

【話 題】

関西育種基本区における抵抗性アカマツ次世代化の取組み

三浦 真弘^{*1}・岩泉 正和¹・磯田 圭哉²・玉城 聡³

はじめに

マツ材線虫病に起因するマツ林の集団的な枯損被害は、1905年頃に長崎県で確認され、現在では北海道を除く46都府県に被害が広がっている(東北林業試験研究機関連絡協議会森林保全部会2014)。被害材積も昭和54年度の243万m³をピークにその後減少しているが、現在でも年間50万m³近い被害があり(林野庁2016)、依然我が国における甚大な森林病虫害である。この被害に対し、マツ林への薬剤散布や枯損木の伐倒駆除といった対策に加え、育種的な対応として昭和53年度から西南日本地域を中心に「マツノザイセンチュウ抵抗性育種事業」が開始され(林野庁研究普及課1994)、この事業によりアカマツでは92の抵抗性品種が作出された(戸田・寺田2004)。マツノザイセンチュウ抵抗性育種事業を補完する形で、平成4年度からは「東北地方等マツノザイセンチュウ抵抗性育種事業」が開始され、これらの事業等により上記の品種を含め、平成28年3月時点でアカマツは全国で225の抵抗性品種が作出されている(林木育種センター2016)。現在これらの抵抗性品種を用いて設計された抵抗性採種園から抵抗性種子が生産されており、アカマツでは年間約41万本の抵抗性種苗が山行き苗として生産されている。

関西育種基本区では、他の育種基本区に比べてアカマツの造林が多い。このため、マツノザイセンチュウ抵抗性育種事業により、関西育種基本区のうち、近畿、瀬戸内、四国北部、四国南部の4育種区では、昭和60年度までに46の抵抗性アカマツ品種が開発された。また東北地方等マツノザイセンチュウ抵抗性育種事業により、日本海岸東部、日本海岸西部の育種区でも、平成15年から52の抵抗性アカマツ品種が現在までに開発されている。こうして開発された抵抗性アカマツ苗木を

用いて多くの抵抗性アカマツ林が造成されてきた。しかし林齢が進むに従い、抵抗性アカマツ林にも被害がみられることがわかってきた(磯田ら2010、杉本・富樫2011、亀井・吉岡2013)。要因として、植栽地の環境条件により、抵抗性マツの抵抗性能力が十分に発揮されていないことや、開発された抵抗性アカマツ品種により抵抗性の程度に幅がみられること(戸田2004)が考えられている。当初マツノザイセンチュウ抵抗性育種事業が行われた4育種区では、昭和60年度以降新たな抵抗性アカマツ品種が全く開発されていなかったが、このような状況を受け、より高い抵抗性を有するアカマツ個体の作出が望まれるようになり、平成15年度の関西地区林業試験研究機関連絡協議会(以下、関西林試協、という)育種部会において、抵抗性アカマツ品種同士の掛け合わせによる、抵抗性因子が集積された、より高い抵抗性を保有する次世代抵抗性アカマツの開発(以下、抵抗性アカマツ次世代化共同研究)が提案された。その後本研究は、林木育種センター関西育種場(以下、関西育種場という)を中心に関西育種基本区内の6県(和歌山県、岡山県、広島県、徳島県、香川県、愛媛県)の参加により平成17年度から開始し、12年の歳月をかけて平成28年度に我が国で初の第二世代抵抗性アカマツ品種が開発されるに至った。ここでは、本取り組みについて紹介する。

関西育種基本区における 抵抗性アカマツ次世代化

抵抗性アカマツ次世代化共同研究は、平成15年度の関西林試協の育種部会で岡山県から提案され、「マツノザイセンチュウ抵抗性育種事業」で西南日本地域から

* E-mail: miumasa@affrc.go.jp

1 みうらまさひろ、いわいずみまさかず、森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター関西育種場

2 いそだけいや、森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター

3 たまさとし、森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター東北育種場

選抜された92の抵抗性アカマツ品種の中から、抵抗性が上位のクローン同士を人工交配し、これまで以上の抵抗性を有する次世代品種を創出することを目的とした。本共同研究は、交配計画案の作成、参加機関の募集を経て、平成17年度から開始された。共同研究は表-1の計画で行い、人工交配、種子採取、一次検定、二次検定の順に進められた(図-1)。

