石川県林試研報 57：21-24
短報

抵抗性クロマツ採種園における種子生産量と枯損率の品種間比較

中神悠雅・八島武志・矢田　豊

Ⅰ．はじめに

マツ材線虫病は，マツノザイセンチュウ（*Bursaphelenchus xylophilus*（Steiner et Buhrer）Nickle）を病原体とするマツ類の伝染性病害であり（清原・徳重，1971），令和５年度の我が国における被害量は31.5万m³に達している（林野庁，2025）。本病は世界的にも重要な森林病害であり、これに対する対策の１つとして，マツノザイセンチュウに対して抵抗性を有するマツの育種が全国的に進められている（藤本ら，1989）。石川県では，抵抗性品種の作出とともに採種園を整備し，安定的な種子生産に取り組んできた。しかし，採種園において生育する抵抗性クロマツには，品種間で球果サイズや結実量にばらつきが認められ（図-1），採種量が安定しない場合がある（江崎，2025）。



左：丹後60号　右：鳥取７号



左：小松99号　右；村上２号

図-1．結実量及び球果サイズの品種間での差の例

また，近年採種園内でも少数ではあるが，枯損の発生を確認している。種子の供給を担う採種園において，効率的に採種が可能な個体・品種を選抜・維持し，安定的かつ効率的に抵抗性品種の種子供給を行うための管理体制を構築することが重要な課題のひとつである。

小松 99 号は県内で初めて抵抗性品種として認定された品種であり，他県の品種と比べて石川県内での生育に適していることが予想されるが，種子生産量や枯損率を総合的に評価した事例はなく、相対的な生産性および耐性の位置づけは十分に明らかとなっていない。

本報告では，採種園に生育している品種の種子生産量と枯損率の比較から各品種の特性を明らかにし，現状の採種園における種子生産量及び枯損率の基準を特定し，採種園管理に向けた新たな方針を提案する。

Ⅱ．材料と方法

石川県緑化センター（志賀町火打谷）の抵抗性クロマツ採種園（以後採種園）において調査以下の２項目を実施した。また，今回調査に用いた品種は 10 年生以上かつ生育本数が 10 本以上の 10 品種 230 本を対象に調査を行った。

1．種子生産量調査

2020 年から 2023 年 10 月～11 月に種子収穫のため球果を採集した（139.6 千個）。種子は採集した未開裂球果を乾燥後にヘラを用いて開き採種した。調査個体ごとに結実の有無，球果数，種子重量を記録した。解析は以下の通り実施した。

1）結実率

各品種において結実がみられた個体割合（以下結実率）を算出し，χ^2検定により，品種間での差の有無かを評価した。また，ペアごとにχ2 乗検定を実施し，多重比較には Holm 補正を適用した。

2）種子重量

種子重量を目的変数，年度と品種を説明変数とした GLM を実施し，年度，品種が種子生産量に影響しているか評価した。モデル選択には AIC を用い，最小 AIC のモデルを最適モデルとして採用した。品種ごとの比較として GLM により算出された統計値に Holm 補正を適用した。

3）球果当たり種子重量

種子重量を球果数で割り返した1球果当たりの推定種子重量（以下，球果当たり種子重量）を調査木ごとに算出し，Kruskal-Wallis 検定を行い品種による差があるかを評価した。また，多重比較にはDunn 検定を適用した。

2. 枯損率調査

初めて枯損の確認された2021年から2025年にかけて枯損クロマツの本数を調査した。また，20㎜径のインパクトビットを用いて枯損クロマツの樹体から木片を採種し，ベールマン法を用いてマツノザイセンチュウが存在するかを確認した。解析方法はクロマツ1本ごとに対し生存を0，枯損を1とする二値変数を割り当てた。この枯損の発生を目的変数とし，品種と年度を説明変数としたロジスティック回帰分析を実施した。なお，今回はデータの分離が確認されることからFirth 補正付きロジスティック回帰分析を用いた。

