

(研究資料)

東京都における雄性不稔スギの育種研究 (2012～2015 年交配)
Breeding of Sugi (*Cryptomeria japonica*) with male-sterility in Tokyo since 2012

宮下千枝子*・畑 尚子・奈良雅代^a・中村健一

Chieko Miyashita, Shoko Hata, Masayo Nara, Kenichi Nakamura

東京都農林総合研究センター

^a 現 東京都大島支庁産業課

キーワード：スギ，花粉症，雄性不稔，交配育種

東京都農林総合研究センター研究報告 14: 41-47, 2019

*著者連絡先 E-Mail: c-miyashita@tdfaff.com

緒 言

スギ・ヒノキの花粉症患者が急増し、社会的問題となっている。その対策として、東京都は 2006 年から花粉症発生源対策事業を開始し、2015 年からは森林循環促進事業を実施して、スギ・ヒノキ林を伐採した後に花粉症対策品種を植栽することにより花粉飛散量の低減化を図っている。花粉症対策品種には、着花量の少ない少花粉スギ・ヒノキと、花粉を生産しない雄性不稔（無花粉）スギがある。少花粉スギは多摩地域の環境に適した品種がすでに開発され、花粉症発生源対策事業により普及が進んでいる。一方、雄性不稔スギは、2007 年時点ではまだ研究段階にあったが、将来的に花粉飛散量を減少させる効果

の高い品種の一つとして有用と考えられた。そこで、東京都農林総合研究センターでは、多摩地域に適する雄性不稔スギの開発を目的として、2007 年に交配育種を開始した（宮下ら、2014）。雄性不稔スギの育種法としては、不稔遺伝子 (*ms-1*) をホモ型 *aa* で持つ不稔個体と各地域の不稔遺伝子を持たないホモ型 *AA* の精英樹を交配し、ヘテロ型 *Aa* の F_1 からさらに F_2 世代を展開して不稔個体を選抜する方法を用いた（図 1）。雄性不稔の育種素材には、富山県の不稔個体（Taira et al, 1999）に加えて、不稔遺伝子をヘテロ型で保有する関東育種基本区の精英樹（以下、関東精英樹）2 品種（斎藤、2008）を用いた（表 1）。そして F_2 集団を作出し、ジベレリン処理で若い実生苗に強制着花させて花粉の有無を判定する方法（本間ら、2006）により、不稔個体を早期選抜した。

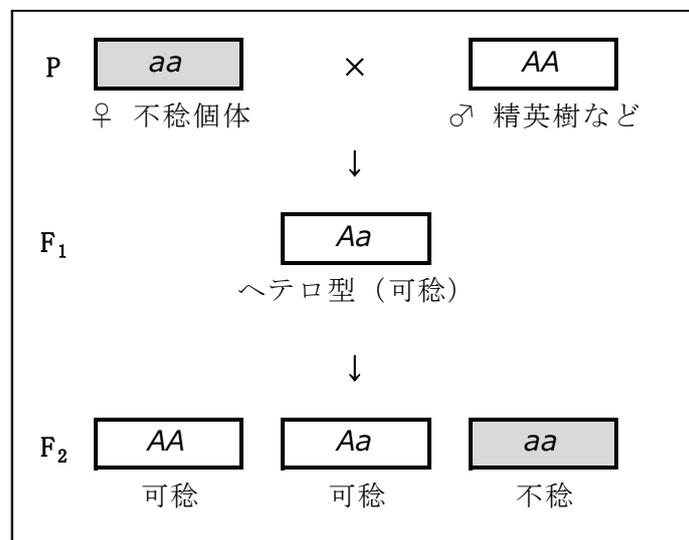


図 1 スギの雄性不稔性の遺伝様式

雄性不稔性の遺伝子 (*ms-1*) を *a*、可稔性の遺伝子を *A* で示す。*aa* の個体は不稔となり、*AA* およびヘテロ型の *Aa* は可稔となる。

表 1 育種素材に用いた雄性不稔個体および都県精英樹

種類	遺伝子型 ^a	都県	品種・個体名	少花粉 ^b	
非精英樹	雄性不稔	富山	富MS212 ^c		
			富219 ^c		
			富308MS ^c		
精英樹	正常 (ヘテロ)	静岡	大井7号		
		神奈川	中4号	○	
		東京	西多摩8号 ^d		
	正常	AA	東京	西多摩1号	
				西多摩2号	○
				西多摩3号	○
				西多摩5号	
				西多摩6号	
				西多摩9号	
				西多摩13号	
				西多摩14号	○
				西多摩16号	
				西多摩17号	
				西多摩19号	
				西多摩20号	
西多摩21号					
西多摩22号					
西多摩24号					
南多摩2号					
南多摩3号					
南多摩5号					

a) 遺伝子座 *ms-1*。 b) 「中4号」は神奈川県が選抜した少花粉品種であり、それ以外は長野県が選抜した少花粉品種である。 c) 富山県での個体名は各々MS212, 219, 308MSであるが、本資料では区別性を高めるために各個体名の頭に「富」を付して表記する。 d) 交配に用いた当初はAA型と考えられていたが、後にAa型であることが判明した。

