

# 複数の雄性不稔アレルを保有する無花粉スギF<sub>1</sub>個体の検定交配による選抜 (I)

伊藤由紀子<sup>1</sup>・平山聡子<sup>2</sup>・岩井淳治<sup>3</sup>

**要旨:** 当所で保有している、無花粉スギと新潟県育種素材を交配して作出したF<sub>1</sub>個体から、2つの遺伝子座において雄性不稔アレルをヘテロ接合体として保有する個体 (ダブルヘテロ個体) を選抜することを目的に、検定交配および不可稔判定調査を行った。調査の結果、S3-88 (2), S3-49 (3), S1-29 (1), T-49 (1), T-49 (2) の5個体がダブルヘテロ個体と判定された。また、S5-82 (1), S3-114 (2), S3-88 (1), T-117 (2), T-88 (1) の5個体は調査を行った実生苗が少数であったため、継続調査が必要と判断された。MS2遺伝子座を調査対象としたT-126 (1) とT-126 (2) の後代では、判定不明個体の割合が高く、本遺伝子座における雄性不稔個体の判別の難しさが再確認された。

**キーワード:** スギ, 雄性不稔アレル, ダブルヘテロ, 検定交配, 不可稔判定

## I. はじめに

スギ花粉症は長年にわたり国民的な社会問題となっている。政府は、スギ花粉症の林業面からの対策として、令和5年10月に花粉症対策初期集中対応パッケージを取りまとめた (林野庁2025)。パッケージに挙げられている対策として、スギ人工林の伐採・植替え等を加速化し、無花粉品種などの花粉の少ない苗木の生産拡大が求められている。

無花粉スギの雄性不稔形質は、単一の遺伝子 (雄性不稔遺伝子) によって支配され、変異型対立遺伝子 (雄性不稔アレル) がホモ接合となった場合に発現する潜性形質であることが明らかになっている (Taira et al. 1999)。現在までに5種類の雄性不稔遺伝子が発見されており (Taira et al. 1999; 吉井・平 2007; 宮嶋ら 2010; 斎藤 2010; 平山ら 2021; Tsurisaki et al. 2023)、発見された順にMS1からMS5と命名されている。各遺伝子座における雄性不稔アレルはそれぞれms1からms5と表記される。なお、従来の表記では、これらの遺伝子座を発見順にAからEのアルファベットで表し、各遺伝子型を対応する大文字 (顕性アレル) および小文字 (潜性アレル) の組合せ (例: AA・Aa・aa) で表記してきた。したがって、MS1遺伝子座に起因する無花粉スギの遺伝子型はms1/ms1 (aa)、MS2遺伝子座に起因する無花粉スギの遺伝子型はms2/ms2 (bb) と表記する (林木遺

伝子標記委員会 2016)。本報告では以後、個体名に付すアルファベット表記は、雄性不稔遺伝子の遺伝子記号に基づく遺伝子型を示すものとする。

無花粉スギ品種の開発では、人工林や精英樹等の育種素材から選抜された無花粉スギや雄性不稔アレルをヘテロ接合体で保有する個体などを第一世代にして品種改良が行われる。

新潟県では、従来から無花粉スギの品種開発を進めており、富山不稔1号 (aa) や新大不稔1号 (bb) を母樹として作出したさし木100クローン品種 (樋口ら 2009) や、富山不稔1号 (aa) と新大不稔3号 (aa) を母樹として作出したさし木40クローン品種 (岩井 2024) などの開発を行ってきた。さらに、無花粉スギの品種開発だけではなく、新潟県が保有する育種素材の中から雄性不稔アレルを持つ個体の選抜にも取り組んでいる。平山ら (2021) はMS2～MS4座において雄性不稔アレルをヘテロ接合体で保有する個体 (以下、ヘテロ個体) を検定交配により選抜し、Moriguchi et al. (2020) はMS1座におけるヘテロ個体のDNAマーカー選抜を行った。

平山ら (2021) は、これらヘテロ個体を利用した無花粉スギの種子生産などを提案している。無花粉スギの種子を生産するには、雄性不稔アレルをホモ接合体で保有する個体 (以下、ホモ個体) の無花粉スギを母樹に、母樹と同じ雄性不稔遺伝子座のヘテロ個体を花粉親にして人工交配を行う必要があり、理論上は無花粉スギ出現

