに選抜が行われている少花粉、低花粉アレルゲン性、雄性不稔性を中心に、これまでに得られた成果や課題、今後の展望について概説する。

II. 着花量の少ない少花粉スギ

スギの花粉は雄花の中に含まれていることから、遺伝的に雄花着花量の少ない個体を選抜し、それを造林に利用することで花粉生産量の抑制に繋がる。雄花の着花量は、品種や個体間で大きく異なることが以前から報告されていた(長坂・田淵, 1975; 齋藤・河崎, 1984; 田淵, 1986)。また、林木育種事業における精英樹特性調査の一環としても着花量の調査が行われていることから、これらのデータを参考

* 連絡先著者 (Corresponding author) E-mail: saito@fes.pref.toyama.jp

¹ 富山県農林水産総合技術センター森林研究所 〒930-1362 富山県中新川郡立山町吉峰3 (Toyama Prefectural Agricultural, Forestry and Fisheries Research Center, Forestry Research Institute, 3 Yoshimine, Tateyama-machi, Nakaniiikawa-gun, Toyama 930-1362, Japan) (2010年2月9日受付; 2010年8月31日受理)

にすることによって効率的な選抜が可能となる。

1. 選 抜

雄花着花量の少ない少花粉スギの選抜は、1991年から千葉県が全国に先駆けて調査を開始し、1995年に精英樹の中から6クローンを選抜した(岩澤・小平, 1995)。

調査は、精英樹を中心とした2箇所の検定林(1970年と1986年に造成)で、個体ごとに雄花の着生度を4段階の指数(0, 無着生; 1, わずかに着生; 2, 中程度に着生; 3, 多く着生)で評価する着花指数法で行われ、家系間で分散分析を行った結果、着花個体率、着花指数とも1%水準で有意差が認められた。また、変動の寄与率からは家系間の変動が年次間や交互作用の変動よりも大きかった。これらの結果は、クローン選抜による効果が年次間を通し有効であることを意味する。

さらに千葉県では、目視による着花指数と雄花生産量の関係についても調査しており、両者の関係は次式で表せることを明らかにした(遠藤・藤林, 2006)。

$$y = 264.14x^2 + 73.539x \quad (r = 0.884)$$

y, 雄花生産量 (g/本); x, 着花指数。

上記2箇所の検定林において全クローンの中から雄花生産量の少ないクローンおよび家系を10%の基準で選抜したところ、着花指数は0.034と0.058以下となり、得られた回帰式から雄花生産量を算出すると平均で6g/本以下になった。これに対して、標準的な個体の着花指数を1.5~1.8として雄花量を算出すると700~1,000g/本程度となることから、選抜されたクローンの雄花生産量は、標準的なスギの1%以下になると推定された(遠藤・藤林, 2006)。

その後、他の都府県でも(独)森林総合研究所林木育種センター(以下、林木育種センター)と連携して、1996年から2008年にかけて全国の精英樹の中から東北育種基本区で21クローン、関東育種基本区で57クローン、関西育種基本区で27クローン、九州育種基本区で30クローンの少花粉スギが選抜された(近藤, 2009)。

選抜方法は原則、複数箇所の15年次以上の検定林を対象とし、雄花の着生度を1~5の5段階で評価後、平均着花指数が1.1以下のクローンとしている(林木育種センター品種開発実施要領—花粉症対策品種—<http://ftbc.job.affrc.go.jp/>)。

千葉県で作られた回帰式をそのまま適用することはできないが、平均着花指数が1.1以下であれば、標準的なスギと比べて1%以下の着花量になると期待されている(近藤, 2009)。

2. 遺 伝 性

千葉県で選抜された少花粉スギは表-1に示したとおり、その後の10年間にわたる追跡調査でも安定して着花量が少なかった(遠藤・藤林, 2006)。また、齋藤・明石(1998)は、次代検定林での親子回帰から着花量の遺伝率が0.34、着花率の遺伝率が0.41であったと報告した。

以上のことから、若齢期ではあるが、雄花着花性に関す

表-1. 平均着花指数の年推移

| クローン名 | 平均着花指数 | | | |
|-------|--------|-------|-------|------|
| | 1995年 | 2000年 | 2005年 | 平均 |
| 鬼泪10号 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.03 |
| 勝浦1号 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 北三原1号 | 0.01 | 0.13 | 0.37 | 0.17 |
| 周南1号 | 0.01 | 0.00 | 0.20 | 0.07 |
| サンブスギ | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| 北三原3号 | 0.07 | 0.03 | 0.39 | 0.16 |
| 鬼泪7号 | 1.01 | 0.40 | 1.93 | 1.11 |
| 鬼泪5号 | 1.16 | 1.34 | 2.20 | 1.57 |
| 周南2号 | 1.06 | 0.61 | 1.66 | 1.11 |
| 地スギ | 1.31 | 1.90 | 2.02 | 1.74 |
| 鬼泪8号 | 1.45 | 0.63 | 1.36 | 1.15 |
| クモトオシ | 1.79 | 2.60 | 2.06 | 2.15 |

