

リュウキュウマツのマツノザイセンチュウ抵抗性育種に関する報告

久高 梢子・玉城 雅範

1. はじめに

リュウキュウマツ (*Pinus luchuensis* Mayr) はトカラ列島から先島諸島に分布する南西諸島の固有種である (大川・林、2016)。沖縄県では琉球王国尚真王 (在位 1477~1526) の時代から風致景観形成や経済林として重要性が認識され、植栽も盛んに行われてきた (玉城、2017)。しかし、1973年にマツ材線虫病がリュウキュウマツで確認されて以降 (国吉、1974; 我如古、1974)、集団枯損被害が継続している。沖縄県森林資源研究センター (以下、沖森研) は林木育種センター九州育種場 (以下、九州育種場) の協力のもと、マツ材線虫病対策の一環としてリュウキュウマツのマツノザイセンチュウ抵抗性品種の開発に取り組み、11個体を抵抗性候補木として選抜した (酒井、2012)。

クロマツ・アカマツのマツノザイセンチュウ抵抗性品種は、国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 林木育種センターの品種開発実施要領 (以下、実施要領) に基づき、1次検定と2次検定を経て選抜される。沖森研は、リュウキュウマツにおいても実施要領に定められた手法を用いて抵抗性選抜を実施する方向で検討を進めた。

古野ら (1993) は様々な地域に生育するマツ属のマツノザイセンチュウ抵抗性を調べ、日本の在来種であるクロマツ・アカマツ・リュウキュウマツは強感受性であるとしている。一方で、リュウキュウマツが生育する沖縄の土壌や気候は、本土とは異なる環境である。また、アカマツ・クロマツの葉の伸長は4~9月であるが (古野・四手井、1960)、リュウキュウマツは1~2月にほぼ休止する以外は年間を通じて伸長していることから (諸見里、1970)、ア

カマツやクロマツとはフェノロジーが大きく異なると考えられる。そのため、クロマツ・アカマツを対象として作成された実施要領の手法で沖縄県内においてリュウキュウマツの適切な抵抗性品種の選抜ができるか検証に取り組んだ。

玉城ら (2018、2019) は、リュウキュウマツの抵抗性評価のための線虫接種時期について5~7月が妥当であることを明らかにした。これにより実施要領で定められる接種時期の7月がリュウキュウマツにおいても適用できると判断された。

また、実施要領に準じた選抜を行う上で、クロマツ・アカマツの2次検定は接木クローンを増殖して線虫接種を行うことが多いが、リュウキュウマツは接木による増殖が困難であることが検討課題の一つであった。一方でマツ類は一般的にさし木増殖が困難と考えられていたが (町田、1981) リュウキュウマツはクロマツよりさし木の発根率が高く、検定用クローン苗を作出する上で、さし木増殖が有効であることが確認された (久高・松永、2026)。

以上の検証結果を踏まえて、本研究では、2017~2024年にリュウキュウマツ抵抗性育種の取り組みとして、実施要領に順じて抵抗性候補木の後代実生に連年で線虫接種を行う1次検定を行い、生き残った1次検定合格個体のクローンをさし木増殖して2次検定を実施した結果を報告する。

2. 材料および方法

(1) 1次検定

沖縄県内のリュウキュウマツに由来する抵抗性候補木等77系統の種子を、2016~2020年の1~4月にガラス室内でセルトレイに播き付

けた。その半年～1年後に毛苗を圃場に定植し、2017～2022年の間に2年連続で線虫を接種した。1次検定の概要を表-1に示す。線虫接種方法は実施要領に従って剥皮接種法により行い、線虫接種頭数は、1年目は5,000頭/50 μ l、2年目は10,000頭/100 μ lとした。線虫は島原個体群(九州育種場から譲渡)を沖森研で培養したものを使用した。接種後20又は30週間後に、苗木の状態を確認し、全針葉が赤褐色に変色した個体を枯死、それ以外の生存個体を1次検定合格個体とし、本数を確認した。1年目接種本数に対する2年目接種の生存本数の割合を1次検定の生存率とした。

(2) 2次検定

1次検定合格個体のうち、34個体を2次検定対象とし、さし木により増殖して2022～2024年に線虫接種を行った。2次検定の概要を表-2に示す。クロマツではさし穂に萌芽枝

を使用することで発根性が向上することが指摘されていることから(大山・豊島、1965)、萌芽枝誘導のため、穂木採取の半年～1年前に対象個体を剪定した。しかし一部の個体については剪定ができず萌芽枝が得られなかったため、普通枝を用いた。穂木の採取は各年とも12～2月の比較的気温の低い時期に行った。採取した荒穂を一晩流水に漬け、翌日、穂長を約10cm、着葉量は穂長の2/3程度に調整し、挿口は切り返して、水道水で2倍希釈したオキシベロン液剤(バイエルクロップサイエンス(株)、0.4%IBA)に10秒浸漬し、あらかじめ水に浸けて吸水させた育苗箱(内寸39cm×54cm、細粒鹿沼土を充填)にさし付けた。その後、ガラス室内のビニルトンネル内で1日3回(7分/回)ミストかん水により管理した。

また、抵抗性の比較のために、1次検定を經ていない沖森研場内に自生する4個体(以下、非選抜系統)についても2次検定対象個体と

表-1 1次検定概要

	1期	2期	3期	4期	5期
供試系統数	55	29	16	32	12
播種年	2016-01～04	2017-02	2018-02	2019-01	2020-01
移植時期	2016-05～06	2018-01	2019-02	2020-01	2021-03
1回目線虫接種日	2017/7/11	2018/6/26	2019/7/17	2020/7/21	2021/7/15
2回目線虫接種日	2018/6/26	2019/7/17	2020/7/21	2021/7/15	2022/7/15
1系統あたり供試数	7～62	13～52	8～56	8～47	7～40

表-2 2次検定概要

	2022	2023	2024
検定系統数	15	20	12
採穂時の台木の樹齡(年生)	4～5	4～6	4～7
さし木時期	2021/2/5	2022/1/18	2023/1/20, 25
移植時期	2021-05～06	2022-06	2023-06
対照系統数	6	6	5
対照系統植栽時期	2022-01	2022-12	2023-06
線虫接種日	7月15日	7月11、29日	7月18日
1系統あたり供試数	10～25	14～36	11～24

注) 採穂台木の採穂時樹齡は、圃場に移植した年を1年生としている。

同様の条件でさし木増殖した。さし付けから約4~6ヶ月後に、発根を確認し直ちに沖森研内の圃場へ移植した。移植は1反復につき各系統を1~9本ずつランダムに配置し、4または6反復とした。

また、実施要領には抵抗性品種の実生苗を2次検定の対照として用いることとなっており、抵抗性クロマツ品種を毎年5~6系統と選抜されていない精英樹クロマツ1系統(九州育種場から譲渡)の1年生実生苗を、検定苗と同じ畝に同様に植栽した。圃場でのクロマツ実生苗の育苗期間は2022、2023年は約半年、2024年は約1年と異なった(表-2)。

移植して約13~14ヶ月後の7月に線虫接種を行った。線虫接種方法は実施要領に従って剥皮接種法により行い、線虫接種頭数は10,000頭/100 μ 1とし、線虫は島原個体群(九州育種場から譲渡)を使用した。線虫接種の際にはすべての苗について、苗高及び地際径を調査した。接種日から20週目に、全針葉が赤褐色に変色した個体を枯死、病徴が見られない個体を健全とし、検定苗の状態を判定した。接種本数に対し、枯死に至っていない苗の本数割合を生存率、健全苗の本数割合を健全率として算出した。

(3) 対照系統クロマツの抵抗性確認

2次検定の対照系統として実施要領に定められた抵抗性品種の中にリュウキュウマツはないため、九州地方で抵抗性選抜が盛んに行われているクロマツの抵抗性品種を対象系統として用いた。そのため、クロマツ本来の生育環境とは異なる沖縄の環境下においてもクロマツ抵抗性品種が抵抗性を示し、対照系統として適用できるか検討した。また、九州で育苗されたクロマツ実生を沖縄の圃場に植栽してから、線虫接種するまでの育苗期間についても検討した。

(4) 解析方法

1次検定に供試した全77系統の相対的な生存率に違いがあるかを検討するため、1次検定の生存率を目的変数とし、系統と検定実施年を変数効果の説明変数として、一般化線形混合モデル(ロジスティック回帰)による解析を行い、得られたモデルから生存率の推定値を求めた。

2次検定に供試した全34系統及び非選抜系統の相対的な生存率及び健全率を評価するため、生存率又は健全率を目的変数とし、系統と検定実施年を変数効果の説明変数として、一般化線形混合モデル(ロジスティック回帰)による解析を行い、得られたモデルから系統ごとの生存率及び健全率の推定値を求めた。

また、2次検定の抵抗性の評価においては、実施要領に準じて次式により得られる評点Pを求め、対照系統との比較により抵抗性を評価した。

$$P = \{(A-a) / A\} \times 10 + \{(B-b) / B\} \times 5$$

A=対照系統の生存率(%)

a=検定系統の生存率(%)

B=対照系統の健全率(%)

b=検定系統の健全率(%)

対照系統の抵抗性クロマツ品種の生存率及び健全率を評価するため、生存率又は健全率を目的変数とし、系統と苗高と根元径と圃場での実施年ごとの生育期間を説明変数として、一般化線形モデル(ロジスティック回帰)による解析を行い、クロマツを沖縄で生育した場合の抵抗性を検討した。

統計解析はR4.5.1(R Core Teams, 2025)を用い、一般化線形混合モデル解析はlme4パッケージ(1.1.37)、用いた。

3. 結果及び考察

(1) 1次検定

表-3 1次検定2年目生存率推定値

系統	生存率(%)	系統	生存率(%)	系統	生存率(%)	系統	生存率(%)
AI-1	4.7	AI-8	17.1	精302	13.8	仲里り-15	12.8
AI-105	3.4	No. 1802	10.6	精303	9.7	仲里り-16	7.2
AI-11	8.5	No. 1803	4.9	精304	6.9	仲里り-17	15.3
AI-14	7.4	No. 2412	6.2	精306	5.1	仲里り-25	11.3
AI-15	8.3	No. 2413	6.3	精310	6.6	仲里り-30	12.8
AI-152	5.4	No. 2417	2.5	精英樹八重山11号	5.0	仲里り-31	15.0
AI-16	11.7	No. 2418	12.6	大島り-8	6.3	仲里り-5	8.2
AI-17	15.0	No. 2419	6.4	大島り-8-1	7.8	仲里り-6	8.5
AI-18	12.6	No. 2420	4.3	大島り-8-4	18.2	石垣No.1	4.3
AI-19	8.4	No. 2405	12.3	大島り-8(12)	9.8	石垣No.10	5.0
AI-2	13.8	宜野湾No1	9.6	今帰仁No.1	4.2	石垣No.2	3.7
AI-24	2.8	宜野湾No2	5.3	今帰仁No.2	7.3	石垣No.3	7.5
AI-3	5.2	糸満No1	5.5	今帰仁No.3	10.4	石垣No.4	4.4
AI-33	11.8	糸満No4	9.2	今帰仁No.4	5.3	石垣No.5	6.0
AI-38	5.2	精2701	8.8	今帰仁No.5	5.9	石垣No.6	8.6
AI-41	13.8	精2702	2.8	仲里り-1	8.0	石垣No.9	4.3
AI-46	12.3	精2703	2.7	仲里り-10	10.9	北中城No.1	4.3
AI-5	4.1	精2704	2.9	仲里り-13	7.5	北中城No.2	5.1
AI-6	4.4	精301	6.5	仲里り-14	12.0	北中城No.7	4.9
AI-65	10.0						

77 系統 4237 本に 1 次検定を実施した結果、527 本(生存率 12.4%)が選抜された(附表-1)。一般化線形混合モデルによる解析から得られたモデルから、検定実施年の効果を 0 とし、各系統の生存率を推定したところ、表-3 のとおりであった。最も低かったのは No. 2417 の 2.5%で、最も高かったのは大島り-8-4 の 18.2%であった。選抜された系統には、酒井 (2012) により抵抗性候補木として選抜された 11 個体のうち、嵐山自生系統 (AI 系統) の AI-6、18、久米島の旧仲里村由来の系統 (仲里り系統) の仲里り-6、16、17、31 の 6 個体の種子から生育した実生が含まれていた。

(2) 2次検定

1 次検定合格個体 34 系統と非選抜の 4 系統の 2 次検定の結果、生存率の全体の平均値は 87.5%、健全率では 62.0%であった (附表-2)。一般化線形混合モデルによる解析から得られたモデルより、検定実施年の効果を 0 とし各系統の生存率及び健全率を推定したところ、表-4 のとおりであった。生存率推定値は 66~

97%、健全率推定値は 24~95%であった。推定値をヒストグラムで表すと、生存率 80%以上の系統が大半を占める偏った度数分布であった。

表-4 2次検定生存率及び健全率推定値

系統	生存率(%)	健全率(%)	系統	生存率(%)	健全率(%)
AI-1-1	91.1	47.5	仲里り13-1	92.5	64.0
AI-14-1	78.2	24.3	仲里り13-2	96.8	88.3
AI-14-2	93.3	68.8	仲里り13-3	77.1	43.0
AI-14-3	89.3	45.5	仲里り14-1	88.5	44.5
AI-16-1	95.5	81.7	仲里り15-1	86.9	50.6
AI-17-1	93.6	84.6	仲里り17-1	94.1	93.0
AI-18-1	97.3	82.8	仲里り30-1	88.0	74.9
AI-6-1	95.1	58.9	仲里り31-1	96.0	81.0
No. 2413-1	89.7	60.8	仲里り31-2	87.7	53.7
No. 2413-2	92.0	74.3	石垣No.3-1	93.1	70.5
No. 2418-1	94.7	76.5	石垣No.3-2	88.7	56.0
No. 2419-1	97.2	72.9	石垣No.5-1	87.0	58.1
No. 2420-1	94.4	84.3	石垣No.6-1	76.5	49.6
精2701-1	66.3	35.8	北中城No.1-1	85.2	28.1
精301-1	94.7	58.2	北中城No.1-2	90.2	44.0
精302-1	96.4	74.0	cnt1	74.3	26.6
精303-1	92.7	34.6	cnt2	91.3	78.2
精304-1	81.5	53.4	cnt3	78.2	53.6
仲里り10-1	94.1	95.0	cnt4	85.8	46.4