<sup>1</sup>新潟県森林研究所 〒958-0264 新潟県村上市鵜渡路2249-5

<sup>2</sup>新潟県農林水産部林政課 〒950-8570 新潟市中央区新光町4-1

<sup>3</sup>新潟県農林水産部治山課 〒950-8570 新潟市中央区新光町4-1  
(2026年2月16日受付, 2026年3月2日受理)

確率が50%になる (Taira et al. 1999)。さらに, Moriguchi et al. (2017) が提案しているように, 異なる2種類の雄性不稔遺伝子座において, それぞれ雄性不稔アレルをホモ接合体で保有する個体 (以下, ダブルホモ個体) を母樹に, 母樹と同じ2つの雄性不稔遺伝子座においてヘテロ接合体となる個体 (以下, ダブルヘテロ個体) を花粉親にして人工交配を行うと理論上, 無花粉スギ出現確率を75%まで増やすことができるため, より効率的な無花粉スギの種子生産および実生苗の普及が可能となる。

当所では, 無花粉スギ原種 (新大不稔系, 富山不稔系, 福島不稔系) や新潟県の育種素材である精英樹, スギカミキリ抵抗性品種, 雪害抵抗性品種, 佐渡天然品種を保有している。さらに無花粉スギ原種を母樹に, 新潟県の育種素材を花粉親にして人工交配を行い作出した複数の次世代個体を所内の苗畑に定植し, 無花粉スギF<sub>1</sub>個体として管理している。本研究では, 当所で保有する無花粉スギF<sub>1</sub>個体の検定交配および不可稔判定調査を行い, ダブルヘテロ個体を選抜した結果を報告する。

## II. 材料と方法

### 1. ダブルヘテロ候補個体と研究対象遺伝子座

当所が保有する育種素材の中で五泉市1号 (Bb), 東蒲原7号 (Ee), カミキリ15号 (Cc), カミキリ58号 (Dd), 佐渡天然102号 (Cc), 佐渡天然119号 (Cc) の6個体がヘテロ個体であると判明したため (平山ら 2021), これらを花粉親にして作出した無花粉スギF<sub>1</sub>個体がダブルヘテロ個体の可能性がある。本研究の調査対象 (ダブルヘテロ候補個体) となるのは表-1に示した34個体 (新大不稔1号F<sub>1</sub>から5個体, 新大不稔3号F<sub>1</sub>から11個体, 新大不稔5号F<sub>1</sub>から3個体, 富山不稔1号F<sub>1</sub>から12個体, 福島不稔3号F<sub>1</sub>から3個体) である。無花粉スギF<sub>1</sub>個体の中には, 同じ両親から作出されたきょうだい個体が存在するため, これらを区別するために個体名の末尾に (1), (2), (3) などを付して区別をした。

34個体のダブルヘテロ候補個体 (無花粉スギF<sub>1</sub>個体) の母樹のうち, 新大不稔3号 (aaEe) はMS1遺伝子座に起因する無花粉スギであるが (斎藤 2010), MS5遺伝子座において雄性不稔アレルをヘテロ接合体で保有する (平山ら 2021; Tsurisaki et al. 2023)。さらに, 福島不稔3号 (Aabb) は, MS2遺伝子座に起因する無花粉スギであるが, MS1遺伝子座において雄性不稔アレルをヘ

テロ接合体で保有する (Kobayashi et al. 2026)。このように, 2つの遺伝子座において雄性不稔アレルをそれぞれホモ接合とヘテロ接合体で保有する原種個体を, 本稿では「原種ホモヘテロ個体」と称する。このような原種ホモヘテロ個体のF<sub>1</sub>では, ホモ接合体の遺伝子座の雄性不稔アレルは必ず後代に受け継がれるが, ヘテロ接合体の遺伝子座の雄性不稔アレルが後代に受け継がれる確率は50%である。原種ホモヘテロ個体のヘテロ接合体 (新大不稔3号ではMS5座, 福島不稔3号ではMS1座) における分離に関しても, 本来は検定交配による調査が必要であるが, 本研究では実施しなかった。

また, 新大不稔3号 (aaEe) と東蒲原7号 (Ee) は, どちらもMS5遺伝子座において雄性不稔アレルをヘテロ接合体で保有している。そのため, これらを両親とするS3-114 (1) とS3-114 (2) については, MS5遺伝子座がホモ個体 (Aaee) となる可能性もあったが, 事前に花粉飛散を確認していることから, その可能性は除外した (表-1: No.30,31)。