上段の6クローンは少花粉の精英樹を示す。遠藤・藤林(2006)より抜粋。

る遺伝率は比較的高く、その効果が期待できる。

III. 低花粉アレルゲン性を保有したスギ

スギ花粉症は花粉そのものによって引き起こされるのではなく、花粉に含まれる特定のタンパク質(アレルゲン)が原因となって発症することから、アレルゲン量の軽減は花粉生産量の減少と同じ意味をなし、花粉症対策の一環として効果があると期待される。スギのメジャーアレルゲンとして同定されているCry j 1とCry j 2はいずれも分子量が約40,000の塩基性タンパク質であるが、抗原性の面からは互いに独立しており交差反応性は認められていない(安枝, 2000)。これらのアレルゲンはいずれもペクチン分解酵素であることから、花粉管が発芽する際に細胞壁中のペクチンを分解し、その伸長を補助する機能をもつと推定されている(Taniguchi *et al.*, 1995; Ohtsuki *et al.*, 1995; Wang *et al.*, 1998)。Cry j 1の大部分は、花粉表面の外層(sexine)、および表面に付着している微粒子のオービクル(orbicle)に存在することから(Miki-Hiroshige *et al.*, 1994)、鼻粘膜などに吸着後、最初に溶出されるアレルゲンである。さらに、花粉中のCry j 1量はCry j 2より数倍多く存在し(澤谷ら, 1994)、アレルギー患者を対象にした皮内テストでも、Cry j 2よりCry j 1の方が高い陽性率を示すことから(安枝, 1994)、スギ花粉症患者にとってCry j 1が最も重要なアレルゲンといえる。

近年、Cry j 1量が品種間や個体間によって大きく異なることが明らかにされた(佐々木ら, 1996; 澤崎ら, 1997; 後藤ら, 1999)。この結果は、花粉症対策として低花粉アレルゲン性品種の作出の可能性を示唆しており、精英樹の中からこのような性質を保持したクローンを選抜できればスギ花粉症対策として重要な遺伝資源となりうる。

1. 選 抜

低花粉アレルゲン(Cry j 1)性を保有した精英樹の選抜を目的に、蛍光サンドイッチELISA法(齋藤・寺西, 1999)によって全国25道県420クローンについて花粉1個あたりのCry j 1量を定量した結果、最小で0.38 pg, 最

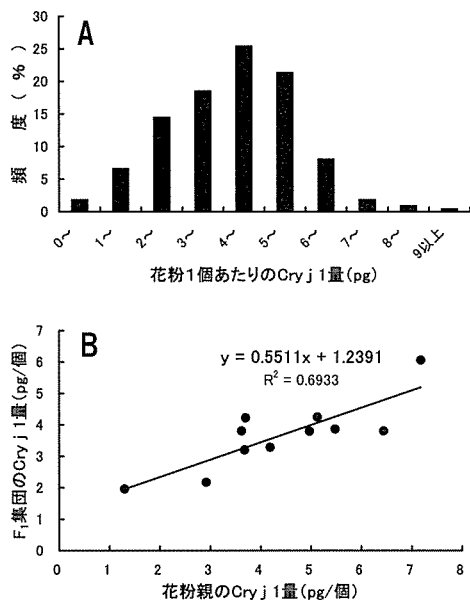


図-1. Cry j 1 量のクローン間変異と Cry j 1 量における花粉親と F₁ 家系の関係

(A) Cry j 1 量のクローン間変異。25 道県の精英樹 420 クローンの Cry j 1 量 (pg/個) の頻度分布。(B) Cry j 1 量における花粉親と F₁ 家系の関係。母親を共通とする 11 の F₁ 交配家系と花粉親の親子回帰から Cry j 1 の遺伝率を推定。狭義の遺伝率は、 $h^2 = 2b / (h^2 + 2b)$ (遺伝率; b , 回帰係数) で求められる。斎藤ら (2003) より改変。

大で 10.23 pg と大きな変異を示し、花粉 1 個あたりの Cry j 1 量が 1 pg に満たないクローンが全体の 2% 程度の頻度で存在することが明らかになった (図-1(A))。このことから推測すると、スギの精英樹は全国で 3,632 クローンあることから、それらのうち 70 クローン程度が低花粉アレルゲンを保持していると期待される。

2. 遺伝性

集団選抜によって目的とする形質の遺伝的な改良を行う場合、その大きさを表す遺伝獲得量は選抜差と遺伝率の積によって求められるため、その変異が大きくさらに遺伝率が高いほど、遺伝獲得量は大きくなる。Cry j 1 量の狭義の遺伝率は、母樹を共通とする 11 の F₁ 家系と花粉親の親子回帰から計算上、1.0 になると推定された (図-1(B))。また、クローン間の変異から分散分析によってもその広義の遺伝率 (反復率) が算出されており、0.79 と高い値であったと報告されている (後藤, 2005)。

Cry j 1 量は遺伝率が高いことに加えて、クローン間で 27 倍程度の大きな変異をもつことが明らかにされたことから (斎藤ら, 2003), 次世代で低花粉アレルゲンの選抜効果が顕著に現れると期待される。

IV. 雄性不稔性 (無花粉) を保有したスギ

遺伝的に全く花粉を飛散しない雄性不稔性を保有したスギの活用は、環境や樹齢に左右されることなく全く花粉を形成しないことから、将来の空中花粉数を軽減させるうえできわめて有効な手段となる。

雄性不稔になる突然変異体は、Laser and Lersten (1972)