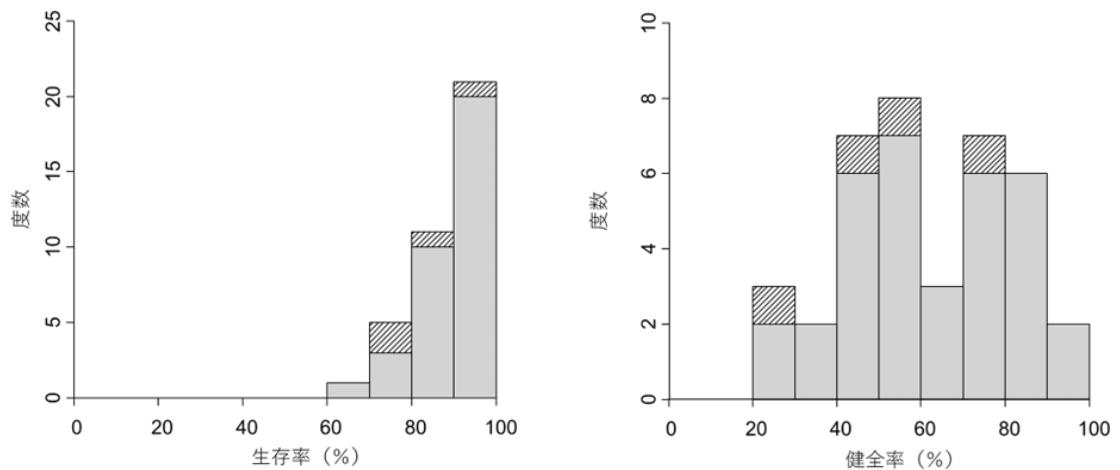


図-1 2次検定生存率及び健全率の度数分布（左図：生存率、右図：健全率）

■ 検査系統 ▨ 非選抜系統

った一方、健全率は20～100%で突出した偏りは見られなかった（図-1）。また、非選抜系統の中では cnt2 の生存率が 91.3%、健全率が 78.2%でともに最も高かった。生存率、健全率ともに cnt2 より高いのは、AI-16-1、AI-7-1、AI-18-1、No. 2420-1、仲里り 10-1、仲里り 13-2、仲里り 17-1、仲里り 31-1 の 8 系統であった（表-4）。

実施要領に基づき各年において評点 P を求めた結果は表-5 のとおりである。なお、対照系統の値として、対照系統クロマツの生存率が高い上位 5 系統の生存率及び健全率の平均値を用いた。評点 P は対照系統の生存率及び健全率に対する検査系統と対照系統の差の比率で、生存率に健全率の 2 倍の重みを置き抵抗性を評価する方法である。マイナスの値が大きければ大きいほど対照系統より抵抗性が強いことを示すが、各年とも正の値から-18 の範囲でばらついていた（表-5）。

ここで、先述の一般化線形混合モデルによる推定値において、非選抜系統の cnt2 より抵抗性が高かった 8 系統のうち AI-18-1、AI-16-1、精 302-1、No. 2420-1、AI-17-1 は、2 年分の検定結果があり、評点 P が両年とも-10 以下となった（表-5）。一方、No. 2419-1 に着目すると、2023 年は-12.5 で抵抗性の順位が最も高かったが、2022 年は-3.3 で順位は下位で差が大

きかった（表-5）。マツノザイセンチュウの接種検定結果は供試家系の遺伝的抵抗性の他に、気温や土壌水分など環境要因によっても異なるとの指摘もあり（戸田、1997）、No. 2419-1 は接種実施年による気温や降雨量の違いによる影響を受けやすい系統であった可能性がある。このことを考慮すると、表-4 より非選抜系統の cnt2 より抵抗性が高かった 8 系統のうち仲里り-10-1、仲里り-17-1、仲里り-13-2、仲里り-31-1 は検定結果が単年しかないため、さらに 1 回以上の検定を行い、その結果を踏まえた上で抵抗性を判断することで、より強い系統を選抜できると考えられた。

(3) 対照系統クロマツの抵抗性確認

対照系統の抵抗性クロマツ品種 9 系統と非抵抗性のクロマツ精英樹 1 系統について、クロマツ精英樹を基準として一般化線形モデルにより解析したところ、生存率は、クロマツ精英樹三豊 103 号（以下、三豊-103 号）を除く 8 系統で有意な正の効果が認められた一方、苗高、根元直径、圃場での生育期間について有意な効果は確認されなかった。（表-6）。健全率においては、系統について三豊-103 号を除く 8 系統で有意な正の効果が認められ、根元直径についても正の効果がみられたが、苗高、圃場での生育期間について有意な効果は確認され

なかった（表-7）。

これより、対照系統クロマツ品種 9 品種の

うち三豊-103 号を除く 8 品種は、非抵抗性の

クロマツ系統より強い抵抗性が確認され、本

表-5 実施年ごとの評点 P と抵抗性の順位

2022			2023			2024		
順位	系統	評点P	順位	系統名	評点P	順位	系統名	評点P
1	仲里り-10-1	-17.2	1	No. 2419-1	-12.5	1	No. 2413-2	-15.7
2	仲里り-17-1	-16.3	2	仲里り13-2	-12.4	2	精302-1	-15.6
3	AI-18-1	-13.8	3	AI-17-1	-12.0	3	No. 2420-1	-14.5
4	AI-16-1	-12.6	4	No. 2418-1	-11.8	4	石垣No.3-1	-13.7
5	仲里り-30-1	-9.1	5	AI-18-1	-11.2	5	精304-1	-12.4
6	仲里り-15-1	-8.3	6	仲里り-31-1	-11.2	6	仲里り-13-3	-10.3
7	No. 2418-1	-7.8	7	No. 2420-1	-11.1	7	AI-17-1	-10.1
8	仲里り-13-1	-7.5	8	AI-16-1	-10.9	8	石垣No.3-2	-9.7
9	精301-1	-7.2	9	精302-1	-10.1	9	石垣No.5-1	-8.9
10	AI-6-1	-6.7	10	cnt2	-9.5	10	仲里り-31-2	-8.6
11	AI-1-1	-4.7	11	AI-14-2	-9.1	11	cnt4	-6.8
12	No. 2419-1	-3.3	12	AI-6-1	-8.9	12	石垣No.6-1	-4.4
13	仲里り-14-1	-3.1	13	仲里り13-1	-8.4	13	精2701-1	1.6
14	精303-1	-2.9	14	No. 2413-2	-8.3	14	cnt1	1.7
15	AI-14-1	3.2	15	No. 2413-1	-7.2			
			16	精303-1	-5.8			
			17	AI-14-3	-5.5			
			18	北中城No.1-2	-5.3			
			19	cnt3	-3.1			
			20	仲里り15-1	-3.1			
			21	精304-1	-2.3			
			22	北中城No.1-1	-2.1			
			23	AI-14-1	-1.6			
			24	仲里り13-3	0.8			

注 1) 対照系統の生存率及び健全率は 2022 年 : 59.2%、32.6%、2023 年 : 55.4%、51.4%、2024 年 : 50.9%、36.1%

表-6 抵抗性クロマツ生存率の推定値

変数	切	片	回帰係数(β)	SE(β)	p値
			-4.569	0.752	<0.0001 *
系統	穎娃ク-425号		2.210	0.676	0.0011 *
	吉田ク-2号		3.587	0.561	<0.0001 *
	三崎ク-90号		3.433	0.535	<0.0001 *
	クロマツ精英樹三豊103号		1.044	0.829	0.2075
	志摩ク-64号		3.591	0.595	<0.0001 *
	田辺ク-54号		1.572	0.715	0.0280 *
	波方ク-37号		2.925	0.554	<0.0001 *
	波方ク-73号		3.550	0.598	<0.0001 *
	備前ク-143号		3.722	0.548	<0.0001 *
苗高			0.025	0.018	0.1736
根元直径			0.076	0.057	0.1803
圃場での生育期間			0.558	0.404	0.1672

表-7 抵抗性クロマツ健全率の推定値

変数	切	片	回帰係数(β)	SE(β)	p値
			-5.19569	0.96689	<0.0001 *
系統	穎娃ク-425号		3.18552	0.89243	0.0004 *
	吉田ク-2号		3.61954	0.8016	<0.0001 *
	三崎ク-90号		3.59573	0.78585	<0.0001 *
	クロマツ精英樹三豊103号		-13.10573	590.156	0.9823
	志摩ク-64号		3.41008	0.82776	<0.0001 *
	田辺ク-54号		1.9124	0.96149	0.0467 *
	波方ク-37号		3.36618	0.80036	<0.0001 *
	波方ク-73号		3.29509	0.83126	<0.0001 *
	備前ク-143号		4.1387	0.78467	<0.0001 *
苗高			-0.02113	0.01967	0.2827
根元直径			0.20933	0.06072	<0.0001 *
圃場での生育期間			0.31544	0.41079	0.4426

来生育環境ではない沖縄県の環境においても、遺伝的抵抗性を示していると考えられた。袴田 (2017) は抵抗性クロマツ実生苗の健全率に対して接種年 (環境)、家系、苗高、根元径が有意に関与しており、特に苗高は接種検定時の抵抗性に独立的に関与しており、2年生の接種検定苗としては苗高の大きいものを用いることが望ましいと指摘している。本研究では、平均苗高は2022年は 26.47 ± 7.55 cm、2023年で 28.05 ± 7.19 cm、2024年で 35.0 ± 10.8 cmで (附表-2)、袴田 (2017) が用いた苗木と同じ2年生苗であったがより大きく生育していたことから、圃場での生育期間が約半年と約1年のどちらの期間でも、生存率及び健全率への関与が確認されなかったと考えられた。

4. 終わりに

本研究ではリュウキュウマツのマツノザイセンチュウ抵抗性選抜において、実施要領に従った1次検定及び2次検定を行い、2次検定結果の一般化線形混合モデル解析による生存率及び健全率の推定値と、実施要領に定められた単年ごとの対照系統との比較である評点Pを用いた評価の2つの手法により抵抗性を評価した。本研究の結果より、リュウキュウマツにおいても実施要領に従った手法により抵抗性品種開発が可能であることが示唆された。実際に2024年8月の実施要領改正で対象樹種にリュウキュウマツが加えられ (森林総合研究所林木育種センター、2024)、2025年2月に抵抗性品種として5系統 (AI-18-1、AI-16-1、精302-1、AI-17-1、No.2420-1) を林木育種センターの優良品種・技術評価委員会に申請し、開発品種として認定を受けた。

沖縄県が将来的な目標としている抵抗性品種による採種園造成に向けては、構成系統の遺伝的多様性の確保が課題であり、抵抗性品種を追加する必要がある。本研究で高い抵抗性を示す可能性が示唆された仲里り-10-1、仲里り-17-1、仲里り-13-2、仲里り-31-1につい

ては、引き続き2次検定を行って、抵抗性を評価する方針であり、今後は遺伝子資源としてさらに多様な地域由来の系統の品種開発を進める必要がある。

謝辞

本研究にあたって、林木育種センター九州育種場松永孝治研究室長にご指導いただきましたことを感謝申し上げます。

引用文献

- 我如古光男 (1974) 森林防疫 23 : 4-6
袴田哲司 (2018) 静岡県農林技術研究所特別報告 10 : 1-46
古野東洲・四手井綱英 (1960) 日林誌 42(12) : 435-440
古野東洲ら (1981) 京大農演習林報 25 : 20-34
久高梢子・松永孝治 (2026) 九州森林研究 79 : 印刷中
国吉清保 (1974) 森林防疫 23 : 2-4
町田英夫 (1981) さし木のすべて, 261pp, 誠文堂新光社, 東京
諸見里秀宰 (1970) 沖縄農業, 9(2) : 28-32
大川智史・林将之 (2016) ネイチャーガイド 琉球の樹木 奄美・沖縄～八重山の亜熱帯植物図鑑, 文一総合出版, 東京, 27
大山浪雄・豊島昭和 (1965) 林試研報 179 : 99-125
R Core Teams (2025) R : A language and environment for statistical computing. Vienna , Austria , URL:<http://www.R-project.org/>
酒井康子 (2012) 沖縄県森林資源研究センター 研究報告 53 : 5-9
森林総合研究所林木育種センター (2024) URL:https://www.ffpri.go.jp/ftbc/business/sinhijnnsyu/yuryouhinsyu/documents/jissiyoryo_matuzai.pdf (2025年3月12日利用)

玉城雅範 (2017) 森林遺伝育種 第6巻 : 178-181
玉城雅範ら (2018) 九州森林研究 71 : 59-62
玉城雅範ら (2019) 九州森林研究 72 : 99-102

戸田忠雄 (1997) マツノザイセンチュウ抵抗性マツの育成, (松くい虫 (マツ材線虫病) -沿革と最近の研究-, 全国森林病虫獣害防除協議会, 東京, 168-274

