

平成 29 年度
亜熱帯森林・林業研究会
研究発表論文集

フクギ (学名 : *Garcinia subelliptica* Merr.)

亜熱帯森林・林業研究会

〒905-0012 沖縄県名護市字名護 4605-5

沖縄県 農林水産部 森林資源研究センター内

Phone 0980-52-2091 Fax 0980-53-3305

目 次

論 文

- 沖縄県における木造建築物で経年使用されている木材の
力学特性に関する研究

琉球大学理工学研究科 尾身 頌吾
琉球大学工学部建築学コース カストロ ホワン ホセ

- 沖縄県産木材の建築構造用部材への利用可能性に関する基礎的な研究

琉球大学理工学研究科 大城 光太郎
琉球大学工学部建築学コース カストロ ホワン ホセ

- フクギのさし穂の形状が発根率に与える影響

森林総合研究所 林木育種センター 西表熱帯林育種技術園 千吉良 治
森林総合研究所 林木育種センター 海外協力部 松下 通也
森林総合研究所 林木育種センター 西表熱帯林育種技術園 楠城 時彦
古本 良
森林総合研究所 林木育種センター 関西育種場 加藤 智子
和歌山県立有田中央高等学校総合学科 仲里 長浩

情 報

- リュウキュウマツにおけるマツノザイセンチュウ抵抗性候補木の選抜

沖縄県森林資源研究センター 玉城 雅範

- デイゴヒメバチ *Quadrastichus erythrinae* の天敵デイゴカタビロコ
バチ *Eurytoma erythrinae* の環境影響評価

沖縄県森林資源研究センター 安田 慶次
喜友名 朝次
清水 優子
玉城 雅範

ご挨拶

まずは会として、北部九州集中豪雨により被害を受けた方にお見舞い申し上げます。

平成 29 年度亜熱帯森林・林業研究会を開催するにあたりご挨拶申し上げます。

本日は会員の皆様をはじめ、亜熱帯森林・林業研究会に関心をお持ちの皆様にご参加いただき、ありがとうございます。

今年の研究発表会には、午前の部と午後の部に渡って、21 件の口頭発表と 1 件のポスター展示が行われ、計 22 件の発表数となりました。これも、亜熱帯森林・林業に対する関心の高さと発表者の皆様の努力の賜であると感じております。

さて、沖縄県では、昨年 9 月に沖縄島北部の森林地域が 33 番目の国立公園「やんばる国立公園」として指定されたところです。やんばる国立公園は、国内最大級の亜熱帯照葉樹林で、ヤンバルクイナやノグチゲラ等希少動植物の生息・生育の場となっています。さらには、このような自然環境下で育まれてきた伝統的な生活様式が認められる地域です。今後は、奄美群島及び西表島とともに、世界自然遺産への登録に向けた取組が加速されるものと思われまます。

さらに、やんばる国立公園の指定の後、隣接する米軍北部訓練場 7,500 ヘクタールのうち、約 4,000 ヘクタールが昨年 12 月に返還されました。約 60 年に渡って米軍の演習地として利用されてきたため、環境影響調査が必要な地域です。一方で、伐採などの施業が行われていないため、自然生態系が維持されている可能性があり、新たな情報が得られることが期待されます。

また、国内では昨年 5 月に閣議決定された森林・林業計画において、森林の適切な整備・保全と循環的な資源利用により、地球温暖化防止への寄与や水源涵養などの森林機能発揮による環境負荷の少ない社会の形成が提言されているところです。今回の研究発表会においても、森林の維持・管理に関する研究や循環的な資源利用についての研究発表がなされており、亜熱帯森林の持続的な活用に生かされるものと考えております。

最後に、発表者の方々には、ご多忙の中、報告を取りまとめ、話題を提供していただいたことを心から感謝申し上げ、本会の活動がさらに有意義なものとなることを期待して会長あいさつとします。

平成 29 年 8 月 25 日

亜熱帯森林・林業研究会会長 芝 正己

沖縄県における木造建築物で経年使用されている木材の 力学的特性に関する研究

尾身 頌吾¹・カストロ ホワン ホセ²

¹琉球大学理工学研究科, ²琉球大学工学部建築学コース

Mechanical properties of aged wood for wooden buildings in Okinawa Prefecture.