3. 統計解析

統計解析はR（ver.4.5.2）を用いて実施した。結実率の解析には χ^2検定を用い，ペアワイズ比較および多重比較補正にはHolm 法を適用した。種子重量の解析には過分散を考慮し，MASS パッケージの glm.nb 関数を用いた負の二項一般化線形モデルを適用した。球果当たり種子重量の多重比較にはDunn 検定を用いた。枯損率の解析にはlogistf パッケージを用いたFirth 補正付きロジスティック回帰分析を適用した。

Ⅲ. 結果と考察

1. 種子生産量

結実率は品種による差が確認され(図-2），小松99号，鳥取13号，村上2号が結実率の最も高いグループに分けられた。一方で，久美浜 10号は他のどの品種よりも結実率が低いという結果が得られた。

種子重量は，品種間で種子生産量に有意な差が認められた(図-3)。解析の結果，種子生産量の多いグループと，少ないグループに分けられ，鳥取13号，丹後60号，小松99号は今回評価した品種の中でも種子生産量が多いグループだった。種子重量の変動は，品種と年度を説明変数とした相互作用モデルによって最も適切に説明された(表-1)。

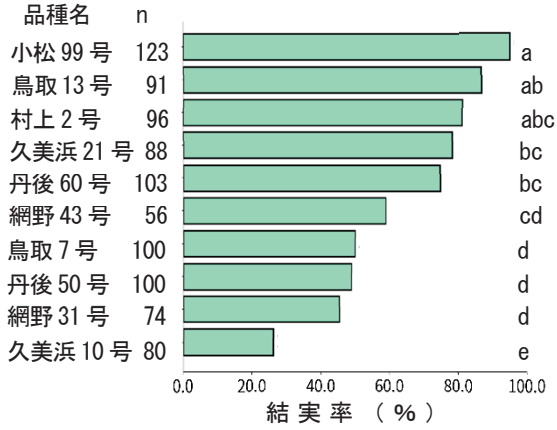


図-2. 品種別の結実率の違い

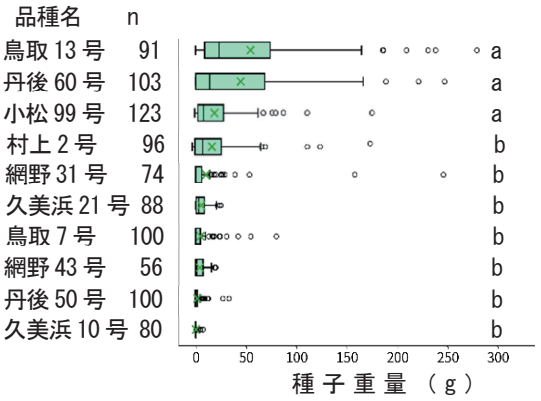


図-3. 品種別の種子重量の違い

表-1. 種子生産量 GLM 結果表

A. モデル選択（AIC）

モデル	説明変数	AIC	ΔAIC
m4	品種×年度（交互作用あり）	12166.25	0
m3	品種＋年度	12251.6	85.35
m1	品種	12335.7	169.45
m2	年度	12521.66	355.41
m0	切片のみ	12554.26	388.01

B. 交互作用検定（尤度比検定）

要因	自由度	LRT	p値
品種名×年度	27	149.51	<0.001

C. 交互作用モデルによる品種・年度別の推定種子重量

品種名	R2	R3	R4	R5	4年平均
鳥取13号	3030.4	1993.3	709	2906.3	2159.75
丹後60号	1412.5	2931.1	872.2	2968.7	2046.125
小松99号	1708.1	973.3	1260.5	1182.7	1281.15
村上2号	386.4	808.7	126.7	1498.8	705.15
網野31号	242.8	364.9	2.8	1425	508.875
久美浜21号	453	210.4	52.2	481	299.15
網野43号	334.7	298.4	85.3	461.4	294.95
丹後50号	199.8	52.6	46.2	833	282.9
鳥取7号	99.4	216.8	79.7	319.8	178.925
久美浜10号	7.6	22.4	86.5	198.2	78.675