人工交配、種子採取および播種

人工交配は平成18、19年の2年間にわたって参画している7機関で分担して行った(表-1)。具体的には、

既存の92の抵抗性アカマツ品種から、抵抗性ランク(戸田2004)が2~5の品種を交配親として用い、4×4のハーフダイヤレル交配、9セット54交配組合せ(機関あたり1または2交配セット、交配セットあたり6交配組合せ)の人工交配である(表-2)。

平成19~20年に、人工交配を行った9セット54交配組合せのうち52の交配組合せで人工交配種子が得られた。得られた種子は、合計201g、19,503粒、交配組合せあたり平均3.7g、361粒となった(表-3)。アカマツの種子は発芽率が高いため、得られた種子量は一次検定に十分な量と考えられた。一次検定のための交配

表-1 抵抗性アカマツ次世代化共同研究の年次計画

内容	年数 年度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28
交配組合せ決定		○											
着花(果)調査		○											
花粉採集		○	○	○									
人工交配			○	○									
採種				○	○								
播種						○	○						
一次検定						○	○	○	○				
線虫接種1回目							○	○					
線虫接種2回目								○	○				
二次検定										○	○		
育苗・管理										○	○	○	○
線虫接種・品種開発												○	○

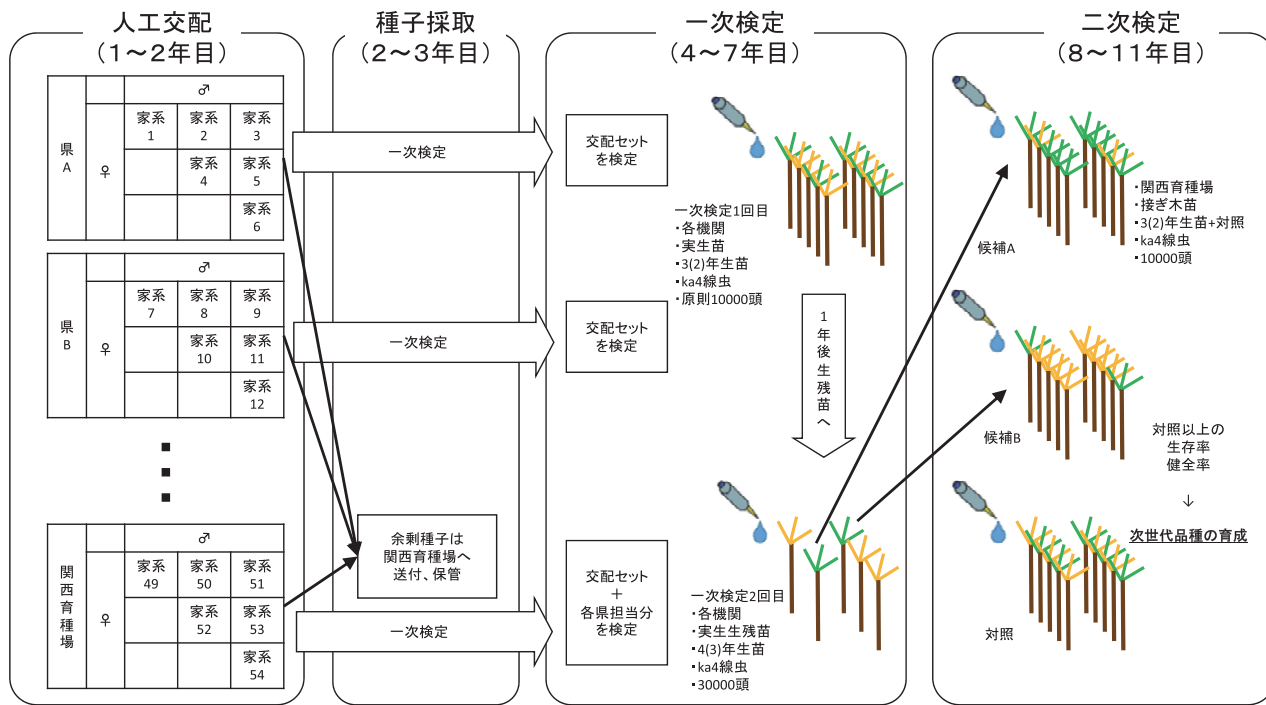


図-1 抵抗性アカマツ次世代化共同研究のフローチャート

表-2 各機関の交配セット一覧

担当機関	交配セット	♂																																						
		2	3	4	6	7	8	10	11	12	14	15	16	18	19	20	22	23	24	26	27	28	30	31	32	34	35	36												
和歌山	1	1	○	○	○																																			
		2		○	○																																			
		3			○																																			
岡山	2	5				○	○	○																																
		6					○	○																																
		7						○																																
	3	9							○	○	○																													
10									○	○																														
11										○																														
広島	4	13										○	○	○																										
		14											○	○																										
		15												○																										
徳島	5	17													○	○	○																							
		18														○	○																							
		19															○																							
香川	6	21																○	○	○																				
		22																	○	○																				
		23																		○																				
愛媛	7	25																			○	○	○																	
		26																				○	○																	
		27																					○																	