付表-1 2017-2022年の1次検定の生存率

接種時期	系統	供試本数	生存本数	生存率(%)	接種時期	系統	供試本数	生存本数	生存率(%)	接種時期	系統	供試本数	生存本数	生存率(%)
1	AI-1	29	5	17.2	1	No. 2418	47	11	23.4	3	仲里り-6	31	1	3.2
1	AI-105	19	0	0.0	1	No. 2419	7	2	28.6	3	北中城No. 1	56	3	5.4
1	AI-11	37	8	21.6	1	No. 2420	42	3	7.1	3	北中城No. 2	30	0	0.0
1	AI-14	35	6	17.1	1	宜野湾No1	48	11	22.9	3	北中城No7	20	0	0.0
1	AI-152	36	4	11.1	1	宜野湾No2	12	3	25.0	4	AI-1	33	1	3.0
1	AI-16	7	2	28.6	1	北中城No. 1	40	2	5.0	4	AI-3	40	3	7.5
1	AI-17	20	8	40.0	1	北中城No. 2	62	8	12.9	4	AI-16	31	4	12.9
1	AI-18	42	12	28.6	2	AI-1	27	0	0.0	4	AI-18	29	6	20.7
1	AI-19	30	8	26.7	2	AI-105	40	3	7.5	4	AI-19	47	2	4.3
1	AI-2	24	0	0.0	2	AI-16	32	6	18.8	4	AI-105	29	0	0.0
1	AI-24	45	2	4.4	2	AI-18	45	6	13.3	4	大島り-8-1	24	2	8.3
1	AI-3	32	2	6.3	2	AI-19	36	6	16.7	4	大島り-8-4	38	9	23.7
1	AI-33	15	5	33.3	2	AI-2	27	9	33.3	4	仲里り-1	23	1	4.3
1	AI-38	14	1	7.1	2	AI-24	21	0	0.0	4	仲里り-13	38	1	2.6
1	AI-41	29	10	34.5	2	AI-3	29	1	3.4	4	精2701	39	5	12.8
1	AI-46	24	10	41.7	2	AI-46	35	4	11.4	4	精302	26	8	30.8
1	AI-5	35	3	8.6	2	AI-5	43	2	4.7	4	精303	31	5	16.1
1	AI-6	23	2	8.7	2	AI-8	26	5	19.2	4	精英樹八重山11	37	1	2.7
1	AI-65	10	3	30.0	2	大島り-8	33	3	9.1	4	No. 1803	14	0	0.0
1	AI-8	36	16	44.4	2	仲里り-1	22	5	22.7	4	No. 2413	40	0	0.0
1	大島り-8	21	3	14.3	2	仲里り-13	33	5	15.2	4	No. 2418	37	7	18.9
1	大島り-8(12)	15	4	26.7	2	仲里り-17	32	8	25.0	4	No. 2419	34	3	8.8
1	仲里り-1	26	5	19.2	2	仲里り-30	25	7	28.0	4	宜野湾No2	21	0	0.0
1	仲里り-10	33	10	30.3	2	仲里り-31	27	10	37.0	4	今帰仁No.1	30	0	0.0
1	仲里り-13	47	9	19.1	2	精2701	51	6	11.8	4	今帰仁No.2	28	2	7.1
1	仲里り-14	24	7	29.2	2	精302	24	6	25.0	4	今帰仁No.3	31	4	12.9
1	仲里り-15	17	6	35.3	2	精303	29	8	27.6	4	今帰仁No.4	32	1	3.1
1	仲里り-17	33	13	39.4	2	精304	52	2	3.8	4	今帰仁No.5	8	0	0.0
1	仲里り-25	12	4	33.3	2	精306	28	4	14.3	4	石垣No.1	27	0	0.0
1	仲里り-30	29	7	24.1	2	精310	46	3	6.5	4	石垣No.2	40	0	0.0
1	仲里り-31	33	8	24.2	2	No. 1803	25	1	4.0	4	石垣No.3	40	3	7.5
1	仲里り-5	9	2	22.2	2	No. 2413	41	3	7.3	4	石垣No.4	26	0	0.0
1	仲里り-6	7	3	42.9	2	No. 2417	21	0	0.0	4	石垣No.5	41	2	4.9
1	精2701	52	10	19.2	2	No. 2418	24	5	20.8	4	石垣No.6	43	4	9.3
1	精2702	31	0	0.0	2	No. 2419	31	1	3.2	4	石垣No.9	27	0	0.0
1	精2703	32	0	0.0	2	宜野湾No2	13	0	0.0	4	石垣No.10	38	1	2.6
1	精2704	28	0	0.0	3	AI-19	12	0	0.0	5	AI-1	9	0	0.0
1	精301	28	4	14.3	3	AI-2	25	8	32.0	5	AI-5	7	0	0.0
1	精302	21	2	9.5	3	AI-3	10	2	20.0	5	AI-6	39	0	0.0
1	精303	32	3	9.4	3	No. 2412	8	0	0.0	5	AI-11	40	1	2.5
1	精304	41	10	24.4	3	No. 2420	22	1	4.5	5	AI-15	19	1	5.3
1	精306	21	0	0.0	3	No.2405	54	7	13.0	5	AI-18	7	1	14.3
1	精310	49	9	18.4	3	精303	14	0	0.0	5	AI-19	17	0	0.0
1	No. 1802	39	10	25.6	3	仲里り-1	37	1	2.7	5	AI-24	16	0	0.0
1	No. 1803	20	3	15.0	3	仲里り-10	12	0	0.0	5	仲里り-16	32	1	3.1
1	No. 2412	20	3	15.0	3	仲里り-13	52	3	5.8	5	仲里り-17	24	1	4.2
1	No. 2413	53	11	20.8	3	仲里り-14	15	2	13.3	5	糸満No1	26	0	0.0
1	No. 2417	26	0	0.0	3	仲里り-17	53	6	11.3	5	糸満No4	11	1	9.1

注1) 接種時期は1:2017-2018年、2:2018-2019年、3:2019-2020年、4:2020-2021年、5:2021-2022年

注2) 枯損調査の最終日は1:30週目、2:30週目、3:20週目、4:20週目、5:20週目

注3) AI系統:名護市嵐山県有林自生個体、大島系統:奄美大島由来個体、精英樹系統:精英樹由来生存個体
仲里系統:久米島村旧仲里村由来、市町村名+No.の系統:当該市町村由来、No.のみの系統:激害地由来個体

付表-2 2022-2024年の2次検定の生存率及び健全率

実施年	系統	供試苗数	平均苗高 (cm)	±SD	平均地際径 (mm)	±SD	生存本数	生存率%	健全本数	健全率%	実施年	系統	供試苗数	平均苗高 (cm)	±SD	平均地際径 (mm)	±SD	生存本数	生存率%	健全本数	健全率%	
2022	AI-1-1	21	51.0	11.8	11.2	2.3	20	95.2	5	23.8	2023	精304-1	24	47.3	14.6	8.9	2.5	16	66.7	13	54.2	
2022	AI-6-1	16	51.3	16.9	9.4	2.8	16	100	5	31.3	2023	仲里-り13-1	17	39.9	12.0	7.1	2.1	15	88.2	13	76.5	
2022	AI-14-1	10	41.2	19.8	11.2	4.6	7	70	0	0	2023	仲里-り13-2	28	44.2	10.3	7.4	1.3	28	100	27	96.4	
2022	AI-16-1	10	44.7	10.7	11.7	4.0	10	100	7	70	2023	仲里-り13-3	35	35.3	9.8	9.5	2.6	20	57.1	14	40.0	
2022	AI-18-1	18	56.2	16.8	10.8	3.0	18	100	14	77.8	2023	仲里-り15-1	27	44.4	13.9	7.4	2.0	20	74.1	13	48.1	
2022	NO.2418-1	23	39.2	11.0	8.5	1.5	22	95.7	10	43.5	2023	仲里-り31-1	36	31.4	7.2	6.8	1.1	35	97.2	32	88.9	
2022	NO.2419-1	11	49.4	12.2	10.7	2.1	11	100	1	9.1	2023	北中城No.1-1	22	40.0	14.2	7.7	2.4	17	77.3	7	31.8	
2022	精301-1	23	64.1	17.6	11.3	2.8	23	100	8	34.8	2023	北中城No.1-2	14	55.2	23.8	9.8	3.3	12	85.7	7	50.0	
2022	精303-1	14	44.1	10.3	9.9	2.1	13	92.9	2	14.3	2023	cnt.2	*	17	23.5	6.7	5.3	1.0	15	88.2	15	88.2
2022	仲里-り10-1	17	47.3	15.0	9.6	3.1	17	100	17	100	2023	cnt.3	*	24	32.6	9.9	6.9	1.6	16	66.7	15	62.5
2022	仲里-り13-1	11	55.3	12.9	10.8	3.0	11	100	4	36.4	2023	吉田ク-2号	**	33	26.4	5.6	9.1	1.3	19	57.6	17	51.5
2022	仲里-り14-1	11	37.8	11.3	9.9	3.2	10	90.9	2	18.2	2023	三崎ク-90号	**	35	29.0	5.8	8.7	1.8	17	48.6	15	42.9
2022	仲里-り15-1	24	46.5	14.0	9.5	2.6	24	100	10	41.7	2023	志摩ク-64号	**	36	21.3	5.8	8.3	1.7	15	41.7	14	38.9
2022	仲里-り17-1	17	24.1	11.5	6.4	2.3	17	100	16	94.1	2023	波方ク-37号	**	36	29.6	7.2	9.1	1.7	7	19.4	7	19.4
2022	仲里-り30-1	25	53.3	16.9	11.3	2.6	23	92	14	56	2023	波方ク-73号	**	20	29.6	6.6	10.6	1.9	12	60.0	11	55.0
2022	三崎ク-90号**	29	28.8	6.3	6.1	1.2	16	55.2	6	20.7	2023	備前ク-143号	**	29	28.7	6.7	10.1	1.6	20	69.0	20	69.0
2022	志摩ク-64号**	36	22.2	7.0	7.6	2.1	24	66.7	12	33.3	2023	県芦北5号	***	35	32.3	7.3	8.9	1.9	1	2.9	1	2.9
2022	吉田ク-2号**	36	28.4	5.1	7.3	1.2	21	58.3	10	27.8	2024	AI-17-1	12	20.8	6.5	5.4	1.9	9	75.0	9	75.0	
2022	波方ク-37号**	36	26.6	4.9	6.6	1.4	23	63.9	16	44.4	2024	No.2413-2	12	21.3	8.8	5.1	1.8	11	91.7	11	91.7	
2022	備前ク-143号**	27	25.2	4.9	6.2	1.0	14	51.9	10	37	2024	No.2420-1	17	28.4	8.6	6.9	1.6	15	88.2	15	88.2	
2022	波方ク-73号**	36	19.7	5.3	6.1	1.4	18	50	7	19.4	2024	精2701-1	15	21.9	6.3	4.9	1.3	6	40.0	6	40.0	
2022	県芦北5号***	35	34.7	7.9	8.2	1.6	4	11.4	1	2.9	2024	精302-1	24	40.9	15.6	7.8	2.3	24	100	19	79.2	
2023	AI-14-1	16	34.9	14.6	6.8	1.5	12	75.0	5	31.3	2024	精304-1	11	26.1	9.2	7.0	2.3	9	81.8	9	81.8	
2023	AI-14-2	36	30.1	10.7	6.9	1.8	33	91.7	28	77.8	2024	仲里-り13-3	24	22.1	7.7	7.7	2.2	19	79.2	17	70.8	
2023	AI-14-3	26	39.3	15.0	8.2	2.4	22	84.6	14	53.8	2024	仲里-り31-2	13	27.5	7.6	6.5	1.6	10	76.9	8	61.5	
2023	AI-16-1	25	38.7	9.4	7.9	1.7	24	96.0	22	88.0	2024	石垣No.3-1	20	28.8	8.7	6.1	1.5	18	90.0	16	80.0	
2023	AI-17-1	35	34.6	11.0	7.4	1.4	34	97.1	34	97.1	2024	石垣No.3-2	20	30.6	11.1	7.2	2.0	16	80.0	13	65.0	
2023	AI-18-1	31	70.6	14.9	11.3	2.1	31	100	26	83.9	2024	石垣No.5-1	12	32.3	10.8	8.7	2.0	9	75.0	8	66.7	
2023	AI-6-1	34	65.0	13.3	10.0	2.3	32	94.1	24	70.6	2024	石垣No.6-1	19	27.0	10.5	6.0	1.8	11	57.9	11	57.9	
2023	No.2413-1	20	35.9	9.5	7.4	1.3	17	85.0	14	70.0	2024	cnt1	*	12	26.8	7.1	6.6	1.7	6	50.0	3	25.0
2023	No.2413-2	23	43.1	11.7	7.4	2.8	20	87.0	18	78.3	2024	cnt4	*	15	24.2	6.7	7.1	2.0	11	73.3	8	53.3
2023	No.2418-1	27	32.4	12.9	7.0	1.8	26	96.3	26	96.3	2024	備前ク-143号	**	15	35.1	6.9	10.2	2.2	12	80.0	9	60.0
2023	No.2419-1	31	46.6	15.2	9.0	2.1	31	100	30	96.8	2024	三崎ク-90号	**	15	22.0	3.0	6.9	1.7	11	73.3	8	53.3
2023	No.2420-1	38	38.1	8.5	7.6	1.5	36	94.7	35	92.1	2024	穎娃ク-425号	**	19	40.8	7.6	11.7	2.7	10	52.6	9	47.4
2023	精302-1	32	67.4	20.5	10.6	3.3	30	93.8	27	84.4	2024	田辺ク-54号	**	20	31.1	5.7	10.5	1.9	6	30.0	4	20.0
2023	精303-1	37	43.5	11.0	8.7	1.9	34	91.9	16	43.2	2024	三豊103	**	16	29.5	7.8	9.6	2.1	3	18.8	0	0.0
											2024	県芦北5号	***	19	48.4	8.5	13.1	2.5	1	5.3	0	0.0

注1) *は非選抜系統

注2) **は抵抗性クロマツ品種

注3) ***は非抵抗性のクロマツ精英樹

イスノキ人工林の密度管理手法の検討

井口 朝道・久高 梢子

1. はじめに

イスノキ(*Distylium racemosum*)は、関東から先島諸島まで分布するマンサク科イスノキ属の常緑高木であり、琉球の照葉樹林を構成する主要種の一つで石灰岩の低地から非石灰岩の山地まで広く生え、防風林や街路樹としての植栽も多い。(大川・林、2016)。

木材の性質は、日本の木材の中でも非常に重いものに属し、気乾比重は平均で 0.9 程度され非常に重硬である。そのため鋸断、鉋削、その他の加工は困難であり、乾燥歩留まりも悪いとされるが、表面仕上げの状態は良好で、心・辺材の色調の差が著しく材面は美しく、耐久性・耐虫性等の保存性は良い(天野、1985)。沖縄県における木材利用としては、古くは建築や家具、楽器等幅広い用途に使用され、紫檀・黒檀の模擬材にも活用されていた(天野、1985)。現在でも三線の棹としての需要は高く特に黒い芯が入った部位は高級材として評価されているが入手が難しい状況となっている(上原、2021)。