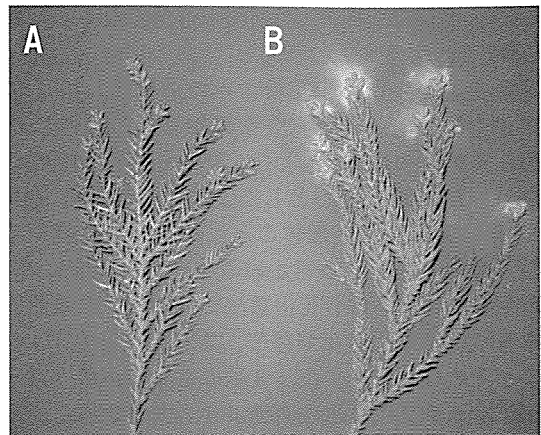


図-2. 無花粉スギと正常なスギの花粉の飛散状況の比較 (A) 無花粉スギ, (B) 正常なスギ。正常なスギは雄花の近くで大量に花粉を放出しているのに対して、無花粉スギは全く花粉を放出しない。

の総説によると 140 種を超える植物で発見されており、遺伝的な雄性不稔性は、メンデル遺伝をする核遺伝子型雄性不稔と細胞質遺伝をする細胞質型雄性不稔、日長や温度といった環境条件によって不稔性を発現する環境反応型雄性不稔の三つに大別される。核遺伝子型雄性不稔は一对の劣勢雄性不稔遺伝子によって支配されている場合が圧倒的に多く (田丸, 1994), 雄性不稔性の遺伝子を「*a*」、可稔性の遺伝子を「*A*」とすると、「*aa*」を保有する個体は雄性不稔となり、「*AA*」もしくは「*Aa*」を保有する個体は可稔となる。細胞質雄性不稔はミトコンドリアゲノムに変異がある雄性不稔誘起細胞質と雄性不稔遺伝子、稔性回復遺伝子の関係によって雄性不稔と可稔を制御できるため F₁ 種子採取のための最も好ましい育種体系となっており、トウモロコシをはじめとする多くの他殖性作物で実用化されている。環境反応型雄性不稔は、日長や温度によって可稔と不稔を制御できることから、これまで自殖性のため困難とされてきたイネの雑種強勢 (ヘテロシス) 育種を可能にした (丸山・粉川, 1991)。

スギの雄性不稔個体は、1992 年に富山県で初めて発見された (以下、富山不稔スギ) (平ら, 1993)。このスギは外見上、著しく異なるところはなく雄花も正常に着生するが、開花期になっても全く花粉を飛散させない特徴をもつ (図-2)。これに対して、自然交配による種子の発芽率は正常で、苗の生育も順調であったことから、雌花の機能は正常であり品種改良や種子での増殖が可能と判断された (平, 1994)。

1. 無花粉スギの特性調査と雄性不稔性の遺伝様式の解明

無花粉スギの実用化を図るためには、花粉の崩壊ステージや種子の発芽率など選抜された個体もっているさまざまな特性を明らかにする必要がある。富山不稔スギは、花粉の基となる花粉母細胞は形成されるものの四分子期のステージになると発育が停止し (Saito *et al.*, 1998), 最終的にはすべての花粉粒が崩壊する。また、雄性不稔性の遺伝

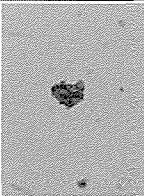
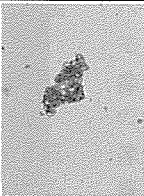
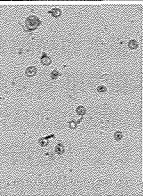
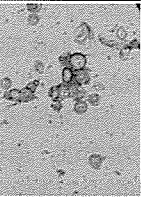
| 崩壊した花粉の形態 |  |  |  |  |
|-----------|---|---|--|---|
| 発現ステージ | 四分子期 | 一核期(前期) | 一核期(後期) | 成熟期 |
| 遺伝様式 | 核遺伝子型(aa)* | 核遺伝子型(bb) | 核遺伝子型(cc) | 核遺伝子型(dd) |
| 遺伝子座名 | ms-1 | ms-2 | ms-3 | ms-4 |
| 個体名 | 富山不稔1号 新大不稔3号 福島不稔1号 福島不稔2号 神奈川不稔1号 | 新大不稔1号 | 新大不稔5号 | 新大不稔8号 |

図-3. 無花粉スギのデータベース

*核遺伝子型は一對の劣性遺伝子支配であり、メンデル遺伝する。また、(aa)は遺伝子記号を表す。齋藤(2009a)より改変。

様式を解明するため、戻し交配を行った結果、その性質は花粉形成に関与する一つの遺伝子の異常によって引き起こされており、劣性遺伝(aa)することが明らかになった(Taira *et al.*, 1999)。

2. 雄性不稔遺伝子を保有した精英樹の探索

新潟大学と富山県林業技術センター(現・富山県森林研究所)では、成長や材質など遺伝的に優れた無花粉スギを作出するため、各地域の主要品種や精英樹の中から雄性不稔遺伝子をヘテロ型(Aa)で保有したクローンを探した。方法は、富山不稔スギ(aa)と精英樹を交配して得られたF₁集団の花粉稔性を調査した。花粉親となる精英樹が雄性不稔遺伝子をヘテロ型(Aa)で保有していれば、次世代で正常苗(Aa)と無花粉苗(aa)が1:1の頻度で分離し、保有していなければすべてのF₁苗が正常(Aa)となる。全国27道県330クローンについて調査した結果、雄性不稔遺伝子をヘテロ型(Aa)で保有した精英樹が富山県、石川県、神奈川県、静岡県から1クローンずつ発見された(Saito and Taira, 2005; 齋藤, 2008)。精英樹は全国で3,632クローンあることから、このような精英樹は他にも存在すると期待される。