本育種研究により作出したヘテロ型および不稔個体をタイプ別に表2に示す。2007～2010年に実施した交配では(宮下ら, 2014), まず東京都精英樹と富山県の雄性不稔個体を交配してヘテロ型個体(AaIタイプ)を作出し、次いでAaI個体と関東のヘテロ型精英樹とを交配して不稔個体(aaIタイプ)を作出した。また、関東のヘテロ型精英樹2品種を正逆交配し、不稔個体(aaIVタイプ)を作出した。aaI個体については、2013年3月に農林総合研究センター日の出試験林内に植栽され、成長や材質の優れた個体の選抜が進められている。選抜された個体は、将来的に雄性不稔採種園の母樹としての利用が期待される。このaaIタイプについて、ゲノムに占める東京都精英樹由来の遺伝子の割合(以下、ゲノム構成率)の理論値をみると、25%に留まる。関東精英樹では75%と高いものの、100%には達しない。これは、富山県の不稔個体を育種素材に用いたためである。多摩地域への適応性や

材質の優れた個体を作出するためには、東京都および関東精英樹のゲノム構成率を高めていくことが望ましい。また、採種園を造成するためには、花粉樹となる優れたヘテロ型個体が必要である。2010年までに作出したAaI個体をみると、東京都精英樹のゲノム構成率は50%と比較的高いものの、関東を含めても精英樹の割合は50%に留まる。

そこで、東京都および関東精英樹のゲノム構成率をより高めたヘテロ型および不稔個体を作出するため、2012～2015年に新たな交配を行った。まず、aaIVタイプの不稔個体と東京都精英樹を交配してAaIIタイプのヘテロ型個体を作出した。これはゲノム構成率が東京都50%、関東100%と高い。次いで、AaI×AaIIおよびAaII×AaIIの交配を行い、各々aaII, aaIIIタイプの不稔個体を作出した。これらはどちらもゲノム構成率が東京都50%、関東75%以上と高いことから、2010年までに作出した個体

よりも材質や適応性等が向上している可能性がある。
本研究は実用品種開発の途上にあるが、スギ育種は長期を要するので、今後の育種および遺伝資源管理を円

滑に進めるために、2012～2015年の交配個体の作出・選抜の記録を資料としてまとめた。

表2 作出したヘテロ型および雄性不稔個体とその種類

タイプ ^a	交配組合せ ^b (♀×♂)	ゲノム構成率 (理論値) ^c			交配年	日の出試験林 植栽 ^d	
		東京 (%)	関東 (%)	有望度		系統数	年
ヘテロ型 (Aa)							
Aa I	富山×東京	50	50	○	2007～2009	-	-
Aa II	aaIV×東京	50	100	◎	2012, 2014	14	2017
雄性不稔 (aa)							
aa I	Aa I × 静岡 Aa I × 神奈川	25	75	○	2010	22	2013
aa II	Aa I × Aa II	50	75	◎	2015	6	2018
aa III	Aa II × Aa II	50	100	◎	2015	1	2018
aa IV	静岡×神奈川 神奈川×静岡	0	100	○	2008	-	-

a) 本資料では、交配組合せ別にヘテロ型を2タイプ、雄性不稔を4タイプに分けて示した。b) 各品種・個体名は省略し、各々の都県名で示した(表1参照)。c) 東京都精英樹(東京)および関東育種基本区の精英樹(関東)に由来する遺伝子のゲノム構成率について、交配組合せから期待される理論値を示した。各タイプの有望度は、東京および関東のゲノム構成率の高さをともに、非常に有望(◎)、有望(○)と評価した。d) 有望系統・個体の選抜を行うため、試験林に植栽した。ただし、AaI・aaIVタイプは育種素材としての利用に限定されるため植栽なし。

1. 育種素材

雄性不稔個体として、富山県の「富 MS212, 富 219, 富 308MS」の3個体を用いた(表1)。これらの個体は劣性の不稔遺伝子をホモ型(aa)で有する。なお、これらの個体については、記録上区別しやすいように個体名の頭に「富」を付して表記する。また精英樹として、静岡県の「大井7号」、神奈川県「中4号」、東京都「西多摩1号」など19品種を供試した。「大井7号」、「中4号」および「西多摩8号」は、不稔遺伝子をヘテロ型(Aa)で保有する。なお、「西多摩8号」は、交配当初はAA型と考えられていたが、後にヘテロ型であることが判明した(国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 林木育種センター 高橋誠氏私信)。また、精英樹のうち「中4号」など4品種は少花粉品種である。