このようにイスノキは木材としての需要は高く、沖縄県では、統計資料の残る昭和 60 年度から令和 6 年度までの間に用材利用を目的に 245ha 植栽されており、これはイヌマキ、モクマオウ、リュウキュウマツ(播種含む)に次ぐ造林面積となっている(沖縄県農林水産部、2025)。

そのような中、近年では 8 齢級のイスノキ人工林が成林し、林冠が閉鎖する等、間伐が必要な時期に到達した林分が見られる。しかし、本県では、広葉樹人工林についての密度管理基準が策定されておらず、適正な密度管理手法が示されていないことが課題となっている。

沖縄県における広葉樹人工林の密度管理に関する既往の研究としては、イジュを対象としたものとしては、3 齢級時の人工林の除間伐基準の検討(安里ら、2003)、7 齢級時の人工林の除間伐基準の検討(小多ら、2016)、および 7~8 齢級の人工林の林分構造の把握と適正な密度管理の手法についての検討(井口・玉城、2020)を行った事例がある。またクスノキについては、久高・井口(2025)が、3~13 齢級までの調査を経て密度管理手法の検討を行った。しかし、樹木は成長過程でそれぞれの樹種毎に特有の樹形を示し、同一の密度管理基準を一様に適用することは困難と考えられる。

そこで、本研究では、イスノキ人工林を対象に適正な密度管理手法について検討を行った。

2. 調査地および方法

(1) 調査地の概要

調査地は、2023 年時点で 11 年生の林分に 1 箇所(調査区 A:国頭村辺野喜地内、県営林 60 林班)、20 年生の林分に 1 箇所(調査区 B:国頭村佐手地内、県営林 61 林班)さらに 40 年生の林分 1 箇所(調査区 C:国頭村辺野喜地内、県営林 58 林班)の林齢の異なる計 3 箇所に方形区を設置した(表-1)。

表-1 調査区の概要

調査区	場所	調査時 林齢	植栽年	除伐/間伐 履歴	調査区 サイズ
A	国頭村辺野喜	11	2013	なし	6.5×20
B	国頭村佐手	20	2004	H28,R4	15×15
C	国頭村辺野喜	40	1984	H14,21,30	15×15

(2) 密度管理手法の検討

日本国内におけるスギやヒノキ人工林の密

度管理手法としては、林分密度管理図を用いて収量比数により評価する方法が一般的に用いられるが、林分密度管理図の調整には林齢の散らばりが均等かつ十分な数の林齢の上層木平均樹高データに加え、自然枯死が発生している林分を含む多様かつ十分な数の林分における調査データが求められる（林野庁、2024）。

しかし、本県の広葉樹人工林においては、造林樹種が多岐にわたり、単一の樹種の造林実績が少ないことから、現時点で十分な数の調査地の点数を確保することができず、林分密度管理図の調整は困難な状況である。

そこで、本研究では、沖縄県内におけるイジュ（小多ら、2016；井口・玉城、2020）、クスノキ（久高・井口、2025）における密度管理に関する先行研究に準拠して、胸高直径（DBH）と樹冠の広がりとの関係性に着目し、樹冠を指標とした密度管理基準の検討を行った。

はじめに、胸高直径と樹冠サイズ（樹冠幅または樹冠を楕円と仮定した樹冠面積）の関係を表すモデル式を求めた。次に空間に占める樹冠面積の割合が 78.5%（樹冠を真円と仮定した際に樹冠が互いに接する状態）となる状態を適正密度とし、得られたモデル式から平均胸高直径に対する適正密度を求め、密度管理基準とし間伐に適用することを検討した。

現地調査は、3つの調査区とも 2023 年 12 月に、胸高直径 2cm 以上のイスノキを対象に毎木調査を行い、胸高直径、樹高および直行する 2 方向の樹冠幅（樹冠を見上げたときの直径）を測定した。調査区内にイスノキ以外の侵入種も確認されたが、それらについては調査対象から除外した。また単木材積の算出には、イタジイを主体とする天然性広葉樹立木幹材積表による幹材積式を用いた（高江洲・玉城、1971）。なお、同じ根株から萌芽している場合は、それぞれ 1 本として計上した。

今回調査した林分では、個体間競争により階層構造が出来つつあったが、本研究は、上層

木の密度管理を目的に実施するため、目視によって樹冠の一部が林冠層に到達している個体を上層木と判定し、解析の対象とした。また、台風被害等により、著しく樹冠に折損が見られる個体は、樹冠の発達と直径成長との関係性を正確に示していないと考えられることから、密度管理に関する解析から除外した。

3. 結果及び考察

(1) 調査地の林分構造

表-2 に全木の、表-3 に上層木だけの調査区毎の毎木調査の結果を示す。

全木を対象とした場合、11 年生の調査区 A では、植栽密度は 3,000 本/ha と高く保たれていたのに対し、20 年生の B 区では 2,311 本/ha、40 年生の調査区 C では 1,467 本/ha となり、林齢の経過やこれまでの徐伐や間伐により密度が減少している傾向が確認され（表-2）、上層木でも同様の傾向が見られた（表-3）。また、平均の材積成長量は 40 年生の C 区的全木で 2.75m³/ha・年（110m³/ha を 40 年で除す）となり、これはイタジイを主体とする天然性広葉樹林収穫予想表（高江洲・玉城、1971）の 40 年生林分の 4.4m³/ha・年と比較し、非常に緩慢であることが確認された。

表-2 調査区毎の毎木調査結果（全木）

調査区	本数 (本)	平均 DBH (cm)	平均 樹高 (m)	現況密度 (本/ha)	材積 (m ³ /ha)
A	39	6.6	5.7	3,000	43
B	52	8.6	5.6	2,311	57
C	33	13.0	8.9	1,467	110

表-3 調査区毎の毎木調査結果（上層木）

調査区	本数 (本)	平均 DBH (cm)	平均 樹高 (m)	現況密度 (本/ha)	材積 (m ³ /ha)
A	33	7.0	5.9	2,538	41
B	39	9.7	6.0	1,733	53
C	27	13.6	9.3	1,200	100

次に上層木の直径分布を調査区毎に分けて示す（図-1）。

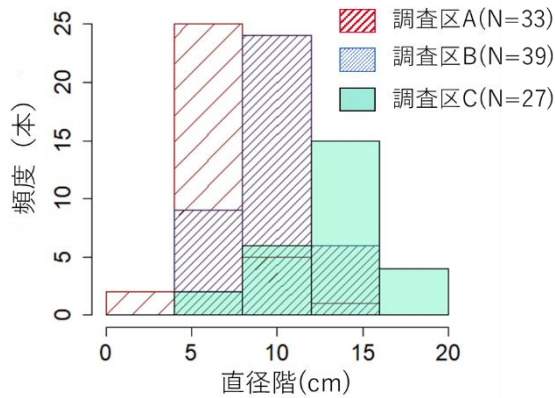


図-1 胸高直径階別本数分布

胸高直径のピークは、11年生の調査区Aでは4-8 cm、22年生の調査区Bは8-12 cm、40年生の調査区Cでは12-16 cmとなり、林齢の増加とともに緩やかではあるが移行していることが確認された。用材利用を生産目標とした場合には、40年生のイスノキ林においても収穫時期には未だ到達しておらず、さらに長い時間が求められる結果となった。

(2) 密度管理手法の検討

図-2 にイスノキの胸高直径と直交する2方向の樹冠幅の平均値（以下、平均樹冠幅）との関係を、図-3 に、胸高直径と直交する2方向の樹冠幅の値から楕円の式により算出した樹冠投影面積の関係を示す。ピアソンの相関分析の結果、胸高直径と平均樹冠幅、および樹冠投影面積には、それぞれ有意 ($p < 0.01$) な正の相関（相関係数：0.85、0.84）が確認され、十分に樹冠を発達させた個体が、着葉量の増加に伴い、大きな直径成長に繋がったことが示唆された。

なお、これらの胸高直径と樹冠の広がりとの正の相関は、先行研究のイジュ（小多ら、2016；井口・玉城、2020）やクスノキ（久高・井口、2025）でも同様の結果が示されており、

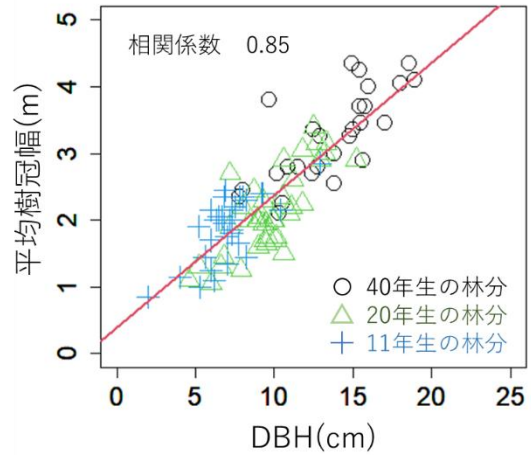


図-2 イスノキの胸高直径と平均樹冠幅の関係

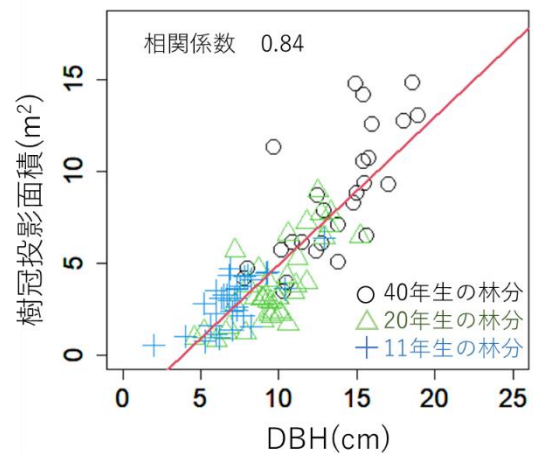


図-3 イスノキの胸高直径と樹冠投影面積の関係

樹種を問わず共通の性質であると考えられる。

ここで、目的変数を平均樹幹幅、または樹冠投影面積、説明変数を胸高直径とした一般線形回帰モデルからそれぞれ次式が得られた。

$$y_1 = 0.19813 \times x + 0.39468 \quad \dots (1)$$

$$y_1 : \text{平均樹冠幅 (m)}, x : \text{胸高直径 (cm)}$$

$$y_2 = 0.80321 \times x - 3.11856 \quad \dots (2)$$

$$y_2 : \text{樹冠投影面積 (m}^2\text{)}, x : \text{胸高直径 (cm)}$$

これらの関係式を用いて、胸高直径に対応した樹冠面積を推定し、空間に占める樹冠面積の割合を任意に設定することにより、その

場合の立木密度が算出される。空間に占める樹冠面積の割合が 78.5%となる時の立木密度を適正密度とし、胸高直径に応じた推定適正密度式を得た (式 (3)、式 (4))。

$$y = 7850 / ((0.19813 \times x + 0.39468)^2 \times 3.14 / 4)$$

…(3) (以下、樹冠幅モデル)

$$y = 7850 / (0.80321 \times x - 3.11856)$$

…(4) (以下、樹冠投影面積モデル)

y : 推定適正密度 (本/ha), x : 胸高直径 (cm)

式 (3)、式 (4) で表される胸高直径と推定適正密度の曲線を図-4 に示す。

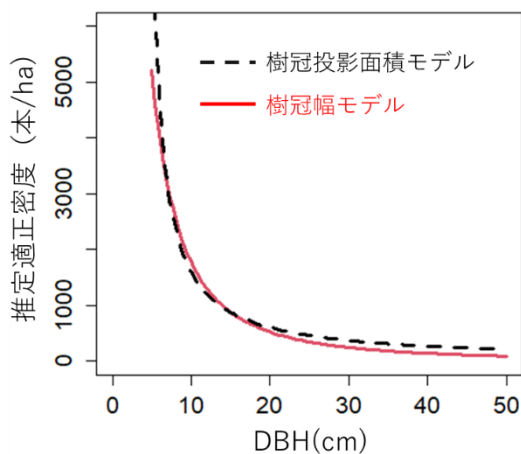


図-4 イスノキの胸高直径と推定適正密度の関係

樹冠投影面積モデルでは、胸高直径が 8-10 cmまで大きくなる過程では、樹冠幅モデルと比較し、やや急な密度変化が生じた。また、胸高直径 20cm 以上では樹冠幅モデルの推定適正密度がわずかに低い結果となった。

次に両モデルから算出した、胸高直径に対する推定適正密度を表-4 に示す。

樹冠投影面積モデルでは、式 (2) の切片が負の値であり、胸高直径が小さい時には樹冠投影面積がマイナスの値をとることから、胸高直径 3 cmにおける推定適正密度について負の値を示した。沖縄北部地域森林計画書(沖縄

表-4 両モデルにより求めた胸高直径に対する推定適正密度

平均DBH (cm)	樹冠幅モデルによる推定適正密度 (本/ha)	樹冠投影面積モデルによる推定適正密度 (本/ha)
3	10,217	-11,073
4	7,091	83,263
5	5,208	8,747
6	3,986	4,616
7	3,149	3,135
8	2,550	2,374
9	2,107	1,910
10	1,770	1,598
11	1,508	1,373
12	1,301	1,204
13	1,133	1,072
14	996	966
15	882	879
20	526	606
25	349	463
30	249	374
35	186	314
40	144	271
45	115	238
50	94	212

県、2023) において、イスノキを含むその他広葉樹の植栽密度は 4,400 本/ha と設定されており、今回提示した推定適正密度は樹冠幅モデルでは胸高直径が 6 cmから、樹冠投影面積モデルでは 7 cmから 4,400 本/ha を下回り、適用可能範囲については両モデル間で大差はなく、それ以降の密度変化についても大きな違いは確認されなかったが、イスノキの成長が非常に遅いことを考慮すると、胸高直径がより小径の場合でも適用可能となる樹冠幅モデルを採用することとした。

なお、このモデルは胸高直径を指標として用いているが、間伐前の平均胸高直径が間伐後も維持されていることが前提となっており、間伐の前後で大きな平均胸高直径の変化が生じるような極端な上層間伐への適用は留意する必要がある。