3. それぞれの地域に適した精英樹由来の優良無花粉スギの開発

雄性不稔遺伝子をヘテロ型(Aa)で保有した精英樹同士で交配を行うことによって、このF₁集団の中から林業上優れた性質を保有した無花粉スギが約1/4の頻度で出てくることが期待される。そこで、農林水産省の新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「スギ雄花形成の機構解明と抑制技術の高度化に関する研究」(2006~2008年)では、日本海側(新潟, 富山, 石川)と太平洋側(東京, 神奈川, 静岡)に分けて上記の精英樹同士の交配を行い、現在、これらの交配家系を各都県で育成中である。これらは両親ともに精英樹であることから、優良な無花粉スギとして期待されている(齋藤, 2008)。

4. 多様な無花粉スギの開発

無花粉スギの普及を全国レベルで図るためには、その個

体数の増加と雄性不稔遺伝子の多様化が重要となる。富山県で無花粉スギが発見されて以来、全国的な調査が進み、現在では、青森, 福島, 新潟, 富山, 茨城, 神奈川, 三重の7県から23個体が選抜されている(齋藤, 2008)。また、富山県森林研究所が富山不稔スギの自然交配種子から育成した「はるよこい」(富山県森林研究所 HP: <http://www.fes.pref.toyama.jp/>)は初期成長と発根性に優れた無花粉スギとして2007年に、林木育種センターが関東育種基本区の検定林で選抜した「爽春」(久保田ら, 2007)は通直性に優れた無花粉スギとして2008年に、それぞれ品種登録された。

無花粉スギの出現頻度は地域によって多少の偏りはあるものの、これまでの調査で2,500~6,000分の1程度で存在することが明らかにされた(齋藤ら, 2005; 平ら, 2005)。各地で選抜された無花粉スギの雄花を光学顕微鏡で観察してみると、四分子期から成熟期までさまざまなタイプの花粉崩壊ステージが確認された(図-3)。このことは、多様な雄性不稔遺伝子が存在することを示唆しており、これまでにさまざまな組み合わせで交配試験を行った結果、4種類の雄性不稔遺伝子が同定された(吉井・平, 2007; 宮嶋ら, 2010)。トウモロコシやトマトなどでは50以上の雄性不稔遺伝子が同定されていることから(Kaul, 1988)、今後、スギでも多数の雄性不稔遺伝子が明らかになると予想される。

5. 雄性不稔遺伝子座名の標準化とデータベースの構築

前述したように無花粉スギは全国各地で発見され、さまざまなタイプが確認されている。これからも次々と新たなタイプの無花粉スギと雄性不稔遺伝子座が同定されるにつれて、今後の混乱が予想されることから、名称と遺伝子座名を下記のとおり標準化し、データベースを作成した(図-3)(齋藤, 2009a)。これには個体名や遺伝子座名に加えて花粉の崩壊ステージや開花期の雄花内部の写真, 全体像, 発芽率, 発根率, 関連する文献等も記載した。本データベースは富山県森林研究所(<http://www.fes.pref.toyama.jp/>)と(独)森林総合研究所(<http://www.ffpri.affrc.go.jp/>)のホームページで公開しており、今後の無花粉スギの研究の

進展に大いに役立つと期待される。

〈無花粉スギの名称と雄性不稔遺伝子座名の標準化〉

- 1) 無花粉スギの名称は、発見した都道府県名や大学名略称に不稔をつけ、見つかった順に番号をつける。
- 2) 雄性不稔の遺伝子座名は、原則として「遺伝子命名国際規約」(1958年日本学術会議承認)に従い、遺伝様式が決定された順に「*ms-1*」, 「*ms-2*」, と番号をつける。また、遺伝子記号も同様に決定された順に「*aa*」, 「*bb*」, とアルファベット順につけていき、遺伝子座名と統一して使用する。

V. 花粉症対策品種の大量増殖

スギは成長して材が収穫されるまでに数十年という長い年月がかかり、環境の変動や気象害、病虫害などさまざまな環境変化に耐えなくてはならないことから、遺伝的に多様な集団の方が安全とされる。このことから、九州を除く多くの地域ではさし木よりも実生による苗木生産が好まれる傾向にある。

スギの実生苗の大半は精英樹等で構成された採種園から生産されており、ここでは園内の個体間で任意交配が行われることによって遺伝的に優れた種子の大量生産が期待されているが、花粉症対策品種の実生苗を短期間で大量生産するためには、その性質を保有した精英樹等を採種木としたミニチュア採種園が有効と思われる。ミニチュア採種園は新潟県で考案され、従来の採種園と比較して①採種木の樹高が120 cm程度に小さく保たれており、植栽間隔も狭いことから小面積で効率的に作業を実施できる。②更新が容易であることから、最新の育種素材を採種木にすることで新品種の種子を早期に生産できるなどの利点をもっている (Ito and Katsuta, 1986; 林木育種推進東北地区協議会技術部会, 2001)。しかしながら、野外にこのような採種園を造成した場合、大きな問題点として園外からの花粉混入が考えられ、目的とする形質を保持した苗の生産効率の低下が危惧される。たとえば、斎藤・平 (2005) は、効率的に無花粉の実生苗を生産するため、雄性不稔遺伝子をヘテロ型 (*Aa*) で保有した個体で野外にミニチュア採種園を造成したが、調査した苗 886 個体のうち無花粉苗は 83 個体しか得られなかったと報告した。園外からの花粉混入の影響がなければ、ヘテロ型個体相互の交配 (*Aa* × *Aa*) となり、得られた苗木集団のうち約 25%, つまり、866 個体中 217 (216.5 ± 12.7) 相当数の個体が雄性不稔となる。このことから判断すると、ミニチュア採種園の外部花粉混入率は約 62% となり、非常に高いことが明らかになった。Moriguchi *et al.* (2005) も、DNA マーカーを用いて 5 箇所のスギ採種園の外部花粉混入率について調査した結果、35~66% と高い値になったと報告している。