表-1. 調査対象の無花粉スギF<sub>1</sub>個体

No.	個体名	調査対象の無花粉スギF <sub>1</sub> 個体 <sup>注1</sup>		調査する遺伝子型 <sup>注2</sup>
		母樹	× 花粉親	
1	S5-82 (1)	新大不稔5号 (cc)	× 東蒲原7号 (Ee)	<u>CcEE</u> / <u>CcEe</u>
2	S5-82 (2)			
3	S5-82 (3)			
4	S3-19 (1)	新大不稔3号 (aaEe)	× 佐渡天然119号 (Cc)	<u>AaCC</u> / <u>AaCc</u>
5	S3-19 (2)			
6	S3-19 (3)			
7	S3-88 (1)	新大不稔3号 (aaEe)	× カミキリ58号 (Dd)	<u>AaDD</u> / <u>AaDd</u>
8	S3-88 (2)			
9	S3-88 (3)			
10	S3-49 (1)	新大不稔3号 (aaEe)	× カミキリ15号 (Cc)	<u>AaCC</u> / <u>AaCc</u>
11	S3-49 (2)			
12	S3-49 (3)			
13	S1-16 (1)	新大不稔1号 (bb)	× カミキリ58号 (Dd)	<u>BbDD</u> / <u>BbDd</u>
14	S1-16 (2)			
15	S1-16 (3)			
16	S1-29 (1)	新大不稔1号 (bb)	× 東蒲原7号 (Ee)	<u>BbEE</u> / <u>BbEe</u>
17	S1-29 (2)			
18	T-126 (1)	富山不稔1号 (aa)	× 五泉市1号 (Bb)	<u>AaBB</u> / <u>AaBb</u>
19	T-126 (2)			
20	T-19 (1)	富山不稔1号 (aa)	× 佐渡天然119号 (Cc)	<u>AaCC</u> / <u>AaCc</u>
21	T-19 (2)			
22	T-19 (3)			
23	T-49 (1)	富山不稔1号 (aa)	× カミキリ15号 (Cc)	<u>AaCC</u> / <u>AaCc</u>
24	T-49 (2)			
25	T-49 (3)			
26	T-117 (1)	富山不稔1号 (aa)	× 東蒲原7号 (Ee)	<u>AaEE</u> / <u>AaEe</u>
27	T-117 (2)			
28	T-117 (3)			
29	T-88 (1)	富山不稔1号 (aa)	× カミキリ58号 (Dd)	<u>AaDD</u> / <u>AaDd</u>
30	S3-114 (1)	新大不稔3号 (aaEe)	× 東蒲原7号 (Ee)	<u>AaEE</u> / <u>AaEe</u>
31	S3-114 (2)			
32	F3-46 (1)	福島不稔3号 (Aabb)	× 東蒲原7号 (Ee)	<u>BbEE</u> / <u>BbEe</u>
33	F3-46 (2)			
34	F3-46 (3)			

注1: 新潟県では, 長らくカミキリ抵抗性個体を「候補カミキリ新潟X号 (候カ新潟X号)」と表記していたが, 近年は「カミキリX号」に統一された。

注2: 本研究で対象とした遺伝子座について, 検定交配により分離が想定されるF<sub>1</sub>個体の遺伝子型パターンをラッシュで区切って示した。下線部はダブルヘテロ個体であった場合に想定される遺伝子型である。