また、表-4 では、収穫時を想定して便宜的に胸高直径が 50cm までの数値を示しているが、今回の調査において、実際にイスノキの胸高直径と樹冠の広がりとの関係を示すデータが取得できたのは、胸高直径が 20 cm以下である

ため、当面はその範囲内での活用に限定することとし、胸高直径 20cm 以上林分への適用は、今後イスノキ人工林の成長を待ち、追加データが取得できた後に改めて解析を行うことが必要と考えられた。

続いて、各調査区において、表-4 で示す樹冠幅モデルの場合の推定適正密度を基準とした場合の本数間伐率を示す（表-5）。

表-5 樹冠幅モデルにより算出した推定適正密度における各調査区の間伐率

調査区	全本数 (本)	上層木 本数 (本)	平均 DBH (cm)	現況密度 (本/ha)	推定 適正密度 (本/ha)	本数 間伐率 (%)
A	39	33	7.0	2,538	3,119	-23
B	52	39	9.7	1,733	1,866	-8
C	33	27	13.6	1,200	1,043	13

* 平均 DBH、現況密度、推定適正密度は上層木のみを対象にしている

ここで、まず 11 年生の調査区 A、20 年生の調査区 B に着目すると、いずれも推定適正密度より現況密度が小さい値となり、間伐は不用という評価となった。しかし、調査区 A は除伐/間伐が行われたことがない林分でイスノキ以外の侵入樹種も上層木として存在しており、林内は暗い状況であった。本研究で提示する適正推定密度は、目的樹種以外の樹種が上層に存在する場合は、本来は目的樹種と同様に扱い、密度管理を検討する必要がある。しかし、今回の調査では、イスノキの胸高直径と樹冠の広がりとの関係を明らかにすることを主目的としていたため、侵入種の調査を行わなかった。そのため、イスノキ以外の上層木を反映できず、暗い林分でも間伐不用の評価になったと考えられる。よって、実際に間伐の検討を行う際は、樹種を問わず林分に含まれる全ての上層木の現況密度を把握する必要がある。

次に、調査区 B では、調査の前年度に 2 回目となる除伐が実施され、侵入種を含む不要木・

不良木が淘汰されたことで現況密度が低下し、現地調査の際にも樹冠のうっぺい度合いは低いことが目視により確認されたことから妥当な数値と考えられた。40 年生の調査区 C では、現地調査の際には林冠が閉鎖する等、間伐が必要な時期に到達していると考えられたが、推定適正密度にするための本数間伐率は 13% に留まった。

このように、今回の 3 調査区では、これまでの除伐/間伐の効果もあり本数間伐率が高くなりすぎる結果は確認されなかったが、初回の作業の場合や除伐/間伐が遅れの林分では、間伐本数間伐率が高くなりすぎる事も十分に想定される。その際には、本県のように台風が頻繁に襲来する等、風害リスクの高い地域においては、強度な間伐は避けた方がよいとされていることから（森林総合研究所、2010）、実際に間伐を実施する際には、一定の間伐率の上限を設けることがよいと思慮される。ヒノキ人工林におけるモデルシミュレーションでの評価の結果、本数間伐率 30% 以下であれば、比較的根返りが起きにくいと推定されるとの報告があり（森林総合研究所、2010）、樹種は異なるものの、現時点では、この 30% を間伐率の上限として設定することが妥当と考える。

また、実際に間伐を行う際は、林分に含まれる全ての上層木について、イスノキの胸高直径と樹冠の広がりとの関係を適用させた上で残存本数を算出し、樹種、樹木位置、樹形や樹勢などを総合的に判断し選木することとする。

さらに今回の推定適切密度は、あくまで林冠層を構成する上層の密度であり、林冠層の空間競争に関与しない下層から中層の個体は、対象としていない点に留意が必要である。作業の効率性や安全性に支障がなければ、積極的に下層～中層の劣勢木を有用副木として多く残すことで、残存木の幹に陽光が差し、不定枝の発生を防ぐことにつながる（川名・片岡、1986）ほか、階層構造が発達し、生物多様性を

高めることにも寄与できると考えられる。

4. おわりに

本県における広葉樹人工林の間伐については、まさに開始した直後であり、未知な部分が多いのが実態である。そこで、実際に間伐を実施する際には、残存木の今後の成長や収穫時の林分材積、また気象害の有無など様々な視点から間伐の効果を検証する必要があり、適宜、基準の見直しを図ることが求められる。

引用文献

天野鉄夫（1985）沖縄産有用木材の性質と利用：60-62
安里練雄ら（2003）琉球大学農学部学術報告 50：71-75
井口朝道・玉城雅範（2020）沖縄県森研セ研報

61：5-8

川名明、片岡寛純著（1986）造林学－三訂版－：150
久高梢子・井口朝道（2025）沖縄県森研セ研報 65：27-33
小多祥基ら（2016）九州森林研究 69：27-33
沖縄県農林水産部（2023）沖縄県北部地域森林計画書：27
沖縄県農林水産部森林管理課（2025）沖縄の森林・林業 令和7年版：14
大川智史・林将之（2016）ネイチャーガイド琉球の樹木：90
林野庁（2024）森林情報の高度化に向けた条件整備等に関する調査委託事業報告書：94
森林総合研究所（2010）間伐遅れの過密林分のための強度間伐施業のポイント：20
高江洲重一・玉城（1971）琉球政府琉球林業試験場研究報告 14：1-26
上原千香子（2021）島の木の図鑑：26-27

テリハボク人工林の密度管理手法の検討

井口 朝道・久高 梢子

1. はじめに

テリハボク (*Calophyllum inophyllum* L.) は、沖縄諸島 (やや稀) ~ 先島諸島、小笠原に分布するテリハボク科テリハボク属の常緑高木である (大川・林、2016)。屋敷などの防風林に昔から広く植栽される他、海岸林に点在し、大木になる (大川・林、2016)。琉球王府時代から、田地奉行 (王府の農政機関の役人) のもとで、漆器の素材用の農芸植物として、テリハボクの植栽が奨励されたとされ、特に八重山地方では防風・防潮林を兼ねて造林されてきた (天野、1985)。現在においても、海岸防災林や農地防風林等の造成の際の主要な樹種の1つとなっている。

木材の性質としては、切削加工は比較的容易で、交錯木理を持つため逆目が生じるものの、研削後の仕上がりの状態は非常によく、耐久性・保存性も高いとされる (天野、1985)。また、重厚で美しい材であることから、古くから通直な長尺材は建築材、造船材、タンス等に利用され、短尺材は重箱や小道具箱等に使用されてきた (天野、1985)。近年でも、赤目を帯びた色と波打つ木目の美しさから特に宮古・八重山の離島地域の木材関係者からの評価が高く、飲食店での家具材として使用される他、みやこ下地島空港ターミナル内ではテーブルやバーカウンターでも活用されている (沖縄県農林水産部、2019)。

このように木材としての需要の高さを背景に、テリハボクは令和4年度から6年度までの3年間で、宮古・八重山地域の離島地域において計6.59haの実績がある (沖縄県農林水産部、2025; 沖縄県農林水産部、2024; 沖縄県農林水産部、2023)。

そのような中、近年では石垣市有林の6齢級のテリハボク単層林において、林冠が閉鎖する等、間伐が必要な時期に到達している。しかし、本県では、広葉樹人工林についての密度管理基準が策定されておらず、適正な密度管理手法が示されていないことが課題となっている。

沖縄県における広葉樹人工林の密度管理に関する既往の研究としては、イジユを対象としたものとしては、3齢級時の人工林の除間伐基準の検討 (安里ら、2003)、7齢級時の人工林の除間伐基準の検討 (小多ら、2016)、および7~8齢級の人工林の林分構造の把握と適正な密度管理の手法についての検討 (井口・玉城、2020) を行った事例がある。またクスノキについては、久高・井口 (2025) が、3~13齢級までの調査を経て密度管理手法の検討を行った。しかし、樹木は成長の過程でそれぞれの樹種毎に特有の樹形を示し、同一の密度管理基準を一様に適用することは困難と考えられる。

そこで、本研究では、テリハボク人工林を対象に適正な密度管理の手法について検討を行った。

2. 調査地および方法

(1) 調査地の概要

調査地は、2021年時点で29年生の林分に2箇所 (調査区A、B: 石垣市宇浮海地内、石垣市有林71林班)、2022年時点で推定50年生の林分に2箇所 (調査区C、D: 石垣市宇真栄里内、国際農林水産業研究センター 熱帯・島嶼研究拠点内 (以下、JIRCAS)) の計4箇所に方形区を設置した (表-1)。

なお、調査区A、Bは造林事業地で植栽年度

が明確であり、施業履歴として2019年に保育間伐が試行的に実施された。調査区C、Dについては、JIRCASに造成された防風林帯に含まれるテリハボクの単層林であり、正確な植栽年を示す資料は確認できなかったものの、この防風林帯は、1972年のJIRCAS開所以降に造成され、1978年の航空写真(国土地理院)において既に林帯が確認されたことから、植栽年を1973年と仮定し調査時点の林齢を50年生とした。

表-1 調査区の概要

調査区	場所	調査時 林齢	植栽年	間伐 履歴	調査区 サイズ(m)
A	石垣市桴海	29	1993	2019	15×15
B	石垣市桴海	29	1993	2019	15×15
C	石垣市真栄里	50	1973	不明	15×20
D	石垣市真栄里	50	1973	不明	15×15

(2) 密度管理手法の検討

日本国内におけるスギやヒノキ人工林の密度管理手法としては、林分密度管理図を用いて収量比数により評価する方法が一般に用いられるが、林分密度管理図の調整には林齢の散らばりが均等かつ十分な数の林齢の上層木平均樹高データに加え、自然枯死が発生している林分を含む多様かつ十分な数の林分における調査データが求められる(林野庁、2024)。

しかし、本県の広葉樹人工林においては、造林樹種が多岐にわたり、単一の樹種の造林実績が少ないことから、現時点で十分な数の調査地の点数を確保することができず、林分密度管理図の調整は困難な状況である。

そこで、本研究では、沖縄県内におけるイジュ(小多ら、2016;井口・玉城、2020)、クスノキ(久高・井口、2025)における密度管理に関する先行研究にならい、胸高直径(DBH)と樹冠の広がりとの関係性に着目し、樹冠を指標とした密度管理基準の検討を行った。はじめに、胸高直径と樹冠サイズ(樹冠幅または樹冠

を楕円と仮定した樹冠面積)の関係を表すモデル式を求めた。次に空間に占める樹冠面積の割合が78.5%(樹冠を真円と仮定した際に樹冠が互いに接する状態)となる状態を適正密度とし、得られたモデル式から平均胸高直径に対する適正密度を求め、密度管理基準とし間伐に適用することを検討した。

現地調査は、調査区A、Bは2021年11月、調査区C、Dは2022年11月に、胸高直径5cm以上のテリハボクを対象に毎木調査を行い、胸高直径、樹高および直行する2方向の樹冠幅(樹冠を見上げたときの直径)を測定した。また単木材積の算出には、イタジイを主体とする天然性広葉樹立木幹材積表による幹材積式を用いた(高江洲・玉城、1971)。なお、同じ根株から萌芽している場合は、それぞれ1本として計上した。

今回調査した林分では、個体間競争により階層構造が出来つつあったが、本研究は、上層木の密度管理を目的に実施するため、目視によって樹冠の一部が林冠層に到達している個体を上層木と判定し、解析の対象とした。また、台風被害等により、著しく樹冠に折損が見られる個体は、樹冠の発達と直径成長との関係性を正確に示していないと考えられることから、密度管理に関する解析から除外した。

3. 結果及び考察

(1) 調査地の林分構造

表-2に全木の、表-3に上層木だけの調査区毎の毎木調査の結果を示す。

29年生の調査区A、Bでは、2019年に試行的に間伐が実施されたものの、全木を対象とした植栽密度は2,000~3,000本/haと高く保たれていたのに対し、50年生の林分である調査区C、Dでは1,000本/ha以下となり、林齢の経過により密度が減少している傾向が確認された(表-2)。また、同林齢である調査区A、B間を比較すると、全木、上層木のいずれもDBH

と樹高の大きい A 区において密度が少なくなっていた (表-2、表-3)。また B 区では下層木が 9 本存在していたのに対し、より個体サイズの大きい A 区では 2 本と減少しており、下層の劣勢木が個体間競争に負けて消失したことが考えられた。

表-2 調査区毎の毎木調査結果 (全木)

調査区	本数 (本)	平均 DBH (cm)	平均 樹高 (m)	現況密度 (本/ha)	材積 (m ³ /ha)
A	51	15.5	10.9	2,267	285
B	71	11.4	8.1	3,156	170
C	25	32.5	13.7	833	533
D	21	33.7	12.9	933	633

表-3 調査区毎の毎木調査結果 (上層木)

調査区	本数 (本)	平均 DBH (cm)	平均 樹高 (m)	現況密度 (本/ha)	材積 (m ³ /ha)
A	49	15.7	11.0	2,178	282
B	62	11.8	8.4	2,756	161
C	24	32.8	13.8	800	525
D	21	33.7	12.9	933	633

次に上層木の直径分布を林齢の同一な調査区 A、B と調査区 C、D に分けて示す (図-1)。29 年生の調査区 A、B では胸高直径が 25 cm を超える個体もごく一部存在するものの、多くは 10~15 cm であった。

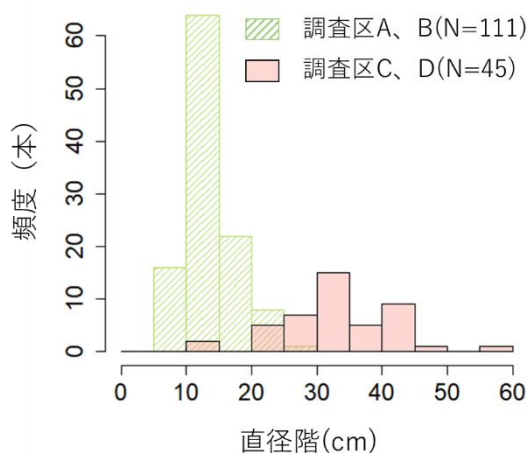


図-1 胸高直径階別本数分布

宮古八重山地域森林計画書 (沖縄県、2022) では、標準伐期齢の指針として、イジュ等広葉樹については 30 年と定められているが、用材利用を生産目標とした場合には収穫時期には未だ到達していなかった。一方で、50 年生の調査区 C、D では、胸高直径のピークは 30~35 cm であり、また 40 cm 以上の個体が約 1/4 存在するなど、本林分は収穫時期に到達していると考えられ、今回の 4 箇所の調査区においては、本数のばらつきはあるものの 5~50 cm までの幅広い一連の直径階のデータが取得できた。