以上のことから、野外に造成した採種園から目的形質を保持した優良苗を効率的に生産するのは困難であると考えられ、特に少花粉スギで野外にミニチュア採種園を造成した場合は、着花量がきわめて少ないことから少花粉スギ同



図4. 無花粉スギの大量増殖を目的としたハウス内採種園

雄性不稔遺伝子をホモ型 (*aa*) とヘテロ型 (*Aa*) で保有した個体を混在させ、4 台の扇風機で園内の空気を循環させている。2010 年 7 月に富山県森林研究所にて撮影。

士の交配が起こりにくく、外部の花粉と交配する確率がさらに高まることが危惧される。実際に、茨城県で造成された少花粉スギのミニチュア採種園では、全体的に着花量が少なく、特に中央部分ではクローンにかかわらず結果率が低くなる傾向が認められたと報告されている (岩見ら, 2007)。この結果は、採種園の内部では花粉不足の傾向が強く、外側の個体は園外から混入した花粉と交雑している可能性が高いことを意味する。また、後藤 (2005) は、少花粉スギの採種園周辺にある雄花を大量に着生する個体から飛散した花粉と交雑した場合には、少花粉になる遺伝的特性が相殺され、雄花着花性における改良効果が減少すると予想している。

園外からの花粉の混入を防ぐ対策としては、ガラス室やビニールハウス内に小型化した採種木を入れ、その中で任意交配を行わせる室内ミニチュア採種園 (大谷・大庭, 1984; 斎藤・平, 2006) が有効と考えられる。斎藤 (2009b) は、閉鎖されたガラス室内に種子親として雄性不稔遺伝子をホモ型 (*aa*) で保有した個体、花粉親としてヘテロ型 (*Aa*) で保有した個体をそれぞれ列状に配置したミニチュア採種園を造成し、得られた種子の発芽率は 22.8% と平均的なスギの発芽率 (15~35%) と変わりなく、無花粉苗の出現率も 47.3% と期待分離比に適合したと報告した。この結果をもとに、富山県では優良な無花粉スギの大量生産を目的に、初期成長の早い無花粉スギ (*aa*) と雄性不稔遺伝子をヘテロ型 (*Aa*) で保有した精英樹を用いて大型のビニールハウス (72.9 m²) 内に室内採種園を造成しており、年間 1 万本程度の無花粉苗を安定生産する予定となっている (図-4)。

また、新潟県では無花粉スギの普及に向けた新たな試みとして、79 家系 483 個体の中から生育の優良な無花粉スギ 100 個体を選抜し、それらのさし木苗を混合した集団を造林用として供給する予定となっている (新潟県森林研究所 HP: <http://www.pref.niigata.lg.jp/shinrin/>)。この方法によれば、遺伝的に多様な集団となることから安全性が確

保され、さらに実生苗のように集団の中から雄性不稔の個体を選抜する手間が省けるメリットがある。

VI. 今後の展望と課題

これまで、スギやヒノキを中心とした林木の育種は、「成長量の増大」、「材質の向上」、「気象害や病害虫に対する抵抗性の向上」を中心に進められてきたが（田島，2001）、近年、森林に対するニーズの多様化と環境問題などが加わり、「特定形質」に関する育種も重要な位置を占めるようになってきた。その中でも、花粉症対策として花粉飛散量の軽減に向けた育種は社会的な関心も高く、重要な課題として取り組むべき状況になっている。本稿ではスギ花粉症の軽減に向けた育種的な対策として、少花粉、低花粉アレルゲン性、雄性不稔性に着目したが、林野庁では平成19年に花粉発生源プロジェクトチームを設置し、着花量が1%以下（着花指数1.1以下）の少花粉スギ、それが20%以下（着花指数1.3以下）の低花粉スギ、雄性不稔性を保有した無花粉スギを対象とした花粉症対策品種の大量増殖を開始した。このプロジェクトではミニチュア採種園を中心に苗木の生産体制を整備し、平成29年には苗木供給量を1,000万本まで増大させる予定となっている（津田，2007）。現在のスギ苗の供給量は全国で2,000万本程度であることから（林野庁，2009）、スギ苗供給量全体の約50%を占める量となる。