Shogo OMI¹, Juan Jose CASTRO²

¹Graduate Student, Grad. School of Eng. & Science, Univ. of the Ryukyus

²Professor Faculty of Eng., Univ. of Ryukyus, Ph.D.

要約

既存の建築物の耐震評価を行う際、建築物に使用されている部材の強度特性の把握が重要になる。しかし、木材の強度特性は、樹種はもちろん、使用されている地域や年数によっても違いが生じるため、これまでの古材に対する強度特性試験で報告されている値を一概に用いることは適切ではない。そこで、日本国内でも数少ない亜熱帯気候に属する沖縄県で伝統木造建築物の部材として使用されていた木材の強度特性の把握をするために非破壊試験による測定を行った。沖縄県における伝統木造建築物の部材にはスギ材とイヌマキ材が主に使われており、スギ材では新材と比べ約4割の強度低下が見られたが、イヌマキ材では新材と同様か、それ以上の強度が確認された。今回スギ材に見られた傾向はこれまで報告されてきた経年により曲げ強度、ヤング係数ともに上昇するという傾向とは違う傾向であったため、その原因究明のためにもさらなる調査、検証を行う必要があると考える。

キーワード：亜熱帯気候、伝統木造建築物、非破壊試験、部材強度、古材

はじめに

既存の建築物に対して耐震評価をする際、構造部材として使用されている部材の強度特性の把握が重要となってくる。しかし、経年劣化した古材を対象とした材料試験の例(伊藤嘉文, 2006)はいくつかあるが、同一樹種であっても地域によってその値にばらつきがあることが中西ら(中西統也 他, 2014)の研究により報告されており、一概にそれら材料試験の値を用いることは適切とはいえない。また、沖縄県は日本国内でも数少ない亜熱帯気候に属する地域であるため、沖縄県における伝統木造建築物で使用されている木材の強度特性を把握する必要があると考える。そこで、亜熱帯環境にある地域で使用されている木材の強度特性を把握することを目的に既存の伝統木造建築物で調査を行ったので報告する。

調査方法

1. 概要

既存の伝統木造建築物の部材の強度を判定するには非破壊試験で求めた推定ヤング係数(以下 E_f)と、破壊試験で求めた曲げヤング係数(以下 MOE)、曲げ強度(以下 MOR)それぞれの関係性を把握する必要があるため、まず沖縄県において改修工事が行われている

T 住宅で使用されていたスギの新材、古材とイヌマキの新材に対して完全非破壊試験と破壊試験を行い、 E_f より MOE、MOR を推定する式を作成した。その後、沖縄県に存在する伝統木造建築物において応力波伝播法による完全非破壊試験を行った。

調査した伝統木造建築物は沖縄県本島で 2 棟、伊是名島で 3 棟、久米島で 3 棟の計 8 棟で、柱を対象に測定を行った。調査を行った建物（沖縄県教育庁文化課, 2002）（株式会社国健, 2010）と部材数について表 1 に示す。

表 1 調査対象について

所在地	対象 建物名	築年数 [年]	測定部材数[本]		
			スギ	イヌマキ	計
沖縄県本島	T 住宅	89	8	8	16
	K 住宅	125	0	2	2
伊是名島	M 住宅	111	0	3	3
	J 住宅	70	0	3	3
	X 住宅	70	1	0	1
久米島	U 住宅	138	1	5	6
	KI 住宅	110	0	2	2
	N 住宅	59	2	0	2