表-2. 検定交配の組合せおよび実施年月、播種年月ならびに不可稔判定年次

No.	検定交配組合せ 注1		検定交配 年 月	播種 注2 年 月	不可稔判定 注3							
	母樹	× 花粉親			2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
1	S5-82(1)	× 東蒲原7号(Ee)	2018 3~4	2018 12		○	○	○				
2	S5-82(2)	× 東蒲原7号(Ee)	2018 "	2018 12		○	○	○	○			
3	S5-82(3)	× 東蒲原7号(Ee)	2018 "	2018 12		○	○	○	○			
4	新大不稔5号(cc)	× S3-19(1)	2018 "	2018 12		○	○	○	○			
5	新大不稔5号(cc)	× S3-19(2)	2018 "	2018 12		○	○	○	○			
6	新大不稔5号(cc)	× S3-19(3)	2018 "	2018 12		○	○	○	○			
7	新大不稔8号(dd)	× S3-88(1)	2017 "	2018 5		○	○	○				
8	新大不稔8号(dd)	× S3-88(2)	2023 "	2024 5								○
9	新大不稔8号(dd)	× S3-88(3)	2017 "	2018 5		○	○	○	○			
10	S3-49(1)	× カミキリ15(Cc)	2016 "	2017 4	○		○	○	○			
11	S3-49(2)	× カミキリ15(Cc)	2016 "	2017 4	○		○	○	○			
12	S3-49(3)	× カミキリ15(Cc)	2016 "	2017 4	○		○	○	○			
13	新大不稔8号(dd)	× S1-16(1)	2023 "	2024 1、5							○	○
14	新大不稔8号(dd)	× S1-16(2)	2016 "	2016 11	○		○	○	○			
15	新大不稔8号(dd)	× S1-16(3)	2016 "	2016 11	○		○	○	○	○		
16	新大不稔3号(Ee)	× S1-29(1)	2018 "	2020 2			○	○				
17	新大不稔3号(Ee)	× S1-29(2)	2018 "	2020 2			○	○	○			
18	新大不稔1号(bb)	× T-126(1)	2019 "	2021 2					○	○	○	○
19	新大不稔1号(bb)	× T-126(2)	2019 "	2021 2					○	○	○	○
20	新大不稔5号(cc)	× T-19(1)	2022 "	2023 5							○	○
21	新大不稔5号(cc)	× T-19(2)	2022 "	2023 1、5							○	○
22	新大不稔5号(cc)	× T-19(3)	2022 "	2023 1、5							○	○
23	新大不稔5号(cc)	× T-49(1)	2022 "	2023 1、5							○	○
24	新大不稔5号(cc)	× T-49(2)	2022 "	2023 1、5							○	○
25	新大不稔5号(cc)	× T-49(3)	2022 "	2023 1、5							○	○
26	T-117(1)	× 東蒲原7号(Ee)	2022 "	2023 1							○	○
27	T-117(2)	× 東蒲原7号(Ee)	2022 "	2023 1							○	○
28	T-117(3)	× 東蒲原7号(Ee)	2022 "	2023 1							○	○
29	新大不稔8号(dd)	× T-88(1)	2022 "	2023 5							○	○
30	S3-114(1)	× 東蒲原7号(Ee)	2022 "	2023 1							○	○
31	S3-114(2)	× 東蒲原7号(Ee)	2022 "	2023 1							○	○
32	F3-46(1)	× 東蒲原7号(Ee)	2023 "	2024 5								○
33	F3-46(2)	× 東蒲原7号(Ee)	2023 "	2024 5								○
34	F3-46(3)	× 東蒲原7号(Ee)	2023 "	2024 5								○

注1：下線部は調査対象とした無花粉スギF<sub>1</sub>個体を示す。なお、交配相手となる個体の遺伝子型は括弧内に示した。

注2：発芽率が低い等の理由から、複数回の播種を行った組み合わせが存在する。

注3：丸印の年に不可稔判定を実施した。

2. 検定交配の組み合わせ

ダブルヘテロ候補個体を対象とした検定交配組み合わせを表-2にまとめた。検定交配で作出した後代実生苗の雄花が有花粉(可稔)か無花粉(不稔)かを判定する調査(以下、不可稔判定調査)により不可稔の判別ができた実生苗は合計1,596本であった。使用する母樹と花粉親の組み合わせにより、期待される不稔個体の出現確率は50%あるいは25%となっている。検定交配の模式図を図-1に示した。この図は、S1-16(1)(表-2:No.13)の雄性不稔遺伝子座における遺伝子型の判定方法を示したものである。S1-16(1)は遺伝子型がBbDDまたはBbDdであるため、MS4遺伝子座がホモ接合体である新大不稔8号(dd)との人工交配で得られた実生苗の不可稔判定を行い、不稔個体と可稔個体の分離比に基づいてS1-16(1)がダブルヘテロ個体であるか否かを判定した。

また、各組み合わせの検定交配、作出した種子の播種、不可稔判定調査の時期を表-2に示した。検定交配実施の

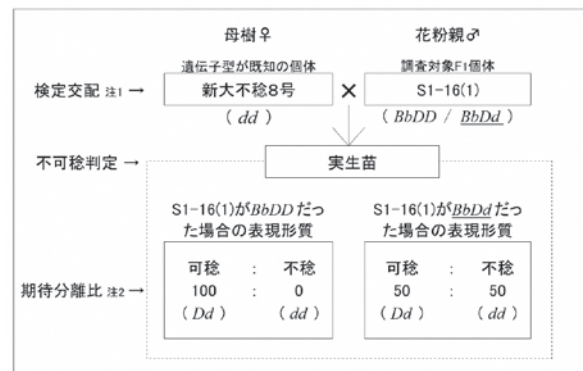


図-1. 検定交配の模式図

(例：S1-16(1)が調査対象個体、MS4座が調査対象遺伝子座の場合)