2. ヘテロ型個体の作出

タイプ AaII のヘテロ型個体を作成するため、タイプ aaIV×東京都精英樹の交配を2012年と2014年に行った。

種子親には、関東のヘテロ型精英樹「大井7号, 中4号」を正逆交配して得られた「大・中, 中・大」系統の不稔44個体(aa)を、花粉親には少花粉3品種を含めた東京都精英樹21品種(AA)を用いた。計51組合せの交配を行い、38系統、約2500個体を得た。

適正な交配が行われたことを確認するため、2012年交配の12系統67個体および各々の両親を供試し、Tani et al. (2003, 2004) および Moriguchi et al. (2003) の開発したスギの simple sequence repeat (SSR) マーカー6種類(Cjgssr077, CS1226, CJS0333, CS1525, CS1522, CJS0201)を用いて親子関係の有無を鑑定した。その結果、いずれの個体も各遺伝子座で両親由来のアリルを1個ずつ有し、親子間で矛盾はみられなかったことから(データ省略)、正しく交配されていることが確認できた。したがって、作出されたヘテロ型個体(AaII)のゲノム構成率は、東京都精英樹が50%、関東精英樹が100%となる。

作出した個体の中から、交配組合せ、交配親の特性、苗の生育等をもとに総合的に判断して、有望な22系統

273 個体を選抜した (表 3)。このうち 14 系統 205 個体については、生育・材質等の特性評価のため、2017 年 3 月に日の出試験林に定植した。残りの系統・個体は、交配親および遺伝資源として立川圃場で維持することとし

た。なお、花粉親に用いた「西多摩 8 号」については、交配後にヘテロ型であることが判明した。その後代である 1205 系統の個体はヘテロ型 (Aa) と不稔 (aa) に分離するため、稔性調査による確認が必要である。

表 3 東京都精英樹由来のヘテロ型個体 (タイプ $AaII$; 2012・2014 年交配)

交配年	交配組合せ			系統名	個体数 ^b	個体数内訳	
	♀ (aa) ^a		♂ (AA)			日の出 ^c	立川 ^d
	(交配組合せ)	個体番号					
2012	(大井 7 号 × 中 4 号)	大・中-31	× 西多摩 1 号	1201	4		4
		大・中-28	× 西多摩 3 号	1222	6		6
		大・中-49	× 西多摩 5 号	1202	7		7
		大・中-53	× 西多摩 6 号	1203	6		6
		大・中-77	× 西多摩 8 号	1205	2		2
		大・中-25	× 西多摩 17 号	1208	2		2
		大・中-42	× 西多摩 19 号	1209	1		1
		大・中-70	× 西多摩 20 号	1210	1		1
2014	(大井 7 号 × 中 4 号)	大・中-160	× 西多摩 2 号	1401	18	15	3
		大・中-91	× 西多摩 3 号	1402	18	15	3
		大・中-149	× 西多摩 3 号	1403	18	15	3
		大・中-93	× 西多摩 5 号	1405	18	15	3
		大・中-95	× 西多摩 5 号	1406	18	15	3
		大・中-135	× 西多摩 13 号	1416	18	15	3
		大・中-103	× 西多摩 14 号	1418	10	10	
		大・中-128	× 西多摩 16 号	1420	18	15	3
		大・中-57	× 西多摩 22 号	1423	18	15	3
		大・中-112	× 西多摩 24 号	1426	18	15	3
		大・中-106	× 南多摩 2 号	1429	18	15	3
大・中-120	× 南多摩 3 号	1430	18	15	3		
大・中-126	× 南多摩 5 号	1431	18	15	3		
	(中 4 号 × 大井 7 号)	中・大-5	× 西多摩 9 号	1413	18	15	3
合計					273	205	68

a) 「大・中」および「中・大」系統の個体は、ヘテロ型精英樹「大井 7 号、中 4 号」を交配して得られた不稔個体。

b) 2018 年 4 月時点での維持個体数。 c) 2017 年 3 月に農林総合研究センター日の出試験林内に植栽。 d) 農林総合研究センター立川圃場内で維持。

3. 雄性不稔個体 ($aaII$ ・ $aaIII$) の作出

タイプ $aaII$ ・ $aaIII$ の不稔個体を作成するため、2015 年にヘテロ型個体 (Aa) 間で交配を行った。交配親には、3 年生のヘテロ型 (タイプ $AaII$) 29 個体、および、8 年生のヘテロ型 (タイプ AaI) 21 個体を供試した。計 41 組合せの交配を行った結果、24 系統が得られた。このうち健全に生育した 15 系統 650 個体について、2018 年 2 月に花粉の有無を調査し、稔性を判定した。その結果、