2. 完全非破壊試験

図 1 に示すハンディタイプの非破壊試験器 FAKOPP (FAKOPP Enterprise) を用いた応力波伝播法による非破壊試験を行い、 E_f を算出した。 E_f は、センサ間距離 L (m) と計測時間 T (s) の回帰直線の勾配 ($\Delta L / \Delta T$) を応力波伝播速度 v として式 (1) より算出する。

$$E_f = \rho v^2 \quad (1)$$

ここで、 E_f は推定ヤング係数 (kN/mm^2)、 ρ は密度 (kg/m^3) v は応力波伝播速度 (m/s) とする。応力波伝播法の試験原理としては図 2 に示すように、センサピンに衝撃を与えることで発生した応力波が試験対中を伝播し、対となるセンサピンに伝播するまでにかかる時間を測定している。

密度に関しては、T 住宅の改修工事の際に使用されていたスギ材とイヌマキ材それぞれで実際に測定した値を使用した。



図 1 非破壊試験器と当て木



図 2 応力波伝播法の試験原理

また、測定は浪江ら（浪江和隆 他, 2013）の研究を参考に図 3 の治具を用いて図 4 のように当て木に打ち込んだ入出力用のピンセンサを対象部材に固定し、複数回試験を行った後、センサ間距離 L を変化させ複数箇所と同様な試験を行った。



図 3 治具



図 4 設置の様子

3. 破壊試験

小試験体は、寸法を $25\text{mm} \times 25\text{mm} \times 350\text{mm}$ とし、なるべく節などの欠点となりうる要素が入らないように作成した。図 5 に示すような万能試験機を用いて JIS Z2101 に則った小試験体の中央に単調漸増荷重を加える中央集中荷重方式による曲げ破壊試験を行い試験体破壊時の荷重とたわみを測定した。曲げ破壊試験の概要について図 6 に示す。そうして得られる荷重とたわみの関係から MOR 及び MOE を算出する。MOE、MOR は以下の式 (2)、(3) を用いて計算する

$$\text{MOR} = \frac{P_m l}{4z} \quad (2)$$

$$\text{MOE} = \frac{\Delta P l^3}{48I \Delta y} \quad (3)$$

MOR : 曲げ強度 (N/mm^2)

ΔP : 比例限度領域における上限荷重と
下限荷重との差 (N)

MOE : 見かけの曲げヤング係数 (kN/mm^2)

Δy : ΔP に対応するスパン中央のた
わみ

P_m : 比例限度荷重 (N)

I : 断面 2 次モーメント

l : 支点間距離 (mm)

Z : 断面係数 $Z = \frac{a^3}{6} (\text{mm}^3)$



図 5 曲げ破壊試験の様子

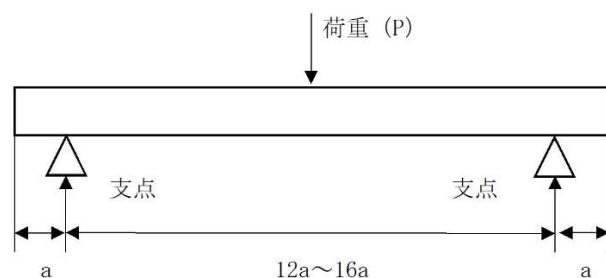


図 6 曲げ破壊試験の試験概要

4. MOE 及び MOR 推定式作成

MOE、MOR を推定するため、同一試験材に対して非破壊試験と破壊試験を行った。非破壊試験はスギの古材 3 本、新材 2 本、イヌマキの新材 1 本で行い、非破壊試験後に、それらの試験材より 25mm×25mm×350mm の大きさで、なるべく無欠点小試験体となるように複数採取し、破壊試験に用いた。イヌマキ材に関しては新材のみで行った。一例としてスギの古材の非破壊試験体と、なるべく無欠点となるようにそれより作成した小試験体を図 7、図 8 に示す。