注1: 調査対象のF<sub>1</sub>個体が母樹になる交配組み合わせも存在する。

注2: 調査対象の遺伝子座におけるヘテロ接合体同士の交配では、可稔：不稔の期待分離比は75:25となる。

前年6～8月に、濃度100 ppmのジベレリン ( $GA_3$ ) 水溶液を葉面散布し (以下、ジベレリン処理とする) 花芽形成を誘導して交配を行った。交配により作出した種子は播種してから2～3年育苗を行い、不可稔判定調査の前年7月にジベレリン処理を実施した。なお、新大不稔8号とS3-88 (1) の検定交配は2017年に実施したが (表-2: No.7), 検定に供試できる実生苗が少なかったため、2023年に改めて検定交配を行った。

### 3. 不可稔判定調査

不可稔判定調査は、平山ら (2021) に準じて半割した雄花を実体顕微鏡で観察する方法で行ったが、本研究では光学顕微鏡観察までは実施しなかった。調査年は表-2のとおりである。

花粉嚢内が花粉粒で満たされており、半割した雄花をピンセットで挟んで軽く圧力を加えると花粉粒がこぼれ出るものを「可稔」と区分した。花粉嚢に明らかな隙間があり、半割した雄花をピンセットで挟んで軽く圧力を加えても花粉粒がこぼれ出ないもの、花粉粒同士が癒着して圧迫によって花粉嚢ごと出てきてしまうものを「不稔」と区分した。着花せず観察ができなかったものは「雄花なし」とした。可稔と不稔の判断が明確にできなかったものは「不明」とした。ただし、顕微鏡観察において「不明」と判断された個体でも、春先に当該個体の雄花を軽く叩き、花粉の飛散を目視できたものについては「可稔」と区分した。観察した雄花数は1～5個程度 (着花状況などにより観察数は異なる) とした。

### 4. 解析方法

検定交配を行った実生苗のうち、「雄花なし」個体と「不明」個体を除き、「可稔」と「不稔」と判定された個体数を総数とした。それぞれの個体数 (観察値) と期待される分離比 (期待値) との間に有意差がないかを、ブラウザ上で作動するjs-STAR XR+ release 2.5.0jを用いてカイ二乗適合度検定により評価した (有意水準 $p>0.05$ )。

## Ⅲ. 結果と考察

### 1. 選抜されたダブルヘテロ個体

不可稔判定調査の結果は表-3のとおりである。本研究結果から選抜できたダブルヘテロ個体は、遺伝子型:  $AaDd$ がS3-88 (2) の1個体、遺伝子型:  $AaCc$ が3-49 (3), T-49 (1), T-49 (2) の3個体、遺伝子型:  $BbEe$ がS1-29 (1)

の1個体の計5個体である (表-3: No.8,12,16,23,24)。その他にも、期待分離比から有意な隔たりがなかった個体や不稔が検出された個体はあったが、調査苗数が少ない、不明率が高いなどの理由からこれらをダブルヘテロ個体と確定するには至らなかった。

### 2. 継続調査が必要な個体

(1) ダブルヘテロである可能性を排除できない個体

T-117 (2) とT-88 (1) は、期待分離比にそれぞれ適合したが、判定できた実生苗 (表-3の判定数) が10個体以下と少なかった。不稔個体を検出できたがそれぞれ1個体と2個体のみであったため、調査苗数を増やすか、今回不稔と判定された個体を定植して観察を継続する必要がある (表-3: No.27,29)。

S3-88 (1) は、2017年の交配で作出した実生苗の判定結果 (可稔: 不稔=4:4) と2023年の交配で作出した実生苗の判定結果 (可稔: 不稔=23:3) が異なった (表-3: No.7)。しかしながら、後者は不可稔判定が1回しかできていないことから不明率が19%と高い。仮に不明個体と雄花なし個体がすべて不稔であれば、可稔: 不稔=23:14 ( $p=0.09$ ) となり、期待分離比からの有意な隔たりはないと判断される。3個体ではあるが不稔個体が検出されていることも踏まえると、この個体もダブルヘテロ個体である可能性を排除できないと考えられる。

S5-82 (1) とS3-114 (2) は、不稔が1個体も検出されなかったが、可稔: 不稔の期待分離比=75: 25と不稔の発現割合が少なく、判定できた実生苗がそれぞれ9個体、12個体と少数であったため、本調査結果だけでは、ダブルヘテロ個体ではないと断定できないと考えられる (表-3: No.1,31)。