無花粉スギについては、全国各地で選抜されるようになり、多様な雄性不稔遺伝子があることや雄性不稔遺伝子を保有した精英樹も各地に存在することが明らかになってきた。これらの材料を上手く活用することによって、遺伝的多様性を損なうことなく、それぞれの地域に適した優良な無花粉スギの作出が可能となる。現在では、数多くの都道府県で富山不稔スギの雄性不稔遺伝子（*ms-1*）を保有しており、特に、農林水産省の新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「スギ雄花形成の機構解明と抑制技術の高度化に関する研究」（2006～2008年）に参画していた青森、山形、福島、新潟、富山、石川、東京、神奈川、静岡の9都県では、これまでに同定された4種類すべての雄性不稔遺伝子を保有している。各都道府県でそれぞれの精英樹との交配家系を育成中であることから、近い将来、精英樹由来の優良な無花粉スギが各地で多数作出されるであろう。また、生育特性が明らかにされている無花粉スギ「はるよこい」や「爽春」、「三重不稔1号」（山田・山口，2009）もさし木等によってクローン増殖が急がれているが、特定のクローンによる造林は気象害等による危険性が高まることから、さし木によって増殖する場合は新潟県のように選抜した複数の個体から採穂し、遺伝的に多様な集団にすべきであると考えられる。無花粉スギは花粉発生源対策としては究極の特性を保有しているが、大量増殖するには、まだ親となる個体数が不足していることから、当面は都市近郊部などに優先して活用すべきであろう。また、無花粉スギの実生苗を生産するにあたっては、雄性不稔遺伝子を

ヘテロ型（*Aa*）で保有した個体同士の交配で約25%、ホモ型（*aa*）とヘテロ型（*Aa*）の交配で約50%の頻度でしか雄性不稔スギは出現しないことから、得られた苗の集団の中から無花粉の個体を選抜するのに多くの労力を要することが課題となっている。このことから、今後は簡便に無花粉苗を選抜する方法を確立する必要がある。

着花量が少ない精英樹は、全国で130クローン以上選抜されていることから、現時点では大量生産するうえで最も有力といえるが、その性質はあくまでも若齢期を対象としているのであって、伐期まで安定して着花量が少ないとはいきれない点は注意すべきである。スギの着花量は加齢とともに増加し、頭打ちになるのは50年生程度であると報告されているが（齋藤，1995）、少花粉スギの選抜対象は前述したように15年以上となっていることから、今後、これらが50年生程度になったときにどの程度、着花するのは不明と言わざるを得ない。たとえば、富山県のさし木品種であるマヤマスギは30年生以下では着花しない個体が多いが、40年生以上になると大量に着花し始め、大径木になると他品種よりも着花量が多くなることが報告されている（平，1991）。このことから、少花粉として選抜された精英樹の中にもこのようなクローンが存在している可能性が考えられる。花粉が少なくなる遺伝的な要因には、着花を誘導する植物ホルモンの一種であるジベレリン（橋詰，1959; Honma *et al.*, 1995）の生合成経路に障害があるものやマヤマスギのように着花性に関して晩生なものなどさまざまなタイプがあると推定されるが、現状はその解明がなされないまま着花量の少ない精英樹でミニチュア採種園が造成されている。また、着花量の少ない精英樹で造成したミニチュア採種園は前述のように園外からの花粉混入の危険性が高いことから、今後は花粉が少なくなる遺伝的な要因を明らかにするとともに、着花量の少ない精英樹を使用したミニチュア採種園で生産された種苗の品質を検証する必要がある。

低花粉アレルゲン（*Cry j 1*）性を保有するスギに関しては、次世代で高い選抜効果が期待できるものの、現段階では実用化されるまでには至っていない。生産される総アレルゲン量は、花粉数と花粉中のアレルゲン量の積で表されることから、当然、アレルゲン量に加えて雄花生産量についても調査する必要がある。雄花生産量とアレルゲン量の両方とも少ない精英樹が理想であるが、これら両方を満たすと対象となるクローン数が大幅に減少することが予想される。このことから、総アレルゲン量の少ない実生苗を生産する場合には、少花粉と低花粉アレルゲン性を保有したスギを混在させた室内ミニチュア採種園を造成するなど工夫が必要となるだろう。

遺伝子組み換え技術を用いたスギの花粉飛散抑制に関する研究も着実に進展しており、たとえば、東京農工大学のグループは、スギの花芽分化に関与する2種類のLEAFY相同遺伝子を単離し（Shiokawa *et al.*, 2008）、さらにこの遺伝子をタバコに導入して、その発現に成功している（杉

浦ら, 2009)。

スギ花粉症は全国的な問題でありさまざまな環境に対する適応性等を考慮すると、今後も従来の木材生産性を損なわないよう配慮しつつ、多様な花粉症対策品種を開発し続ける必要がある。スギ花粉の飛散量を軽減させるためには、まず粗放化もしくは放棄が進んでいる人工林の適切な管理と伐採(収穫)を実施することである(斎藤・平, 2004)。その後で、造林に適した立地でさらに花粉の発生源として重要な地域(津田, 2007)では優先的に花粉症対策品種を導入し、不成績造林地(長谷川, 1991)では広葉樹などへの樹種転換が自然力に任せて天然林へ誘導してやることによって、緩やかであるが森林環境に対して負担の少ない確実な花粉飛散の抑制方法になると期待される。

本稿を執筆するにあたり、元新潟大学の平 英彰博士、(独)森林総合研究所の篠原健司博士、森口喜成博士、千葉県農林総合研究センター森林研究所の遠藤良太上席研究員、神奈川県自然環境保全センター研究部の齋藤央嗣主任研究員、新潟県森林研究所の伊藤信治専門研究員、樋口有未研究員には貴重なご意見やご指導をいただきました。ここに記して、深く御礼を申し上げます。