図 7 古材試験体



図 8 古材小試験体

前述の試験によって得られた E_f と MOE、MOR の平均値を表 2 に示す。

表 2 示すように E_f の値は MOE よりも高い値となっており、スギの新材では、2 割程、スギの古材とイヌマキの新材では、4 割程高い値を示した。

表 2 の結果より、 E_f を用いて MOR と MOE を求める推定式を算出した。図 9 には MOE と E_f の関係及び原点を通る回帰直線（式(4)、(5)、(6)）を、図

表 2 材料試験結果

		スギ		イヌマキ
		古材	新材	新材
非破壊試験	試験体数 [本]	3	2	1
	E_f [kN/mm ²]	7.0 (0.80)	6.5 (0.41)	9.5 (0)
破壊試験	試験体数 [本]	11	12	12
	MOE [kN/mm ²]	4.2 (0.58)	5.4 (0.60)	6.3 (0.73)
	MOR [N/mm ²]	44.8 (6.02)	49.4 (4.35)	74.0 (5.42)

()内は標準偏差

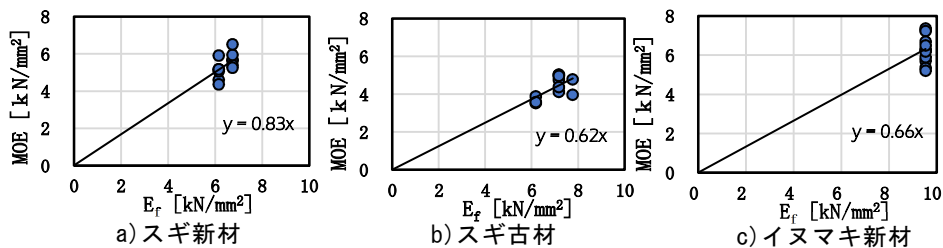


図 9 MOE- E_f の関係

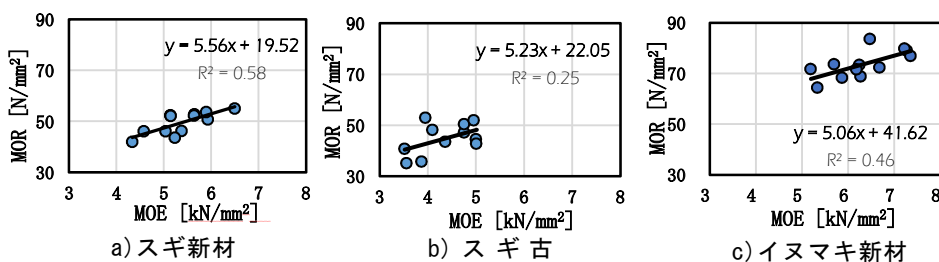


図 10 MOR-MOE の関係

10 には MOR と MOE の関係及び回帰直線（式(7)、(8)、(9)）をそれぞれ示す

$$\text{MOE}_{\text{スギ}^{\text{新}}}=0.83E_f \quad (4) \qquad \text{MOR}_{\text{スギ}^{\text{新}}}=5.56\text{MOE}+19.52 \quad (7)$$

$$\text{MOE}_{\text{スギ}^{\text{古}}}=0.62E_f \quad (5) \qquad \text{MOR}_{\text{スギ}^{\text{古}}}=5.23\text{MOE}+22.05 \quad (8)$$

$$\text{MOE}_{\text{イヌマキ}^{\text{新}}}=0.66E_f \quad (6) \qquad \text{MOR}_{\text{イヌマキ}^{\text{新}}}=5.06\text{MOE}+41.62 \quad (9)$$

なお、式 (7)～(9) 中の MOE の値は式(4)～(6)より求める。

結果・考察

上記で作成した式を用いて、調査した部材の MOE、MOR を E_f より推定した。図 11 に式(1)～(3)で推定した MOE の値を、表 3 には MOE、MOR の各住宅の平均値をそれぞれ樹種毎に示す。表 3 には参考値として木材工業ハンドブック（林総合研究所, 2004）に掲載されているスギの値と、沖縄県産材木材における材料特性についての論文（琉球林業協会, 1985）に掲載されているイヌマキの値を併せて示してある。