(2) 密度管理手法の検討

図-2 にテリハボクの胸高直径と直交する 2 方向の樹冠幅の平均値 (以下、平均樹冠幅) との関係を示す。図-3 に、胸高直径と直交する 2 方向の樹冠幅の値から楕円の式により算出した樹冠投影面積の関係を示す。ピアソンの相関分析の結果、胸高直径と平均樹冠幅、および樹冠投影面積には、それぞれ有意 ($p < 0.01$) な正の相関 (相関係数: 0.93、0.88) が確認され、十分に樹冠を発達させた個体が、着葉量の増加に伴い、大きな直径成長に繋がったことが示唆された。

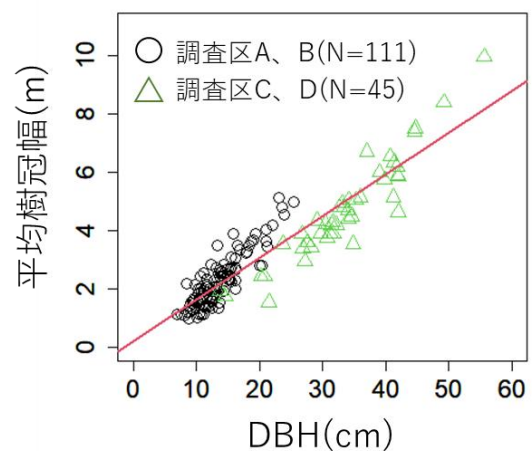


図-2 テリハボクの胸高直径と平均樹冠幅の関係

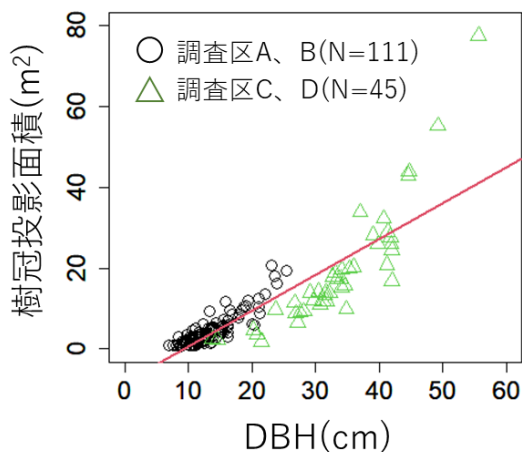


図-3 テリハボクの胸高直径と樹冠投影面積の関係

なお、これらの胸高直径と樹冠の広がりとの正の相関は、先行研究のイジュ（小多ら、2016；井口・玉城、2020）やクスノキ（久高・井口、2025）でも同様の結果が示されており、樹種を問わず共通の性質であると考えられる。

ここで、目的変数を平均樹冠幅、または樹冠投影面積、説明変数を胸高直径とした一般線形回帰モデルからそれぞれ次式が得られた。

$$y_1 = 0.142897 \times x + 0.213887 \quad \dots (1)$$

y_1 : 平均樹冠幅 (m), x : 胸高直径 (cm)

$$y_2 = 0.8873 \times x - 8.3396 \quad \dots (2)$$

y_2 : 樹冠投影面積 (m^2), x : 胸高直径 (cm)

これらの関係式を用いて、胸高直径に対応した樹冠面積を推定し、空間に占める樹冠面積の割合を任意に設定することにより、その場合の立木密度が算出される。空間に占める樹冠面積の割合が 78.5% となる時の立木密度を適正密度とし、胸高直径に応じた推定適正密度式を得た (式 (3)、式 (4))。

$$y = 7850 / ((0.142897 \times x + 0.213887)^2 \times 3.14/4) \quad \dots (3) \text{ (以下、樹冠幅モデル)}$$

$$y = 7850 / (0.8873 \times x - 8.3396)$$

… (4) (以下、樹冠投影面積モデル)

y : 推定適正密度 (本/ha), x : 胸高直径 (cm)

式 (3)、式 (4) で表される胸高直径と推定適正密度の曲線を図-4 に示す。

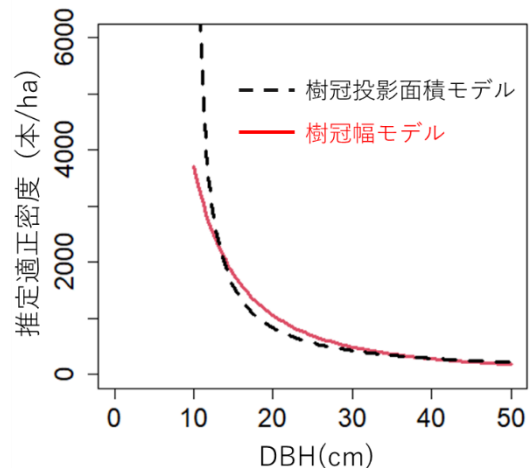


図-4 テリハボクの胸高直径と推定適正密度の関係

樹冠投影面積モデルでは、胸高直径が 10~30 cm まで大きくなる過程で急激な密度変化が生じる一方で、樹冠幅モデルではより緩やかな変化となった。なお、胸高直径 30cm 以上では両者のモデルに大きな差はなかった。

次に両モデルから算出した、胸高直径に対する推定適正密度を表-4 に示す。

樹冠投影面積モデルでは、式 (2) の切片が負の値であり、胸高直径が小さい時には樹冠投影面積がマイナスの値をとることから、胸高直径 9 cm における推定適正密度について負の値を示した。また 10~15cm の密度変化が非常に急激で、小径の場合は現実的には適用し難いと考えられた。

一方で、樹冠幅モデルでは、胸高直径 9 cm では現在の八重山地域における標準的なテリハボクの植栽本数 4,000 本/ha は超えているものの、10cm 以降はそれを下回る数字となっており、また 10~15cm の密度変化が比較的緩やか

に抑えられていた。これより樹冠幅モデルから得られる推定適正密度をテリハボク人工林の密度管理基準として採用することが妥当であると考えられた。

なお、このモデルは胸高直径を指標として用いているが、間伐前の平均胸高直径が間伐後も維持されていることが前提となっており、間伐の前後で大きな平均胸高直径の変化が生じるような極端な上層間伐への適用は留意する必要がある。

表-4 両モデルにより求めた胸高直径に対する推定適正密度

平均DBH (cm)	樹冠幅モデル による推定適正密度 (本/ha)	樹冠投影面積モデル による推定適正密度 (本/ha)
9	4,442	-22,181
10	3,703	14,717
11	3,134	5,525
12	2,687	3,401
13	2,329	2,457
14	2,038	1,923
15	1,799	1,580
20	1,059	835
25	697	567
30	493	429
35	367	346
40	284	289
45	226	249
50	185	218

続いて、各調査区において、表-4 で示す樹冠幅モデルの場合の推定適正密度を密度管理基準として、間伐を行うと仮定した場合の本数間伐率を示す。

表-4 樹冠幅モデルにより算出した推定適正密度における各調査区の間伐率

調査区	全本数 (本)	上層木 本数 (本)	平均 DBH (cm)	現況密度 (本/ha)	推定 適正密度 (本/ha)	本数 間伐率 (%)
A	51	49	15.7	2,178	1,657	24
B	71	62	11.8	2,756	2,766	(0)
C	25	24	32.8	800	415	48
D	21	21	33.7	933	395	58

* 平均 DBH、現況密度、推定適正密度は上層木のみを対象にしている

ここで、まずは 29 年生の調査区 A、B に着目すると、調査区 B では、推定適正密度より現況密度が小さい値となり、間伐は不用という評価となった。これは、本調査区を含む造林地全体が、調査の 2 年前にあたる 2019 年に市の造林事業において保育間伐が行われたことによる影響と推察された。それに対して、調査区 A では本数間伐率が 24%とさらなる間伐の必要性を示す結果となったが、これは調査区 A が B 区と比べ平均胸高直径が 3.9cm 大きく、それに付随して推定適正密度が 1,657 本/ha と B 区の 2,766 本と比較し 1,000 本以上少なく算出されること、また、前回の間伐は、樹高を基に算出される相対幹距を参考に間伐率の設定がされるなど今回の胸高直径を基準とする手法とは根本的に異なっていることが要因であると考えられた。

次に、50 年生の C、D 区をみると、本数間伐率は、48%、58%といずれも非常に高い値を示した。この二つ調査区のこれまでの正確な間伐の履歴は不明であるが、最近において上層木の間伐はされていないとのことであり、また目視による評価では、現況の樹冠のうっぺい度合いは 2 年前に間伐が実施された A、B 区より高かった。このように間伐の履歴がない、もしくは前回の間伐から長期間が経過しており、現況の込み合い度が高くなる場合は、本数間伐率が高くなり過ぎる場合が生じる可能性がある。さらに、C、D の 2 区では、平均の胸高直径が 30 cm を超えており、それに伴い適切密度が 400 本/ha と低く推定されていることも本数間伐率を上昇させた要因の 1 つと考えられた。しかし、樹種は異なるものの、熊本県 (2023) はセンダンの間伐後の密度として胸高直径 35 cm 時点で 70 本/ha を示しており、枝を周囲に広範囲に伸ばし、樹冠を広げる性質の強い広葉樹の場合、今回適正と推定した約 400 本/ha が極端に低い密度ではないと考えられた。

一方で、本県のように台風が頻繁に襲来す

る等、風害リスクの高い地域においては、強度な間伐は避けた方がよいとされていることから（森林総合研究所、2010）、実際に間伐を実施する際には、一定の間伐率の上限を設けることがよいと思慮される。ヒノキ人工林におけるモデルシミュレーションでの評価の結果、本数間伐率 30%以下であれば、比較的根返りが起きにくいと推定されるとの報告があり（森林総合研究所、2010）、樹種は異なるものの、現時点では、この 30%を間伐率の上限として設定することが妥当と考える。

なお、本研究で提示する立木密度としては、仮にテリハボク以外の有用木が上層木として存在している場合は、それらの樹冠と胸高直径の関係もテリハボクのそれと同等と扱うことで上層木として含めた上で、実際に間伐を行う際は、樹種、樹木位置、樹形や樹勢などを総合的に判断し選木することとする。また、今回の推定適正密度は、あくまで林冠層を構成する上層の密度であり、林冠層の空間競争に関与しない下層から中層の個体は、対象としていない点に留意が必要である。作業の効率性や安全性に支障がなければ、積極的に下層～中層の劣勢木を有用副木として多く残すことで、残存木の幹に陽光が差し、不定枝の発生を防ぐことにつながる（川名・片岡、1986）ほか、階層構造が発達し、生物多様性を高めることにも寄与できると考えられる。

4. おわりに

本県における広葉樹人工林の間伐については、まさに開始した直後であり、未知な部分が多いのが実態である。そこで、実際に間伐を実施する際には、残存木の今後の成長や収穫時の林分材積、また気象害の有無など様々な視

点から間伐の効果を検証する必要がある、適宜、基準の見直しを図ることが求められる。

引用文献

- 天野鉄夫（1985）沖縄産有用木材の性質と利用：78-80
安里練雄ら（2003）琉球大学農学部学術報告 50：71-75
井口朝道・玉城雅範（2020）沖縄県森研セ研報 61：5-8
川名明、片岡寛純著（1986）造林学—三訂版—：150
久高梢子・井口朝道（2025）沖縄県森研セ研報 65:27-33
熊本県林業研究・研修センター（2023）センダンの育成方法（令和5年度 改訂版）：13
小多祥基ら（2016）九州森林研究 69：27-33
沖縄県農林水産部（1984）県産材利用開発調査報告書
沖縄県農林水産部森林管理課（2020）おきなわの木 宮古・八重山編：8-9
沖縄県農林水産部森林管理課（2023）沖縄の森林・林業 令和5年版：14
沖縄県農林水産部森林管理課（2024）沖縄の森林・林業 令和6年版：14
沖縄県農林水産部森林管理課（2025）沖縄の森林・林業 令和7年版：14
大川智史・林将之（2016）ネイチャーガイド琉球の樹木：226
林野庁（2024）森林情報の高度化に向けた条件整備等に関する調査委託事業報告書：94
森林総合研究所（2010）間伐遅れの過密林分のための強度間伐施業のポイント：20
高江洲重一・玉城（1971）琉球政府琉球林業試験場研究報告 14：1-26

スマート林業の実証に向けた研究 I

-UAV 撮影画像を用いたナンヨウスギ林の森林資源情報の把握-

井口 朝道

1. はじめに

森林は木材の生産のみならず、国土の保全や水源涵養、地球温暖化防止等の多面的機能を有する貴重な資源であり、特に沖縄県においては周囲を海に囲まれ台風の常襲地帯であることから古くから防潮・防風林の重要性が広く認識されてきた。また近年は、特に沖縄島北部地域や西表島の森林を基盤とする固有の生態系の貴重な価値が認識され、生物多様性保全の観点からも森林の重要性はますます高まっている。このように重要な役割を担う森林を将来の世代に渡って保全することが世界的に求められており、持続可能な開発目標（SDGs）に注目が高まる中、森林については目標 15 に「持続可能な森林の経営」が掲げられている（林野庁、2024）。この目標の下に設定されているターゲットの 1 つである持続可能な森林管理を進めるためには、現在の森林資源の正確な情報を取得し、実効性の高い森林施業に関する計画を策定することが求められる。