引用文献

- 遠藤良太・藤林節子 (2006) 千葉県におけるスギ精英樹の大豊作年の雄花着花性. 千葉森七報 1: 1-5.
- 後藤陽子 (2005) スギにおける花粉アレルゲンの遺伝的変異に関する研究. 林育研報: 1-66.
- 後藤陽子・近藤禎二・安枝 浩 (1999) 関東地方周辺のスギ精英樹花粉における Cry j 1 量の変異. 花粉誌 45: 149-152.
- 長谷川幹生 (1991) スギ不成績造林地での下刈り, 除伐が広葉樹の定着に与える影響. 日林誌 73: 375-379.
- 橋詰隼人 (1959) スギ花芽形成におよぼすジベレリンの影響. 日林誌 41: 357-361.
- Honma, T., Yamaguchi, I., Nakajima, M., Murofushi, N., and Migita, K. (1995) Endogenous gibberellins in the pollen of *Cryptomeria japonica* D. Don. J. Jpn. For. Soc. 77: 356-365.
- Ito, S. and Katsuta, M. (1986) Seed productivity in the miniature seed orchard of *Cryptomeria japonica* D. Don. J. Jpn. For. Soc. 68: 284-288.
- 岩見洋一・益子義明・田村景子・引田裕之 (2007) 花粉の少ないスギミニチュア採種園の雌雄花着花性と結果率について. 林木の育種(特): 1-3.
- 岩澤勝巳・小平哲夫 (1995) 千葉県における花粉の少ないスギの選抜. 日林関東支論 47: 55-56.
- Kaul, M.L.H. (1988) Male sterility in higher plants. Springer-Verlag, 1-1005.
- 近藤禎二 (2009) 林木育種の成果シリーズ (4) 花粉症対策品種. 林木の育種 232: 61-63.
- 久保田正裕・高橋 誠・星比呂志・柏木 学・竹田宣明 (2007) 無花粉スギ「爽春」の 24, 25 年生時におけるクローン特性. 林育研報 23: 309-317.
- Laser, K.D. and Lersten, N.R. (1972) Anatomy and cytology of microsporogenesis in cytoplasmic male sterile angiosperms. Bot. Rev. 38: 425-454.
- 丸山清明・粉川 聡 (1991) 中国における二系法ハイブリッドライズ開発の現状. 農業技術 46: 160-165.
- Miki-Hiroshige, H., Nakamura, S., Yasueda, H., Shida, T., and Takahashi, Y. (1994) Immunocytochemical localization of the allergenic proteins in the pollen of *Cryptomeria japonica*. Sex Plant
- Reprod. 7: 95-100.
- 宮嶋大介・吉井エリ・細尾佳宏・平 英彰 (2010) スギ雄性不稔新大 8 号の細胞学的・遺伝的特性. 日林誌 92: 106-109.
- Moriguchi, Y., Tani, N., Ito, S., Kanehira, F., Tanaka, K., Yomogida, H., Taira, H., and Tsumura, Y. (2005) Gene flow and mating system in five *Cryptomeria japonica* D. Don seed orchards as revealed by analysis of microsatellite markers. Tree Genet. Genomes 1: 174-183.
- 長坂寿俊・田淵和夫 (1975) スギ精英樹の着花形質に関するクローン間差. 関東林育年報 11: 189-213.
- 中村未樹・長野克也・戸田義宏 (1991) スギの異数体について. 日林九支研論 44: 55-56.
- 大谷賢二・大庭喜八郎 (1984) 簡易なビニールフレームを用いたスギの人工交配. 日林論 95: 289-290.
- Ohtsuki, T., Taniauchi, Y., Kohno, K., Fukuda, S., Usui, M., and Kurimoto, M. (1995) Cry j 2, a major allergen of Japanese cedar pollen, shows polymethylgalacturonase activity. Allergy 50: 483-488.
- 林木育種推進東北地区協議会技術部会 (2001) 東北育種基本区スギミニチュア採種園技術マニュアル. 48 pp, 林木育種センター東北育種場.
- 林野庁 (2009) 森林・林業統計要覧 2009 年版. 250 pp, 林野弘済会.
- 佐橋紀男 (2002) ここまで進んだ花粉症治療法. 190 pp, 岩波書店.
- 齋藤秀樹 (1995) 林学から見たスギ花粉症—森林の花粉生産を中心に—. 耳鼻臨床 補 76: 6-19.
- 齋藤央嗣・明石孝輝 (1998) スギ雄花着生性の選抜効果. 日林論 109: 359-361.
- 斎藤真己 (2006) スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) の雄性不稔性と低花粉アレルゲン性に関する林木育種学的研究—スギ花粉症の軽減に向けた育種的な対策—. 富山林技セ研報 19 (別冊): 1-52.
- 斎藤真己 (2008) 無花粉スギの開発状況と今後の展望. 森林科学 54: 17-20.
- 斎藤真己 (2009a) 無花粉 (雄性不稔) スギのデータベースの作成. 林木の育種 232: 44-46.
- 斎藤真己 (2009b) 雄性不稔遺伝子を保有したスギの列状配置型室内ミニチュア採種園の有効性. 日林誌 91: 168-172.
- 斎藤真己・寺西秀豊 (1999) マイクロプレートリーダーを用いた簡便なスギ花粉アレルゲン—Cry j 1—の定量法の確立. 日林誌 81: 318-324.
- 斎藤真己・平 英彰 (2004) 森林施業とスギ花粉生産量の関係. 花粉症研究会会報 15: 8-12.
- 斎藤真己・平 英彰 (2005) 雄性不稔遺伝子をヘテロ型で保有するスギ個体を用いたモデルミニチュア採種園の造成. 日林誌 87: 383-386.
- Saito, M. and Taira, H. (2005) Plus tree of *Cryptomeria japonica* D. Don with a heterozygous male-sterility gene. J. For. Res. 10: 391-394.
- 斎藤真己・平 英彰 (2006) ガラス室内スギミニチュア採種園の特徴とその有効性. 日林誌 88: 187-191.
- Saito, M., Taira, H., and Furuta, Y. (1998) Cytological and genetical studies on male sterility in *Cryptomeria japonica* D. Don. J. For. Res. 3: 167-173.
- 斎藤真己・寺西秀豊・平 英彰 (2003) 全国 25 道県におけるスギ花粉アレルゲン—Cry j 1—量の変異と遺伝率の推定. 日林誌 85: 312-317.
- 斎藤真己・古賀由美子・古田喜彦・平 英彰 (2005) 採種園産実生個体からの雄性不稔スギの選抜. 日林誌 87: 1-7.
- 斎藤武史・河崎久男 (1984) スギの着花特性およびその遺伝に関する研究. 林試研報 328: 17-41.
- 佐々木義則 (1983) 有用樹種の細胞遺伝学的研究 [IX] —低稔性等を示すスギおよびヒノキ精英樹の細胞学的観察—. 大分林試研究時報 6: 1-20.
- 佐々木義則・谷口美文・正山征洋 (1996) スギ倍数体花粉のアレルゲン分析. 大分県林試研報 22: 8-12.
- 澤崎 健・板谷英貴・森元和男・山木光男 (1997) スギ 51 品種の抗原性の比較. 日立化成テクニカルレポート 28: 41-44.
- 澤谷真奈美・小野昭子・河野恵三・河島トモ子・谷口美文・池上伯