表 3 対象住宅の MOE、MOR の調査結果

(a)イヌマキ				(b)スギ				
対象名	含水率 (%)	MOE [kN/mm ²]	MOR [N/mm ²]	対象名	含水率 (%)	MOE [kN/mm ²]	MOR [N/mm ²]	
T住宅	19.3(0.90)	6.2(0.5)	73.0(2.53)	T住宅	古材	18.3(2.19)	4.3(0.36)	46.4(1.87)
K住宅	19.7(1.98)	7.1(0.45)	76.1(2.33)		新材	19.6(0.4)	7.4(0.94)	60.6(5.25)
M住宅	21.7(3.79)	6.7(0.52)	75.4(2.59)	X住宅	13.4(0)	3.3(0)	42.9(0)	
J住宅	14.8(1.07)	6.7(0.77)	75.4(3.90)	U住宅	26.1(0)	3.3(0)	39.5(0)	
U住宅	17.8(1.68)	5.8(0.53)	71.0(2.74)	N住宅	19.8(1.12)	4.0(1.09)	43.0(5.75)	
KI住宅	17.4(3.79)	7.3(1.35)	78.6(6.84)	平均	古材	19.4(4.07)	3.7(0.48)	43.0(3.50)
平均	18.5(2.56)	6.6(0.88)	74.9(4.43)		新材	19.6(0)	7.4(0)	60.6(0)
参考値	-	6.3	82.0	参考値	-	7.5	65.0	

()内は標準偏差

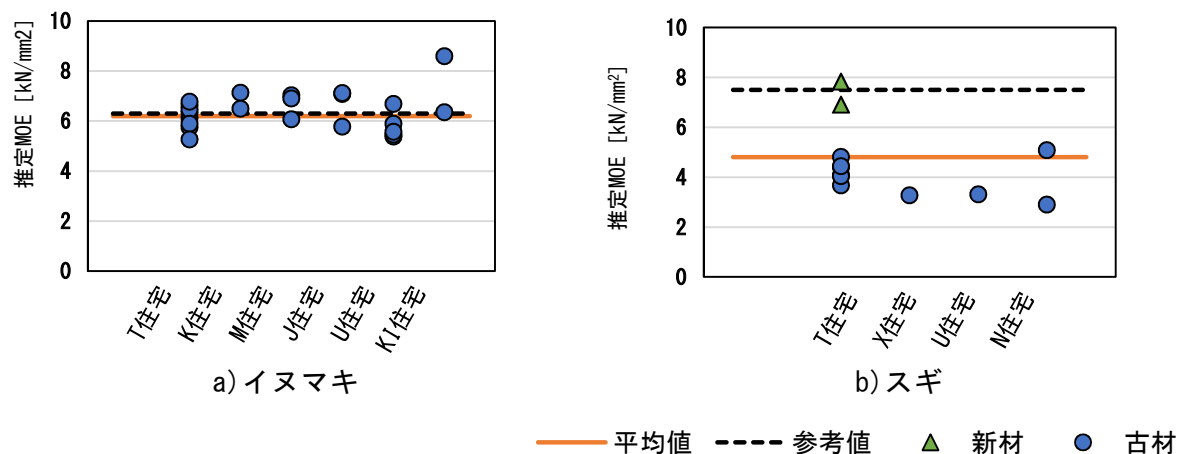


図 11 非破壊試験による MOE の推定結果

各樹種の MOE、MOR について見てみると、イヌマキの古材では 130 年以上前の部材が使用されていた U 住宅の測定値は他の値と比べ若干低い値を示したが、測定をした半数の値で参考値よりも高い値を示した。また、スギの古材では、参考値と比べ MOE は 4 割程、最大でも 6 割低い値が得られた。MOR は 2 割程低下する傾向が見られた。調査対象建築物で新材と取り替えられていたスギの部材で測定した値では参考値と同等の値が得られた。測