森林の所在や所有者、面積、樹種および材積等の森林の情報は、都道府県が林小班を単位として策定する森林簿において管理されることとなっている。しかし、本県では、台風や松くい虫等による森林被害の実態を正確に森林簿に反映させることは現実的に厳しい状況であり、また材積についても現状は主要な樹種毎に林齢に応じた成長曲線により算出しているが、地位指数などの立地環境に応じたきめ細やかな管理は出来ていない状況にある。このことから特に樹種や資源量については、一部に森林簿上の記載内容と現実林分との間

に乖離があることが課題となっている（白石則彦、1999）。

そのため正確な森林資源情報の把握には現地調査が必要となるが、森林面積は非常に広大であり、また森林にアクセスするための路網も限られているため、林分全体を現地調査により確認することは、莫大なコストと労力を要し、実質的には極めて困難である。

そのような中、近年技術革新が進む、インターネット通信に基づく情報共有等のクラウド技術や UAV（Unmanned Aerial Vehicle：無人航空機、ドローンと同意）を含むロボット技術、さらに AI 技術による自動判別などの基盤技術等を背景に、急速に発展している「スマート林業（デジタル管理・ICT による林業、安全で高効率な自動化機械による林業）」（林野庁、2023）に大きな期待が高まっている。現在、スマート林業の 1 つとして、森林 GIS を基盤として、航空レーザーや UAV 等の情報通信技術（ICT）で得たデータを組み合わせることで、広範囲の森林を対象に、効率的に森林資源の情報を把握し、木材需給システムによる木材流通効率化に繋げる取り組みが全国各地で試験的に導入されている（林野庁、2023）。また、2020 年 4 月には、作業の効率化や省力化を目的に、植え付けや下刈、間伐などの補助造林事業の申請や検査に UAV の利用が可能となった。これを受けて、九州では UAV 撮影画像から列状間伐における間伐本数の判定精度を検証する研究事例も報告されている（上野ほか、2022）。

今後、沖縄県においてもスマート林業を推進するためには、植生の異なる沖縄の森林を対象とした森林資源情報の把握に関する精度

検証を積み重ねていく必要がある。これまで、本県では、UAV 撮影画像における RGB 値や HSV 値 (H:色相、S:彩度、V:明度) を用いてリュウキュウマツと広葉樹の識別を試みる例が報告されているものの (岸本・高嶋、2024)、その内容は限定的であり、スマート林業の実証に向けたデータの蓄積は不十分である。

そこで、本研究は、全国的な代表樹種であるスギと比較的形狀に近いナンヨウスギを対象に、UAV 撮影画像から作成した DSM (Digital Surface Model: 数値表層モデル) を用いた樹高の測定精度および樹木の検出精度を把握することを目的に実施した。また、その前段として UAV 撮影画像の GCP (Ground Control Point: 地上基準点) の使用状況による位置精度を検証したので併せて報告する。

2. 材料および方法

1) GCP の設置状況による UAV 撮影画像の位置精度の検証

試験地は、東村慶佐次地内の県営林 66 林班内のナンヨウスギ林一帯である。UAV として Matrice100 (DJI 社) を使用して、自動飛行アプリ GSPPro (DJI 社) により 2023 年 9 月 8 日および 10 日のいずれも 10 時台に撮影を行った。なお、撮影条件は表-1 の通りである。

この際、地上に誤差 cm 級の GCP を北側に 4 点、南側に 3 点の計 7 点を設置し (図-1)、航空標識で上空から識別できるようにした。なお、GCP の設置には GNSS 内蔵ハンドヘルド (Trimble Geo7x、ニコントリンブル社) を使用した。

オルソ画像および DSM の作成には、画像処理ソフト Pix4Dmapper (Pix4D 社) を用いた。この際、①GCP を使用しない (以下、no)、②北部 4 点の GCP を使用 (以下、north4)、③南部 3 点の GCP を使用 (以下、south3)、④全 7 点の GCP を使用 (以下、all) の異なる GCP 使用状況毎に位置を補正し画像処理を行

い、それぞれのオルソ画像での航空標識の中心位置と実際の GCP との水平距離を水平誤差として算出した (図-2)。また画像上の標識の中心位置の DSM から高さ情報を取得し、鉛直誤差を算出した。

さらに、8 日の撮影画像を用いて、北側を起点とし南北を横断する直線 (図-1) について異なる GCP 使用状況毎の DSM を用いて断面図を作成し、all の断面図に対する no、north4、south3 の断面図のずれを評価した。この断面図の作成には、QGIS 3.22.9 の Terrain Profile を用いた。

表-1 UAV の撮影条件

項目	条件
使用カメラ	Zenmuse X3 (DJI社)
有効画素数	1,240万画素
飛行高度	93m
オーバーラップ率	前方90%,側面80%
地上解像度	4cm/pix



図-1 調査地と GCP 設置状況 (赤線は断面図のライン、赤枠は樹高の精度検証の調査地)



図-2 水平誤差の算出方法の例

2) UAV 撮影画像を用いたナンヨウスギ林の樹高測定精度検証

調査地（面積：863m²）は、1）と同様に東村慶佐次地内の県営林 66 林班内の地形が平坦なナンヨウスギ林に設置した（図-1、3）。UAV の使用機器や撮影条件、および画像処理に使用したソフトは1）と同様であり、解析には2023年9月8日撮影分を用いて、GCPとしては全7点を使用し位置の補正を行った。QGIS 3.22.9を用いて、作成したDSM（4cm解像度）からDEM（Digital Elevation Model：数値標高モデル、1m解像度、航空レーザー由来）を差し引くことでDCHM（デジタル樹冠高モデル）を作成し、10cm解像度に圧縮した（図-3）。現地調査や各種画像から樹頂点をGIS上で定め（図-3）、その点から半径25cmの円形バッファを発生させ、範囲内のDCHMの最大値をUAV由来の樹高推定値とした。

毎木調査は9月25日に行い、樹高約14m以下は12mの測桿、14m以上はトゥルーパルス360（LASER TECHNOLOGY社）を用いて測定し、現地調査の値を真値としてUAV由来の樹高推定値から差し引き樹高推定誤差とした。なお、一部の個体については、10月10日に現地で樹高を再測した。

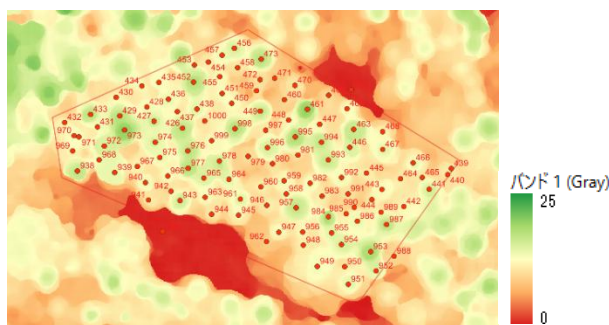


図-3 調査地の樹木位置と DCHM

3) UAV 撮影画像を用いたナンヨウスギ林の樹木検出の精度検証

調査地は2）と同じであり、UAVの撮影条件の詳細やオルソ画像およびDSM、DCHMの作成方法についても2）と同様である（図-1、3）。

樹木検出は、局所最大値法とし、統計ソフトRのPackageであるLidarRtree(ver. 4.0.5)のtree detection関数を用いて行った。この際、元画像として、①DCHMを用いる場合と、②DCHMから尾根谷度に変換したモデルを使用する2つの手法を用いて試みた。ここで尾根谷度は、(地上開度-地下開度)/2で算出され、尾根や谷の度合いを表す指標(千葉・鈴木、2004)であり、一般に地形解析に用いられることが多い因子であるが、今回は樹木1本1本の凹凸を表現するために使用し、QGISのSAGA2.3.2のtopographic opennessにより算出した。

現地での毎木調査は9月25日に行い、樹種、樹高、被圧の状況（上層木、下層木）について確認し、樹木位置は現地調査と併せて各種画像も活用しGIS上で決定した。なお、樹木検出の精度検証は上空から樹冠が確認できる上層木のみを対象にした。

樹木検出の精度評価は、Precision(=TP/TP+FP)、Recall(=TP/TP+FN)により行った。なお、TP、FP、FNの用語の意味は図-4のとおりである。

True Positive(TP)

物体を検出したと予測し、その予測が正しい場合

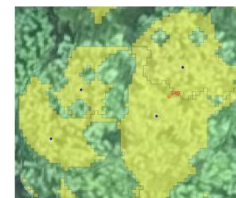
右図では2本予測し、実際に2本存在する



False Positive(FP)

物体を検出したと予測したが、実際は存在しない場合

右図では4本予測したが、実際は1本のみ存在する



False Negative(FN)

実際は物体が存在するが、検出されない場合

右図では検出されなかったが、実際は1本存在する



図-4 樹木検出の精度評価に用いる指標
(上：TP、中：FP、下：FN)

さらに、樹木の検出精度に及ぼす影響について把握するため、周囲の樹木との位置関係を示す指標として競争指数を算出した。ここで、本研究における競争指数は、①対象木から全ての木との水平距離を算出、②対象木と全ての木の樹高差(周囲の木の樹高-対象木の樹高)を計算、③1つの対象木について全ての周囲の木との組み合わせで競争指数(=樹高差/距離)とし、③の競争指数の最大値を、その対象木における最大競争指数とした。

3. 結果および考察

1) GCP の設置状況による UAV 撮影画像の位置精度の検証

GCP 使用状況毎の GCP 位置における水平誤差および鉛直誤差について、2 日分のデータを統合して図-5 に示す。ここで9月8日撮影分は全7点視認できたが、10日撮影分については1点が周囲の木に隠れGIS上で確認できなかったため6点となり、計13点を解析に用いた。

全7点のGCPを使用したallについては、全箇所水平誤差、鉛直誤差が20cm以下であったのに対し、noでは、水平誤差は2~5m程度、鉛直誤差は2~8mとなり、GCPを全く使用しない場合は位置のずれがm単位で発生し、位置精度が悪化することが明らかとなった。片側のみのGCPを活用したnorth4、south3の場合は、水平誤差、鉛直誤差ともにnoに比較すると誤差は改善傾向がみられたが、north4の鉛直誤差については8日撮影分について、GCPを使用していない南部のGCP3点での誤差が2m程度発生する現象がみられた。水平誤差および鉛直誤差についてGCP使用状況区分に応じて多重比較(Holm法)を行ったところ、いずれもno>all、north4、south3となり、GCPを使用することで有意に誤差が小さくなることを確認された(p<0.01、図-5)。

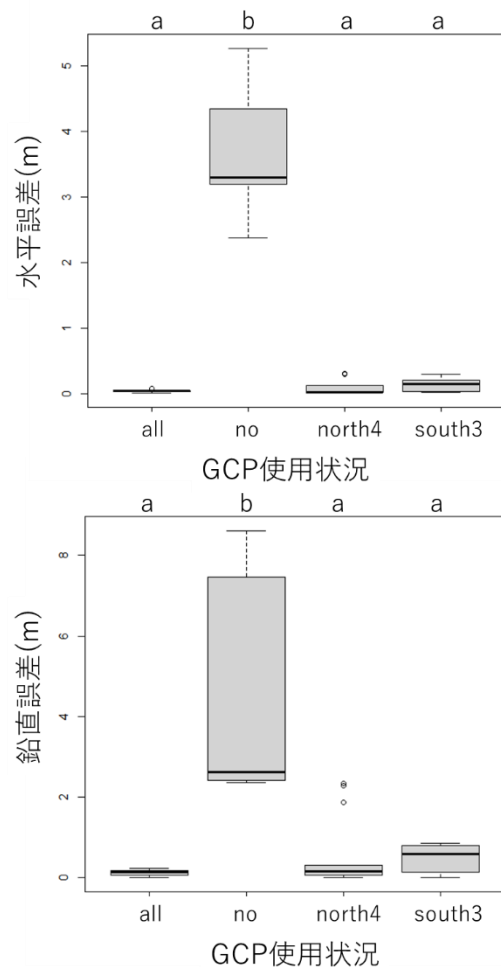


図-5 GCP 使用状況毎の GCP 位置における誤差 (上: 水平誤差、下: 鉛直誤差)

* 図の異なるアルファベットは多重比較検定で有意差があることを示す(p<0.01)

次に面的に誤差を把握するため、8日撮影分のallとnoの横断図を図-6上に示す。noがallと比較し、水平方向にはnorth側に、鉛直方向では全体的に2.5m程度プラス側にずれが生じていることが分かる。一方でnorth側のGCP4点で位置を補正したnorth4とallを比較すると、水平方向では全体的に誤差が改善しているが、鉛直方向ではnorth側では補正されているものの、south側に行くにつれ、プラス側に誤差が大きくなる傾向がみられ、最終的には2m以上となった(図-6中)。なお、同じ設定で撮影を行った13日分の画像では、同様な現象は確認されなかった

(図省略)。south側のGCP3点で位置を補正したsouth3とallでは、補正していないnorth側で最終的に80cm程度の鉛直誤差が確認された(図-6下)。

以上の点から、鉛直方向の数値を用いる樹高推定誤差を低減するには、目的の林分の片側だけでなく両側にバランスよくGCPを設置し、使用することが有効であると確認された。

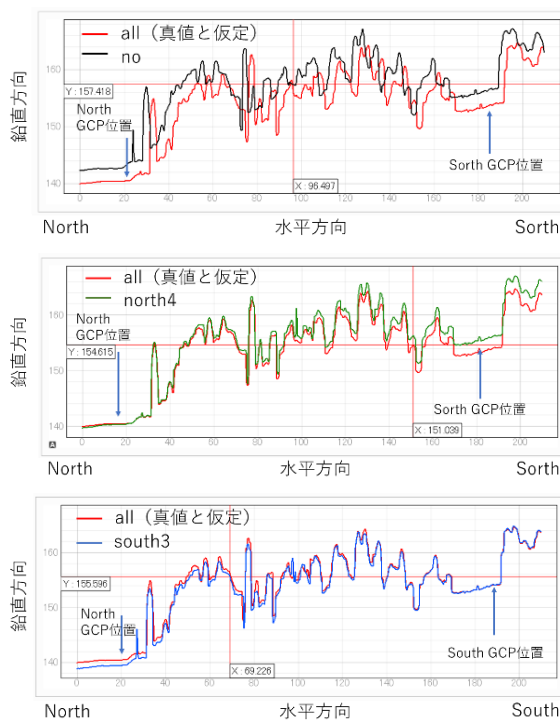


図-6 GCP使用状況毎の断面図上での誤差
(上: no、中: north4、下: south3)