(2) 検定回数が少ない個体

F3-46 (1), F3-46 (3) の2個体は、S3-88 (1) と同様に、1回しか不可稔判定ができていないため、不明率が高い値となった (表-3: No.32,34)。不明に分類した個体は、本研究の観察では可稔に近い個体であったことから、ダブルヘテロ個体の可能性は低いと考えている。これらは追加調査により確定できると思われる。

(3) 表現形質が不明なMS2候補個体

Tsurisaki et al. (2023) は、MS2に起因する無花粉スギの花粉飛散期の雄花について、花粉嚢ごとに内部の花粉粒の癒着程度が異なり、癒着程度が著しい花粉嚢は収縮する一方で、癒着程度が低く花粉粒が残存する花粉嚢は収縮しないことを報告した。本研究においても、

表-3. 検定交配の分離比および不可稔判定結果の概要

No.	検定交配組合せ		期待分離比	実生苗		顕微鏡観察結果					適合度検定 p 値	
	母樹	× 花粉親		可稔	不稔	可稔	不稔	雄花 なし	不明	不明 率		
1	S5-82(1)	× 東蒲原7号	75 : 25	9	9	9	0	0	0	0%	0.075	
2	S5-82(2)	× 東蒲原7号	75 : 25	125	114	114	0	7	4	4%	0.000	
3	S5-82(3)	× 東蒲原7号	75 : 25	64	60	60	0	0	4	7%	0.000	
4	新大不稔5号	× S3-19(1)	50 : 50	63	62	62	0	1	0	0%	0.000	
5	新大不稔5号	× S3-19(2)	50 : 50	63	55	55	0	5	3	5%	0.000	
6	新大不稔5号	× S3-19(3)	50 : 50	32	30	30	0	1	1	3%	0.000	
7	新大不稔8号	× S3-88(1)	50 : 50	8	8	4	4	0	0	0%	0.637	
	新大不稔8号	× S3-88(1)	50 : 50	37	26	23	3	6	5	19%	0.000	
8	新大不稔8号	× <u>S3-88(2)</u>	50 : 50	43	40	20	20	0	3	8%	<b>0.563 ※</b>	
9	新大不稔8号	× S3-88(3)	50 : 50	56	55	55	0	0	1	2%	0.000	
10	S3-49(1)	× カミキリ15	75 : 25	89	88	88	0	1	0	0%	0.000	
11	S3-49(2)	× カミキリ15	75 : 25	91	90	90	0	1	0	0%	0.000	
12	<u>S3-49(3)</u>	× カミキリ15	75 : 25	105	104	75	29	1	0	0%	<b>0.281 ※</b>	
13	新大不稔8号	× S1-16(1)	50 : 50	48	44	44	0	0	4	9%	0.000	
14	新大不稔8号	× S1-16(2)	50 : 50	64	63	63	0	0	1	2%	0.000	
15	新大不稔8号	× S1-16(3)	50 : 50	64	58	58	0	5	1	2%	0.000	
16	新大不稔3号	× <u>S1-29(1)</u>	75 : 25	60	60	47	13	0	0	0%	<b>0.335 ※</b>	
17	新大不稔3号	× S1-29(2)	75 : 25	54	49	49	0	1	4	8%	0.000	
18	新大不稔1号	× T-126(1)	50 : 50	54	36	36	0	0	18	50%	0.000	
19	新大不稔1号	× T-126(2)	50 : 50	72	38	37	1	0	34	89%	0.000	
20	新大不稔5号	× T-19(1)	50 : 50	43	39	39	0	1	3	8%	0.000	
21	新大不稔5号	× T-19(2)	50 : 50	34	34	34	0	0	0	0%	0.000	
22	新大不稔5号	× T-19(3)	50 : 50	36	35	35	0	0	1	3%	0.000	
23	新大不稔5号	× <u>T-49(1)</u>	50 : 50	42	42	22	20	0	0	0%	<b>0.439 ※</b>	
24	新大不稔5号	× <u>T-49(2)</u>	50 : 50	31	31	14	17	0	0	0%	<b>0.360 ※</b>	
25	新大不稔5号	× T-49(3)	50 : 50	46	46	46	0	0	0	0%	0.000	
26	T-117(1)	× 東蒲原7号	75 : 25	48	46	46	0	0	2	4%	0.000	
27	T-117(2)	× 東蒲原7号	75 : 25	11	10	9	1	0	1	10%	0.244	
28	T-117(3)	× 東蒲原7号	75 : 25	48	42	42	0	0	6	14%	0.000	
29	新大不稔8号	× T-88(1)	50 : 50	11	8	6	2	0	3	38%	0.145	
30	S3-114(1)	× 東蒲原7号	75 : 25	21	19	19	0	0	2	11%	0.004	
31	S3-114(2)	× 東蒲原7号	75 : 25	13	12	12	0	0	1	8%	0.032	
32	F3-46(1)	× 東蒲原7号	75 : 25	79	61	61	0	6	12	20%	0.000	
33	F3-46(2)	× 東蒲原7号	75 : 25	50	38	38	0	8	4	11%	0.000	
34	F3-46(3)	× 東蒲原7号	75 : 25	64	44	44	0	10	10	23%	0.000	
				合計	1778	1596	1486	110	54	128	8%	