定を行った部材はなるべく経年以外の劣化が見られないような部材に対して行ったため、値が低下した原因としては経年による劣化だと考えられるが、スギの古材での材料試験を行った大岡ら（大岡優 他, 2015）の報告では MOE、MOR とともに参考値よりも古材の値のほうが高くなる傾向が見られている。そのため、詳しい原因を究明するためにもさらなる調査を行う必要があると考える。

まとめ

本研究では非破壊試験の測定値と破壊試験の測定値との関係式を作成後、沖縄県における伝統木造建築物の現状の部材強度を把握するため完全非破壊試験による部材強度測定を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 強度試験において、非破壊試験で得られた E_f の値は破壊試験で得られた MOE の値よりも高い値を示し、スギの新材では約 2 割、スギの古材とイヌマキの新材では約 4 割高い値となった。
- 2) イヌマキの古材の MOE の値は半数の値が参考値よりも高い値をとった。
- 3) スギの古材の MOE の値は平均で 4 割ほど、最大で 6 割の強度低下が見られた。
- 4) スギの新材の MOE の値は参考値とほぼ同等の値をとった。
- 5) 測定を行った部材はなるべく経年以外の劣化が見られないような比較的状态の良い部材を選定して行ったため、スギの古材で見られた傾向は経年によるものだと推測されるが、大岡等の研究とは逆の傾向であることと、部材の内部の状態の把握ができていないため、原因を究明するためにも調査対象物件を増やし、さらなる調査、検証を行い、データを蓄積する必要がある。

謝辞

本研究は一般社団法人沖縄しまて協会の技術開発支援事業による支援のもと実施しました。また、調査を行った古民家の関係者の皆様ならび、公益財団法人文化財建造物保存技術協会重要文化財津嘉山酒造所敷設計管理 田村琢氏には多大なるご助力を賜りました。ここに記し、感謝の意を表します。

引用文献

- 伊藤嘉文ほか（2006）長野県林業総合センター研究報告 20：105-108
- 大岡優ほか（2015）古民家で用いられたスギ・ツガ古材の材料試験, 歴史都市防災論文集 9：245-250
- 沖縄県教育庁文化課（2002）沖縄県文化財調査報告書 141：37-113
- 株式会社 国健（2010）沖縄県の古民家保全・再生・活用調査事業報告書(データベース集)：154-155
- 森林総合研究所（2004）改訂 4 版木材工業ハンドブック, 丸善株式会社 pp194-195
- 中西統也ほか（2014）日本建築学会大会学術講梗概集(近畿), pp337-338
- 浪江和隆ほか（2013）日本建築学会構造系論文集 78：833-838.
- 琉球林業協会（1985）沖縄県産有用木材の性質と利用, 林政資料第 9 号：11

沖縄県産木材の建築構造用部材への利用可能性に関する 基礎的な研究

大城 光太郎¹・カストロ ホワン ホセ²

¹琉球大学理工学研究科・²琉球大学工学部建築学コース

Basic research on the use of Okinawan woods as building structural elements

Kotaro OSHIRO¹・Juan Jose CASTRO²

¹Graduate Student, Grad. School of Eng. & Science, Univ. of the Ryukyus

²Professor, Faculty of Eng., Univ. of the Ryukyus, Ph.D.