関西育種場	8	29																					○	○	○															
		30																						○	○															
		31																							○															
	9	33																											○	○	○									
		34																																			○	○		
35																																							○	

1～36：マツノザイセンチュウ抵抗性育種事業で開発された抵抗性アカマツ（品種名はここでは表記しない）。

表-3 各交配セットで実施した人工交配および採種種子

交配セット	セット1	セット2	セット3	セット4	セット5*	セット6	セット7	セット8	セット9	全セット	
交配組合せ数	6	6	6	6	4	6	6	6	6	52	
種子重量(g)	合計	15.1	16.9	8.5	54.2	6.1	5.9	10.0	27.0	57.2	201
	平均	2.5	2.8	1.4	9.0	1.0	1.0	1.7	4.5	9.5	3.7
種子粒数	合計	1440	1837	781	6121	531	518	1037	2100	5138	19503
	平均	240.0	306.2	130.2	1020.2	88.5	86.3	172.8	350.0	856.3	361

*セットでの人工交配はうまくいかなかったため、関西育種場が代わりに行った。

種子の播種は、平成21～22年と2年に分けて行われた。リスク分散のため、同一家系の種子は可能な限り交配担当機関および関西育種場の2箇所で行われた。

一次検定

一次検定は、平成22～24年にかけて、①接種検定は露地で行う、②線虫源にはKa-4系統を用いる、③対照系統として、交配親に使用した個体のオープン家系及び2～3の精英樹のオープン家系を供試するという形で実施した。接種検定には反復を設け、各交配組合せについては40本×2反復、対照系統は20本×2反復とし

た。一次検定1回目は苗齢2年生（播種翌年）または3年生苗に対して行い、マツノザイセンチュウKa-4系統を個体あたり10,000頭接種した（広島県のみ個体あたり5,000頭接種）。平成22年には広島県と関西育種場（検定場所は四国増殖保存園）、平成23年には和歌山県、岡山県、香川県、愛媛県及び関西育種場（検定場所は四国増殖保存園）で行った。一次検定1回目の生存率は、交配組合せ群、抵抗性オープン種子群、精英樹オープン種子群の3群に分けて比較すると、交配セット4を除く全ての交配セットで、交配組合せ群＞抵抗性オープン種子群＞精英樹オープン種子となった（表-4）。ま

表-4 各交配セットで実施した一次検定1回目および2回目の結果

機関	セット1		セット2		セット3		セット4		セット6		セット8		セット9	
	交配 組合せ	生存率	交配 組合せ	生存率	交配 組合せ	生存率	交配 組合せ	生存率	交配 組合せ	生存率	交配 組合せ	生存率	交配 組合せ	生存率
1回目	H23		H23		H23		H22		H23		H22		H22	
接種年	H23		H23		H23		H22		H23		H22		H22	
抵抗性 CP	6	0.93	6	1.00	5	0.95	6	0.34	6	0.68	5	0.34	5	0.26
抵抗性 OP	4	0.66	4	0.97	3	0.92	4	0.49	4	0.54	3	0.17	4	0.23
精英樹 OP	3	0.41	3	0.78	3	0.78	3	0.08	2	0.41	2	0.04	2	0.04
2回目	H24		H24		H24		H23		H24		H23		H24	
接種年	H24		H24		H24		H23		H24		H23		H24	
生存率	0.87		0.89		0.83		0.16		0.10		0.28		0.28	
健全率	0.84		0.39		0.49		0.16		0.08		0.25		0.27	
合格交配組合せ数	6		6		5		6		4		5		5	
合格個体数	215		79		57		43		17		100		97	
交配組合せあたり 合格個体数	35.8		13.2		11.4		7.2		4.3		20.0		19.4	