13 系統 190 株の不稔個体が得られた (表 4)。このうちの 7 系統 117 個体を、2018 年 3 月に日の出試験林に定植した。なお、作出された不稔個体 ($aaII$ ・ $aaIII$) のゲノム構成率は、東京都精英樹が 50%、関東精英樹が 75~100% である。

表4 東京都精英樹由来の雄性不稔個体 (タイプaaII・aaIII; 2015年交配)

タイプ	交配組合せ ^a		♂ (Aa)	系統名	個体数 ^b	個体数内訳		
	♀ (Aa)	個体番号				日の出 ^c	立川 ^d	
aa II	(大・中-70×西多摩20号)	×	72 (富MS212×西多摩21号)	1518	2	2	2	
	(富MS212×西多摩21号)	×	1222-3 (大・中-28×西多摩3号)	1527	18	18	18	
	(富MS212×西多摩21号)	×	1222-5 (大・中-28×西多摩3号)	1528	4	4	4	
	(富MS212×西多摩21号)	×	1201-4 (大・中-31×西多摩1号)	1530	12	12	12	
	(富MS212×西多摩21号)	×	1202-2 (大・中-49×西多摩5号)	1531	18	18	18	
	(富308MS×西多摩24号)	×	1203-8 (大・中-53×西多摩6号)	1534	12	12	12	
	(富308MS×南多摩5号)	×	1202-8 (大・中-49×西多摩5号)	1538	3	3	3	
	(富308MS×南多摩5号)	×	1203-6 (大・中-53×西多摩6号)	1539	65	24	41	
	(富308MS×南多摩5号)	×	1208-1 (大・中-25×西多摩17号)	1541	38	24	14	
	(大・中-49×西多摩5号)	×	1222-3 (大・中-28×西多摩3号)	1505	1	1	1	
aa III	(大・中-25×西多摩17号)	×	1209-1 (大・中-42×西多摩19号)	1516	4	4	4	
	(大・中-28×西多摩3号)	×	1208-2 (大・中-25×西多摩17号)	1520	10	9	1	
	(大・中-28×西多摩3号)	×	1205-1 (大・中-77×西多摩8号)	1522	3	3	3	
合計						190	117	73

a) 個体番号72~143は2007年交配, 1200-0は2012年交配により作出したヘテロ型個体。b) 作出した個体のうち, 花粉の有無の調査により不稔と判定された個体。2018年4月時点での維持個体数。c) 2018年3月に農林総合研究センター日の出試験林内に植栽。d) 農林総合研究センター立川圃場内で維持。

謝 辞

本研究の実施にあたり、神奈川県、静岡県、富山県ならびに国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 林木育種センターの皆様にご指導、ご協力をいただきました。厚く御礼を申し上げます。また、本研究を進めるにあたり、栽培管理面でご協力を頂いた当所の園芸技術科、緑化森林科の職員各位に深く御礼を申し上げます。

引用文献

- 本間莉恵・吉井エリ・平 英彰 (2006) スギ雄性不稔の検定期間の短縮. 日本森林学会誌 88: 30-32.
- 宮下千枝子・澁澤直恵・西澤敦彦・中村健一・奈良雅代 (2014) 東京都における雄性不稔スギの育種研究 (2007~2010 年交配). 東京農総研研報 9 : 23-30.
- Moriguchi, Y., H. Iwata, T. Ujino-Ihara, K. Yoshimura, H. Taira and Y. Tsumura (2003) Development and characterization of microsatellite markers for *Cryptomeria japonica* D. Don. Theoretical and Applied Genetics. 106: 751-758.
- 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.
- Taira, H., M. Saito, and Y. Furuta (1999) Inheritance of the trait of male sterility in *Cryptomeria japonica*. Journal of Forest Research. 4: 271-273.
- Tani, N., T. Takahashi, H. Iwata, Y. Mukai, T. Ujino-Ihara, A. Matsumoto, K. Yoshimura, H. Yoshimaru, M. Murai, K. Nagasaka and Y. Tsumura (2003) A consensus linkage map for sugi (*Cryptomeria japonica*) from two pedigrees, based on microsatellites and expressed sequence tags. Genetics. 165: 1551-1568.
- Tani, N., T. Takahashi, T. Ujino-Ihara, H. Iwata, K. Yoshimura and Y. Tsumura (2004) Development and characteristics of microsatellite markers for sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) derived from microsatellite-enriched libraries. Annals of Forest Science. 61: 569-575.