※および下線部は、調査対象個体がダブルヘテロ個体と判断されたものを示す。

MS2に起因するダブルヘテロ候補個体であるT-126 (1) とT-126 (2) は、可稔と不稔の判定が困難な個体が多く、顕著に不明率が高かった (表-3: No18,19)。具体的には、一粒の雄花の中で花粉が詰まっている花粉囊もある一方で粘性のある液体が詰まっている花粉囊もある個体 (写真-1)、雄花ごとに判定結果が変わる個体 (可稔判定の雄花と不稔判定の雄花が混在)、一見花粉粒が詰まっているもののピンセットで挟んで軽く圧力を加えても花粉粒がこぼれ出ないか粘性のある液体が出てくる個体などがあり、実体顕微鏡観察では不可稔判定が極めて難しかった。このことは、Tsurisaki et al. (2023) の報告と合致しており、本研究でもMS2の判別の難しさが再確認された。

### 3. 今後の展望

#### (1) ホモヘテロ個体の後代の継続調査

先述のとおり、原種ホモヘテロ個体 (新大不稔3号、福島不稔3号) のヘテロ接合座について今回は調査を行わなかった。これらのF1家系についてはダブルヘテロ個

体が存在する可能性が残っており、調査を継続したい。加えて、本研究でダブルヘテロと判定されたS3-88 (2) (AaDd) とS3-49 (3) (AaCc) の2個体は、新大不稔3号が母樹であることから、3つの遺伝子座すべてで雄性不稔アレルをヘテロ接合体として有する個体 (トリプルヘテロ個体: AaDdEeとAaCcEe) の可能性があるため、

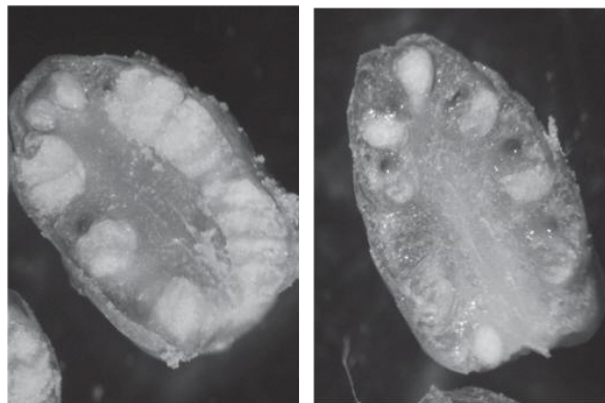


写真-1. 新大不稔1号とT-126 (2) の交配で得られた実生苗の不可稔判定例: (左) 可稔判定個体, (右) 不明判定個体

引き続き後代検定による調査を行いたい。

## (2) 選抜の手法

本研究の不可稔判定は2～3年生以上の十分に成長した苗木の雄花で行っているが(表-2), 1回の調査では判定できない個体もあり検定交配による選抜は非常に時間を要する。近年では, 雄性不稔アレルを持つ個体を選抜するDNAマーカーの開発も進んでおり, *MS1* 遺伝子座および*MS4* 遺伝子座における選抜マーカー (Hasegawa et al. 2020; Watanabe et al. 2024) も開発されている。マーカー未開発の遺伝子座については引き続き検定交配による選抜を行い, *MS1* 遺伝子座および*MS4* 遺伝子座についてはマーカー選抜技術を併用することで, 効率的に無花粉スギ育種素材の選抜や品種開発を進めていく必要があると考えられる。