CP：人工交配種子家系、OP：オープン種子家系。

セット7の一次検定は、抵抗性 CP、抵抗性 OP、精英樹 OP のすべてが枯損したため、表から除外した。

各機関から関西育種場に送られた種子を用いて四国増殖保存園で平成23、24年に行った一次検定の結果は、ここでは表記しない。

た岩泉ら (2015) は、一般組合せ能力の効果が大きいことを明らかにした。これらのことは抵抗性の高い品種同士の人工交配により、既存の第一世代以上の抵抗性を有する品種の開発が可能であることを示唆している。

一次検定2回目では、一次検定1回目の生残個体に対し、翌年夏に再度 Ka-4 系統を個体あたり 30,000 頭接種した。交配セットにより生存率や健全率(生残苗のうち、針葉の変色がない健全個体の割合) が異なり、生存率、健全率とも 0.8 を超える交配セットもあったが、多くの交配セットでは生存率は 0.11 ~ 0.85、健全率は 0.10 ~ 0.34 となった。これらは交配セットの遺伝的能力に加え、接種検定を行った場所が各交配セットで異なり、気温や降水量、苗畑の管理等の環境条件が異なったことが原因と考えられる。

検定に供した 52 家系 (交配組合せ) のうち、44 家系で一次検定合格個体が得られ、交配組合せあたりの合格個体数は、各交配セットで平均 4.3 ~ 35.8 個体であった。交配組合せによっては合格個体数が多かったため、交配組合せあたり 3 ~ 5 個体を選び二次検定に供した。また、二次検定に供試しない合格個体は、将来的にさらなる品種開発が必要となった場合の備えとして保存しておくことが提唱され、関西育種場で行った一次検定合格木は、四国増殖保存園内に保存されている。

二次検定

二次検定は、対照木との比較により合格を判定するため、関西育種場および関西育種場四国増殖保存園で一括して行われた。二次検定は、①一次検定合格個体

の接ぎ木クローン苗を用いる、②接種検定は露地で行う、③接種源には Ka-4 を用いる、という形で実施した。接ぎ木増殖は平成 25、26 年に行われ、供試個体あたり 10 本以上 (可能な限り 20 本) 養苗した。対照系統として、先述の品種開発実施要領に記載されている抵抗性アカマツのうちの 5 品種のオープン実生後代を使用した。接種検定は反復を設け 10 本×2 反復とし、Ka-4 線虫を個体あたり 10,000 頭接種した。また今後の採種園への導入を考慮し、近交弱勢による種子生産量や生存率の低下を回避するために、同一交配組み合わせからの合格クローンは原則 2 クローンとした。平成 27 年度に、関西育種場四国増殖保存園で 15 交配組合せ 50 クローンに対し接種検定を行ったが、この時の検定では枯損率が極めて低かったため、評価を見合わせた。平成 28 年に上記クローンに対して、1 個体あたり Ka-4 線虫 30,000 頭の再接種を行い、健全率・生存率の高い 10 交配組合せから 10 クローンを選抜し、合格クローンとした (表-5)。平成 28 年度には、関西育種場でも 7 交配組合せ 13 クローンに対し接種検定を行い、7 交配組合せ 7 クローンを合格クローンとした (表-5)。これら 17 クローンは林木育種センターの平成 28 年度優良品種・技術評価委員会に申請し、評価基準を満たしていると評価され、新たな抵抗性品種となった (高橋 2017)。新たな抵抗性品種の品種名は、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 HP の「林木の新品種の開発と普及」からダウンロード可能である (<https://www.affpri.affrc.go.jp/ftbc/business/sinhijnnsyu/documents/h28shinhinsyu.pdf>)。

表-5 各交配セットの二次検定供試交配家系および個体数と品種開発数

	セット1	セット2	セット3	セット4	セット5	セット6	セット7	セット8	セット9	合計
供試家系 (H27)	5	2	3	2	2	1	—	—	—	15
供試個体数 (H27)	11	10	9	9	8	3	—	—	—	50
品種開発数 (H29.3 現在)	1	2	2	2	2	1	—	—	—	10
供試家系 (H28)	5*	4	3	6*	—	1	—	1*	1*	24
供試個体数 (H28)	19*	9	4	18*	—	1	—	5*	5*	75
品種開発数 (H29.3 現在)	—	4	3	—	—	—	—	—	—	—
品種開発数計 (H29.3 現在)	1	6	5	2	2	1	—	—	—	17