- 郎・臼井美津子・栗本雅司 (1994) Enzyme-linked immunosorbent assay による *Cry j I*, *Cry j II* 定量法の開発. アレルギー 43: 467-473.
- Shiokawa, T., Yamada, S., Futamura, N., Osanai, K., Murasugi, D., Shinohara, K., Kawai, S., Morohoshi, N., Kotayama, Y., and Kajita, S. (2008) Isolation and functional analysis of the *CjNdy* gene, a homolog in *Cryptomeria japonica* of *FLORICAULA/LEAFY* genes. *Tree Physiol.* 28: 21-28.
- 杉浦太輔・佐藤かな・片山義博・梶田真也 (2009) スギ LEAFY 相同遺伝子の花成経路における機能の解析. 林木の育種 (特): 25-28.
- 田淵和夫 (1986) スギ精英樹のジベレリンによる着花性. 関東林育年報 20: 5-23.
- 平 英彰 (1991) 富山県におけるスギ雄花の着花状況 (1990 年). 花粉症研究会会報 2: 10-14.
- 平 英彰 (1994) スギ雄花不稔個体から得られた自然交配苗の特徴. 日林誌 76: 598-600.
- 平 英彰・寺西秀豊・剣田幸子 (1993) スギの雄性不稔個体について. 日林誌 75: 377-379.
- Taira, H., Saito, M., and Furuta, Y. (1999) Inheritance of the trait of male sterility in *Cryptomeria japonica*. *J. For. Res.* 4: 271-273.
- 平 英彰・斎藤真己・五十嵐正徳・斎藤央嗣 (2005) スギ雄性不稔個体の選抜. 林木の育種 216: 17-18.
- 田島正啓 (2001) 林木育種研究と最近の成果—林木育種センターを中心として—. 育種学研究 3: 103-108.
- 田丸典彦 (1994) イネの遺伝的雄性不稔性と雑種不稔性に関する育種学的研究. 北大農邦文紀要 19: 203-256.
- Taniguchi, Y., Ono, A., Sawatani, M., Nanba, M., Kohno, K., Usui, M., Kurimoto, M., and Matsuhashi, T. (1995) *Cry j I*, a major allergen of Japanese cedar pollen, has pectate lyase enzyme activity. *Allergy* 50: 90-93.
- 谷口 亨 (2007) 林木における不定杯による植物体再生系と遺伝子組み換え系の開発に関する基礎的研究. 林育研報 23: 63-119.
- 津田京子 (2007) 今後の花粉発生源対策の推進方策について—花粉発生源対策プロジェクトチーム検討報告—. 林木の育種 225: 17-18.
- Wang, Y., Mukai, Y., Fukui, M., Futamura, N., Nagao, A., and Shinohara, K. (1998) Pollen-specific expression of the gene for an allergen, *Cry j 1*, in *Cryptomeria japonica*. *J. For. Res.* 3: 131-134.
- 山田浩雄・山口和穂 (2009) 関西育種基本区におけるスギクロンの雄性不稔の調査結果と発見された雄性不稔クロンの特性. 森林応用研究 18: 33-36.
- 安枝 浩 (1994) 花粉アレルギーの分析. *Pharma Medica* 12: 39-43.
- 安枝 浩 (2000) スギ花粉症とスギ・ヒノキ科花粉のアレルゲン. 花粉誌 46: 29-38.
- 吉井エリ・平 英彰 (2007) 「新大 1 号」「新大 5 号」におけるスギ雄性不稔性の発現過程と遺伝的特性. 日林誌 89: 26-30.