2) UAV 撮影画像を用いたナンヨウスギ林の樹高測定の精度検証

調査地の林分では、ナンヨウスギおよび侵入した広葉樹が、それぞれ102本、9本(イジュ、ホルトノキ等)で計111本(約1,300本/ha)が確認された。全ての個体の樹高推定誤差の頻度分布を図-7に示す。多くは-1m~+1mに集中しているものの、一部で2m以上過大に推定しているものが確認された。これは、UAV由来のDSMでは、林冠表面の情報しか反映されず、林分内の完全に被圧された個体の情報は正確に読み取れないためと考えられた。

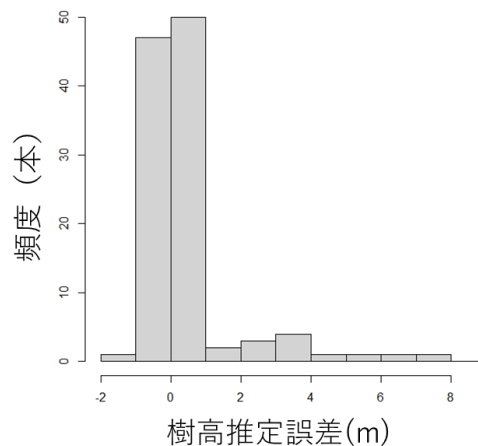


図-7 樹高推定誤差の頻度分布(全個体)

そこで、現地調査の際に被圧個体と判断された12本を除いた上層木99個体の樹高推定誤差の頻度分布を図-8に示す。上層木では、誤差はほとんど-1m~+1m内に収まり、±1mを超えるものはわずかであった。また、ヒストグラムの形状から過大側また過小側に偏る傾向は確認されなかった。

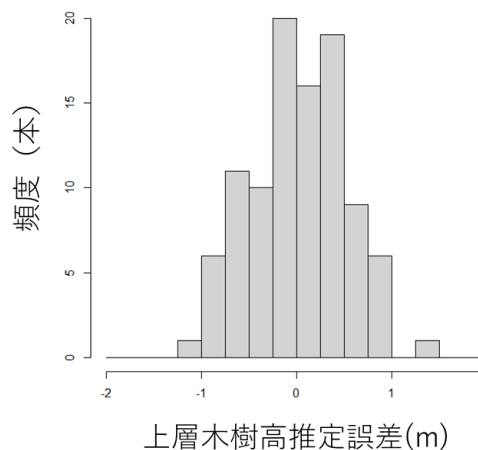


図-8 樹高推定誤差の頻度分布(上層木)

次に、現地調査での実測値をy軸に、UAV由来の樹高推定値をx軸にとった散布図(上層木のみ)を図-9に示す。図上の実線はy=xの線であり、線より左側だと過小推定、右側だと過大推定となるが、樹高の大小にかかわらず、多くは1対1の線上付近に集まり、樹高推定誤差に特定の傾向は見られなかった。

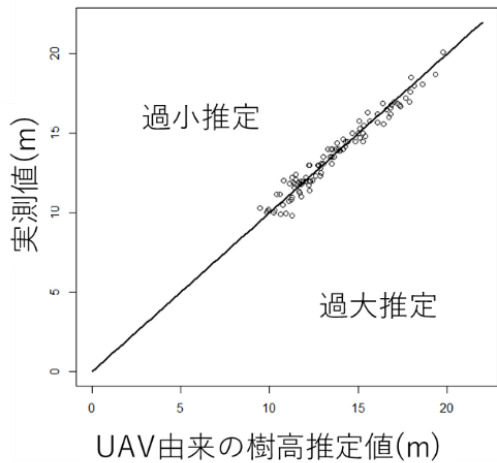


図-9 UAV 由来の樹高推定値と実測値の関係 (上層木)

また、RMSE (二乗平均平方誤差) は 0.50m と 1m 以下に抑えられ (表-2)、精度よく推定されていた。なお、解析当初は誤差が大きく現地で再度確認した個体が 9 本 (約 8%) あったが、いずれも現地での初回計測値が間違っており、再測によって修正した。このように現地調査では、測桿の伸長の不具合や測定者と野帳記入者間の連絡ミスなど、一定の確率で人為による不測の誤りが発生する懸念がある。また、今回の調査では単木毎の誤差に着目した RMSE は 0.5m と小さい上に、さらに誤差の発生には特定の傾向が見られず、林分全体としてみた場合の平均誤差は 0.02m と非常に小さくなり (表-2)、単木でのプラスマイナス両方向の誤差が、林分全体ではそれぞれ打ち消される方向に働くことを考慮すれば、UAV 撮影による上層木の樹高推定は現場で十分に使用可能だと思慮された。

表-2 ナンヨウスギ林の樹高推定誤差 (上層木のみ)

個体数 (本)	RMSE (m)	平均誤差 (m)
99	0.50	0.02

3) UAV 撮影画像を用いたナンヨウスギ林の樹木検出の精度検証

調査地の林分では、上層木としてはナンヨウスギおよび侵入した広葉樹が、それぞれ 90 本、9 本 (イジュ、ホルトノキ等) で計 99 本 (約 1,150 本/ha) が確認された。

DCHM および尾根谷度から樹木検出を試みた結果を表-3、図-10 に示す。DCHM を用いた場合では Precision は 100% (56/56) となり、樹木があると予測した場合は全て樹木が実在している結果となった。Recall については、局所的に高い木が周囲の低い木を取り込むような形となり 57% (56/99) と見逃しが多くなる傾向がみられた。

一方、尾根谷度を用いた場合では、広葉樹 1 個体を複数の個体に誤認識したことで空振りが発生し Precision は 92% (77/84) と若干精度が低下した。Recall については、78% (77/99) となり、DCHM を使用した場合と比

表-3 使用画像毎の樹木検出 (全樹種) の結果 (上: DCHM、下: 尾根谷度)

		DCHMによる検出 (予測)		
		検出	不検出	計
実況	存在	56	43	99
	不在	0	-	
	計	56		
Precision		56	=	100%
予測精度、正確さ		56		
Recall		56	=	57%
再現率		99		
		尾根谷度による検出 (予測)		
		検出	不検出	計
実況	存在	77	22	99
	不在	7	-	
	計	84		
Precision		77	=	92%
予測精度、正確さ		84		
Recall		77	=	78%
再現率		99		

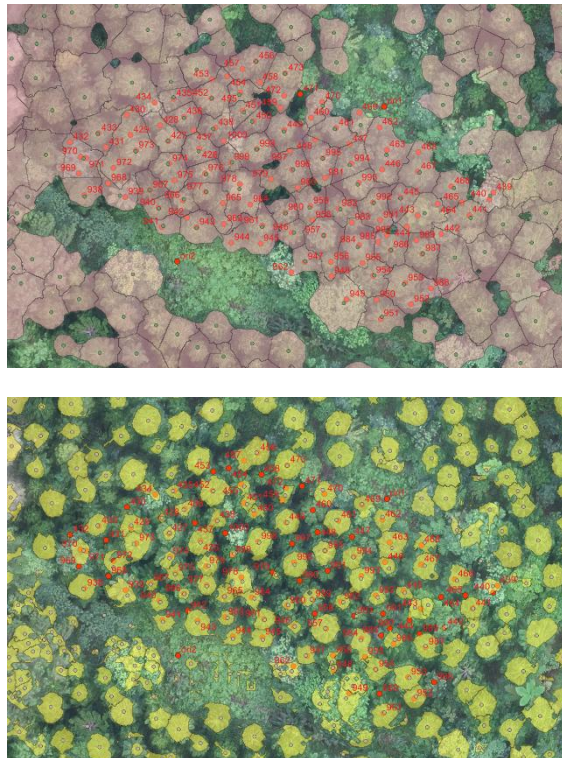


図-10 使用画像毎の樹木検出（全樹種）の結果（左：DCHM、右：尾根谷度）

較して見逃しは改善したが、依然、局所的に高い木の周囲にある低い木は検出されにくい傾向が確認された。

次に樹頂点が明瞭なナンヨウスギのみを対象にした使用画像毎の樹木検出の結果を表-4に示す。尾根谷度による検出では、Precisionは100% (71/71) となり、対象をナンヨウスギに限定したことで予測精度が向上した。一方で、Recallは、79% (71/90) とDCHMを用いた場合の58% (52/90) と比較すると向上したものの、上層木のナンヨウスギに限定した場合でも一定程度の見逃しは発生することが明らかとなった。

さらに、樹木の検出精度に及ぼす影響について把握するため、樹木の検出（尾根谷度による）の有無（1：検出、0：不検出、）を目的変数、周囲の樹木との関係を示す最大競争指数を説明変数として、ロジスティック回帰分析を行ったところ、最大競争数が大きくなるほど検出精度が有意に低下することが明らか

となった（図-11）。また、検出割合については最大競争指数が1（樹高差と樹木間距離が等しい=見上げ角45度）の場合は90%を超え、競争指数が3（樹高差が樹木間距離の3倍=見上げ角約72度）では15%と大幅に低下することが予測された。

表-4 使用画像毎の樹木検出（ナンヨウスギ）の結果（上：DCHM、下：尾根谷度）

DCHMによる検出（予測）				
		検出	不検出	計
実況	存在	52	38	90
	不在	0	-	
計		52		
Precision		52	=	100%
予測精度、正確さ		52	=	
Recall		52	=	58%
再現率		90	=	

尾根谷度による検出（予測）				
		検出	不検出	計
実況	存在	71	19	90
	不在	0	-	
計		71		
Precision		71	=	100%
予測精度、正確さ		71	=	
Recall		71	=	79%
再現率		90	=	

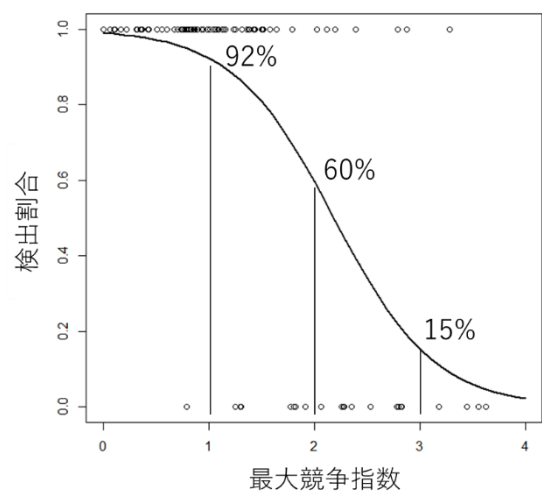


図-11 樹木の検出の割合と最大競争指数の関係

4. まとめ

本報では UAV 撮影画像を用いてナンヨウスギ林の森林資源情報の把握を試みた。特に森林の資源量の指標となり、DSM から直接推定することが出来る樹高に着目し、さらに密度管理の実現性を検討するため樹木検出についての精度評価を行った。またその前提として、GCP 使用状況に応じた UAV 撮影画像の位置精度についても検証した。

まず、画像の位置情報については GCP を全く使用しない場合では、水平方向・垂直方向いずれも誤差が大きくなり、樹高を表す DCHM の精度が著しく低下することが判明した。また調査対象林分の片側だけに GCP を設置した場合は、水平方向の誤差とその地点付近の鉛直方向の誤差は正確に補正できるが、遠ざかるにつれ鉛直方向誤差が大きくなる現象が確認され、GCP をバランスよく配置する必要があることが明らかとなった。なお、本研究で使用した UAV は RTK 測位に対応していないが、現在は対応した機種が複数販売されており、これらの UAV を利用した場合の位置精度については改めて検証が必要であると考ええる。

次に画像の位置情報を適切に補正した上で、樹高の推定精度については、上層木に限った場合、RMSE は 0.5m と小さく、さらに誤差の発生には特定の傾向が見られず林分全体ではそれぞれの誤差が打ち消されることを考慮すれば、実際の現場で十分に使用可能だと考慮された。ただし、今回の調査対象林分は平坦地であり、傾斜の大きい斜面では樹木が真上に伸びず谷部に向かって前傾することがある。このような場合は樹頂点と根元位置との間に水平方向の誤差が生じるため樹高は正しく測定できないことに留意する必要がある。

さらに密度管理を目的として行った樹木の検出精度について、DCHM をそのまま使用するのではなく、尾根谷度に変換した上で検出を行うことで、樹頂点が明瞭なナンヨウスギの

上層木では、Precision は 100%、また Recall は約 80%まで精度は上昇したが、最大競争指数が大きい周囲に被圧されつつある樹木については、検出は困難であることが分かった。

このように本研究では、スギと樹形の近いナンヨウスギを対象にして樹高推定と樹木検出についての精度を明らかにしたが、本県の森林は広葉樹主体であり、また沖縄の針葉樹の代表種であるリュウキュウマツ林の価値も高いため、これらの林分を対象にした場合における精度の検証が求められる。さらに、森林資源の情報は多岐に渡り、特に樹種については森林施業の計画には不可欠な項目であるため、少なくとも広葉樹林とリュウキュウマツ林を精度よく判読する技術が求められる。

このように、全国と植生の異なる沖縄の森林を対象とした各種の森林資源情報の把握に関する精度検証を積み重ねていくことにより、沖縄県におけるスマート林業を実証することが、将来の沖縄県の林業・木材産業の発展には重要と考える。

謝辞

本研究は、九州大学 農学研究院 森林計画学研究室の溝上教授および太田准教授から解析手法についてご教授頂き実施しており、この場を借りて感謝申し上げます。

引用文献

- 千葉達朗・鈴木雄介 (2004) 応用測量論文集 15:81-89
- 岸本咲紀・高嶋敦史 (2024) 九州森林研究 77: 161-164
- 林野庁 (2023) スマート林業実践マニュアル 総集編: 2-3
- 林野庁 (2024) 令和 5 年度 森林・林業白書: 39
- 白石 則彦 (1999) 森林科学 27:35-37
- 上野 綾ほか (2022) 九州森林研究 75:31-34