* セット1,2,4,6,8,9のH28の供試家系は平成29年度以降品種開発予定。

抵抗性アカマツ次世代化共同研究を振り返って

平成17年度から始まった本共同研究は、和歌山県、岡山県、広島県、香川県、徳島県、愛媛県の6県と関西育種場を合わせた7機関が参画し、12年間かけて推進された。本共同研究に参画した各機関においては、人工交配、球果採取、一次検定、二次検定といった多くの労力を要し、また、この間に各機関においては、しばしば人事異動による担当者の交替があったが、それにもかかわらず本事業が遂行できたのは、育林育種部会において、その都度、実行結果の詳細について相互に報告することにより、参画機関間で共同研究について共通の認識を持つことができたことや、研究内容や育種材料についての的確に引継ぎが行われたためであろうと思われる。関係諸機関の歴代の担当者、また現在の担当者のご尽力にここで感謝申し上げます。

本共同研究の遂行には12年を要したが、これにより17品種というまとまった数の品種を効率的に開発することができた。これは人工交配や接種検定といった、多くの労力を要する作業を分担して実行したためと考えられる。このような共同体制による林木育種の推進は、海外においても事例が見られる。例えば、アメリカ南東部のテーダマツやスラッシュマツの育種では、大学、州政府の森林管理部門および民間企業が育種共同組合を構成し、大学が研究・教育を主に担当し、州政府や民間企業が相互に保有する育種素材を提供し、新たな育種の研究・事業を展開している(三浦・平岡2012)。このように、複数の機関が連携し、各機関が有するスキルの連携を図って育種を推進するというスキームは、

アカマツの抵抗性育種に限らず、今後の林木育種の効果的な推進を図る上で、一考に値すると考えられる。

謝 辞

本取り組みについては、関西育種場の歴代担当者で取りまとめを行ったが、他の参画機関(和歌山県、岡山県、広島県、徳島県、香川県、愛媛県)の担当者には、事前に本稿に目を通してもらいご意見ご指摘を頂いた。ここに厚くお礼申しあげる。また森林総合研究所林木育種センター関西育種場の歴代の増殖担当者には増殖や苗畑管理で、職員には接種検定で大変お世話になった。これらの方々に厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 磯田圭哉・山口和穂・山野邊太郎(2010) マツノザイセンチュウ抵抗性アカマツ現地適応試験地における枯損状況. 第121回日本森林学会大会講演要旨集: C12
- 岩泉正和・磯田圭哉・久保田正裕・井城泰一・平岡裕一郎・玉城 聡・板鼻直栄(2015) 抵抗性アカマツのハーブダイアレル交配家系における抵抗性の組み合わせ能力. 第126回日本森林学会大会講演要旨集: 134
- 亀井幹夫・吉岡 寿(2013) 抵抗性アカマツ次代検定林の広島県における15年次までの生存状況. 第124回日本森林学会講演要旨集: 632

三浦真弘・平岡裕一郎 (2012) 海外林木育種事情調査報告ーアメリカ合衆国南東部ー. 林木育種情報 10: 4-5

林木育種センター (2016) 平成 28 年度版林木育種の実施状況及び統計. 林木育種センター, 茨城

林野庁 (2016) 森林・林業統計要覧. 林野庁, 東京

林野庁研究普及課 (1994) 林木育種事業関連通達集. 林木育種協会

杉本博之・富樫一巳 (2011) 材線虫病抵抗性アカマツ・クロマツの残存木の抵抗性発現と年次変化. 第 122 回日本森林学会学術講演集 122: C126

高橋 誠 (2017) 平成 28 年度に開発した新品種. 林木

育種情報 24: 2-3

戸田忠雄 (2004) アカマツおよびクロマツのマツ材線虫病抵抗性育種に関する研究. 林木育種センター研究報告 20: 83-217

戸田忠雄・寺田貴美雄 (2004) マツノザイセンチュウ抵抗性育種事業. 林木育種協会編. 林木育種プロジェクト, 13-19. 林木育種協会, 東京

東北林業試験研究機関連絡協議会森林保全部会 (2014) 東北地方におけるマツ材線虫病とマツノマダラカミキリの分布変遷ー2007 年度～2011 年度の分布変遷ー. 森林総合研究所研究報告 13: 335-343