## IV. おわりに

無花粉スギ実生品種の開発には, 雄性不稔アレルを保有する育種素材を十分に確保することが重要である。活用可能な育種素材に限られると, 交配親間の血縁度が高くなり, 実生苗への近交弱勢の影響が懸念される。また, 採種圃造成において生産される種子の遺伝的多様性を確保するためにも, 十分な数の育種素材が必要である。一方, 無花粉スギ実生苗の生産効率を向上させるためには, 複数の雄性不稔遺伝子座において雄性不稔アレルを保有する個体の利用が有効と考えられる。さらに, これらの雄性不稔アレルを保有する育種素材や開発品種については, 成長特性を把握するため, 検定林の造成および継続的な調査が必要である。

## V. 謝辞

本報告の作成にあたり, 新潟大学農学部の森口准教授には, ご多忙の中, 丁寧なご校閲と貴重なご助言を賜りました。ここに記して深く感謝申し上げます。

## 引用文献

Hasegawa Y, Ueno S, Wei FJ, Matsumoto A, Ujino-Ihara T, Moriguchi Y, Kasahara M, Fujino T, Shigenobu S, Yamaguchi K, Bino T, Hakamata T. 2020. Development of diagnostic PCR and LAMP

markers for *MALE STERILITY 1* (*MS1*) in *Cryptomeria japonica* D. Don. BMC Res Note. 13: 457.

樋口有未, 金子岳夫, 伊藤信治. 2009. 雄性不稔(無花粉)スギ品種の開発に関する試験 (I). 新潟森林研報. 50: 1-5.

平山聡子, 岩井淳治, 樋口有未, 金子岳夫, 森口喜成. 2021. *MALE STERILITY 1*とは異なる雄性不稔遺伝子を持つスギの選抜. 日林誌. 103: 161-167.

伊藤信治. 2004. スギカミキリ抵抗性品種の育成. 新潟県森林研報. 45: 1-5.

岩井淳治. 2024. 雄性不稔(無花粉)スギS3T家系の品種開発及び成長調査 (I) —選抜40個体さし木発根性及び3年生までの成長評価—. 新潟森林研報. 64: 14-35.

Kobayashi K, Watanabe M, Ueno S, Hasegawa Y, Hirayama S, Matsumura N, Tsurisaki E, Takeishi Y, Ito Y, Igarashi M, Moriguchi Y. 2026. Genetic characterization of the male-sterile Japanese cedar 'Fukushima-funen 3' reveals a naturally pyramided genotype and a novel *MS2* allele, and leads to the development of marker-assisted selection for the *MS2* locus. Trees, Forests and People. 24: 101203.

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, Totsuka S, Iwai J, Matsumoto A, Ueno S, Tsumura Y. 2017. Pyramiding of male-sterile genes in *Cryptomeria japonica* D. Don with the aid of closely linked markers. Tree Genet Genomes. 13: 61. Moriguchi Y, Ueno S, Hasegawa Y, Tadama T, Watanabe M, Saito R, Hirayama S, Iwai J, Konno Y. 2020. Marker-assisted selection of trees with *MALE STERILITY 1* in *Cryptomeria japonica* D. Don. Forests. 11: 734.

林木遺伝子記号標記法委員会. 2016. 林木の遺伝子記号の標準化の改訂. 森林遺伝育種. 5: 134-137.

林野庁. 2025. 令和7年版 森林・林業白書: 62-64.

斎藤真己. 2010. スギ花粉症対策品種の開発. 日林誌. 92: 316-323.

Taira H, Saito M, Furuta Y. 1999. Inheritance of the trait of male sterility in *Cryptomeria japonica*. J

For Res. 4: 271-273.

富山県農林水産総合技術センター森林研究所, (独法) 森林総合研究所. 2009. 無花粉 (雄性不稔) スギのデータベース; [2026.1.23 参照].

<http://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/mukahunsugi/mukahunsugi.pdf>.

Tsurisaki E, Nameta M, Shibata S, Hirayama S, Iwai J, Ohashi R, Otani M, Ito Y, Matsumura N, Moriguchi Y. 2023. Cytological analysis of male-sterile *MS5* Japanese Cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) and comparison with other male-sterile mutants. *J. Plant Biol.* 67: 11-23.

Masahiro Watanabe, Saneyoshi Ueno, Yoichi Hasegawa, Satoko Hirayama, Junji Iwai, Hiroyuki Kakui, Yoshinari Moriguchi. 2024. Development and application of a KASP marker for marker-assisted selection against the male-sterile gene *MALE STERILITY 4 (MS4)* in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) . *New Forests.* 55: 1349-1362.

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の発現過程と遺伝的特性. *日林誌.* 89: 26-30.