続いて，種子重量を球果数で割り返した，1球果当たりの推定球果重量を解析したところ，品種間でばらつきがみられ，種子生産量上位グループの小松 99 号が最も値が小さいグループに割り振られた（図-4）。原因としては小松 99 号の球果サイズが小さく軽いことが考えられる。クロマツの球果サイズと種子数には正の相関があることが知られており（岩泉ら 2017），球果数の小さい小松 99 号からは球果当たりから得られる種子数自体が少ないことが推定される。小松 99 号の場合，種子数の少ない小型球果を大量につけることによって種子重量を増やしている。種子重量が安定的に多いことは，抵抗性マツの種子提供の安定化に不可欠な要素であるが，小型球果からの採種作業では，ヘラが鱗片の間に入りづらく，採種に時間と労力を要する。そのため，採種の難しい小型球果を大量に結実する小松 99 号は採種効率の観点から課題を有することが浮き彫りとなった。

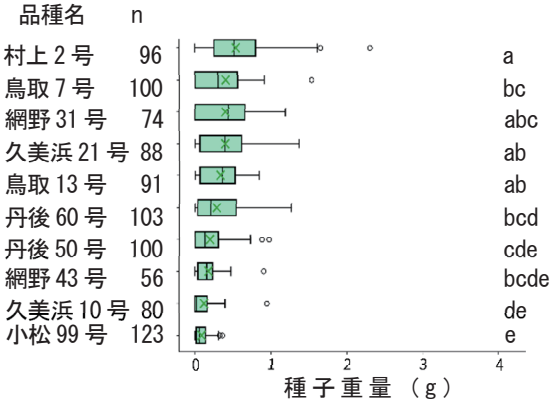


図-4. 品種別　球果当たり種子重量

2. 枯損率

調査期間中に 22 本の枯れを確認した。ベールマン法による枯損原因調査の結果，小松 99 号 1 本を除きすべての木でマツノザイセンチュウを確認した。鳥取 7 号は枯損率が 20%ととなり，すべての品種で最も高くなった。一方，丹後 50 号，網野 43 号は枯損率が 0%だった（表-2）。各品種がランダムに配置された条件下において，概観上は品種による枯損の偏りが示唆された。しかし，統計的解析の結果、品種間に有意な差は認められなかった（$p = 0.18$）。今回の解析では年の違いで有意な差が確認され，2025 年の枯損率が他の年と比較して有意に高くなっていた。これは，2025 年の渇水ストレスが例年よりも著しく，マツノザイセンチュウの増殖と複合的に作用して樹体への負荷を増大させたことが一因と推察される。

各品種の，生存率と平均種子重量の関係を，図-5 に示す。抵抗性クロマツ採種園では鳥取 13 号の採種重量が最も高く，枯損も 4.3%と比較的低い結果が得られ，本採種園の環境では優れた樹種であることが分かった。次点で丹後 60 号は，枯損率は 15.4%あるものの，種子生産量は鳥取 13 号に次いで高く，安定的な種子提供が期待できるポテンシャルがあることが分かった。鳥取 7 号は今回の調査では最も枯損率が高く，加えて種子生産量も少なく，採種園の環境では課題が残る結果となった。久美浜 10 号の損率は 10%と比較的低めであるが，種子生産量，球果当たり種子重量が低く種子の安定供給には適していないことが示唆された。

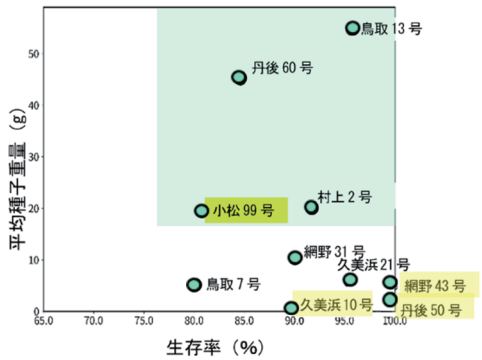


図-5. 種子生産量と枯損率を統合的に示した散布図
緑範囲：多重比較の結果特に優れている範囲
黄色マーカー：球果当たり　種子重量が軽いもの

表-2. 枯損率のロジスティック回帰分析結果表

品種名	N	枯損数	枯損率(%)	オッズ比(vs小松99号)	95%CI	Holm補正p値	判定
小松99号	31	6	19.4	1 (基準)	-	-	-
鳥取7号	25	5	20	1.05	0.28–3.80	1	n.s.
丹後60号	26	4	15.4	0.78	0.19–2.94	1	n.s.
久美浜10号	20	2	10	0.53	0.09–2.36	1	n.s.
網野31号	20	2	10	0.53	0.09–2.36	1	n.s.
村上2号	24	2	8.3	0.44	0.07–1.91	1	n.s.
久美浜21号	22	1	4.5	0.27	0.03–1.45	0.844	n.s.
鳥取13号	23	1	4.3	0.26	0.03–1.38	0.844	n.s.
丹後50号	25	0	0	0.08	0.00–0.71	0.173	n.s.
網野43号	14	0	0	0.14	0.00–1.29	0.72	n.s.

小松 99 号が県内初の抵抗性マツで種子生産量は鳥取 13 号，丹後 60 号についで高い結果が得られたが，枯損率が 19.4%とやや高かった。加えて，種子数の少ない小さな球果を多数つける傾向が見られ，採種効率が低いことが懸念される品種であることが分かった。

現在採種園のクロマツが成長し，日光の通りが悪くなってきており，今後は種子生産量が多く，枯れにくい鳥取 13 号や丹後 60 号をはじめとした優れた種の維持管理に注力するべきである。より優れた抵抗性マツ種子供給のために，県内環境ではあまり優れた結果を残せなかった種を中心に定性間伐を行い，適切な品種の維持管理に努めていく。また，今回は母数が少ないことから除外した志賀 396 号は，現時点で採集状況を見る限り，種子重量が多いことが期待される。また，抵抗性クロマツ第 2 採種園として，小松 99 号以外に 9 品種の石川県産抵抗性クロマツを植栽した採種園を造成しており，今後の県産品種が鳥取 13 号などの優れた県外産品種に匹敵する種子生産性，低い枯損率を示すことを期待する。

謝辞

石川県農林総合研究センター林業試験場副場長の江崎功二郎博士には，調査手法の選定や解析方針の策定など，本研究の全般にわたり多大なる助言をいただいた中村麻里子氏をはじめ事務員の方々には長期にわたり調査にご協力いただいた。厚く御礼申し上げる。

引用文献

1）岩泉正和・井城泰一・平尾知士・山野邉太郎・磯田圭哉・松永孝治・渡辺敦史（2017）全国有名クロマツ林から採取した球果と種子の形質変異．第 128 年日本森林学会

2）江崎功二郎（2025）抵抗性クロマツの有用な林業樹種の生産体制の強化．第 62 号石川県農林総合研究センター林業試験場業務報告

3）清原友也・徳重陽山（1971）マツ成立木に対する線虫 *Bursaphelenchus* sp.の接種試験．日本林学会誌 53：210-218.

4）林野庁（2025）令和 6 年度森林及び林業の動向令和 7 年度森林及び林業施策.林野庁，東京.

5）藤本吉幸・戸田忠雄・西村慶二・山手廣太・冬野劭一(1989)マツノザイセンチュウ抵抗性育種事業―技術開発と事業実施 10 か年の成果― .第 7 号林木育種場研究報告