要約

沖縄県では県産木材の活用方法の模索が行われてきた。従来の素材生産であった土木用資材、チップ用材、薪炭材やキノコ類の原木に加え、近年では家具材や木工製品などといった付加価値の高い製品の生産が加わり、活用の幅は広がりつつある。しかしながら、建築構造用部材としての活用には至っておらず、その力学的特性データの不足が原因の一つと考えられる。本研究では、県産木材の力学的特性を明らかにすることを目的とし、沖縄県産の5樹種を対象に無欠点小試験体による強度試験を行った。その結果、本研究対象の県産木材は現行の無等級材に劣らない強度を示し、力学的特性を用いた活用の展開に期待できると考えられる。

キーワード：沖縄県産木材， せん断， 縦圧縮， 曲げ， 無欠点小試験体

はじめに

建築物の設計をする場合、構造物に加わる外力を十分に支持できる強度を有した部材を用いることが求められ、使用する樹種の数値化された基準強度を用いる。沖縄県産木材に建築構造用部材としての活用方法を付加するためには、強度試験の実測値に基づく基準強度データが必要となる。しかしながら、県産木材の力学的特性に関するデータは不足しており、建築構造用部材のような強度的数値が求められる利用には至らない現状がある。本研究では、県産木材の力学的特性を明らかにするため、県産木材の無欠点小試験体による各強度試験を行った。

研究方法

1. 試験体

本研究では、既往の研究（琉球林業協会，1985）をもとに構造用材としての活用が期待される樹種を選抜した。対象樹種は針葉樹からリュウキュウマツ、広葉樹からイタジイ、イジュ、クスノキ、センダンの計5樹種とした。これらの樹種をJISZ2101に則り無欠点小試験体にて図1の各強度実験を行った。試験機は万能試験機（島津製作所、UH-FC）、データロガー（東京測器研究所、TDS-303）を用いた。荷重速度はいずれの樹種も1分以上で破壊するように設定した。試験体数及び試験材は、各試験にて名護市産を各樹種36体、国頭村産を各樹種15体の計51体ずつとした。既に製材された板材から無作為に抽出し、各試

験の指定した寸法で2方柱に加工したもの購入した。

2. 曲げ試験

試験体寸法を25mm×25mm×350mmとし、中央集中荷重方式で行った。荷重面は柱目とする。スパン中央に取り付けた治具の両端に変位計（東京測器研究所、CDP-50）をあて、加力時の変位の平均値をたわみとした。試験終了後、得られた荷重とたわみから曲げ強度と曲げヤング係数を算出した。



(a) 曲げ試験

(b) 縦圧縮試験

(c) せん断試験

図1 各強度試験

3. 縦圧縮試験

試験体寸法を25mm×25mm×75mmとし、製作した中間変位測定治具を用い、治具の両端に変位計（東京測器研究所、CDP-10）を取り付けた。40mmの検長と加力時の変位の平均値より、試験時のひずみを求めた。試験終了後、得られた荷重とひずみから縦圧縮強度と縦圧縮ヤング係数を算出した。

4. せん断試験

試験体寸法を25mm×25mm×35mmとした。せん断面積が25mm×25mmになるよう10mm角の切れ欠き加工を施した椅子型ブロックせん断試験体を、JISZ2101を参考に製作したせん断試験治具に設置し、荷重を測定した。試験体は板目と柱目の2方向ずつ用意した。試験終了後、得られたデータから板目せん断強度と柱目せん断強度をそれぞれ算出した。

結果と考察

1. 曲げ試験

曲げ試験結果を表1に示す。表2に無等級材の基準強度を定める際の基礎データとなった無欠点小試験体による基準強度値（日本木材学会，2015）を示し、本研究における対象県産木材の曲げ強度と比較した。リュウキュウマツの曲げ強度は93.7N/mm²を示した。この強度は、針葉樹樹種群の中でも非常に大きく、針葉樹I類の78.4N/mm²を大きく上回っている。イジュ、イタジイは広葉樹I類II類の樹種群の中間に相当する強度を示し、クスノキは、広葉樹II類の樹種群に相当する強度を示した。センダンは広葉樹II類以下であった。本試験における曲げ試験体の破壊形態と荷重-たわみ曲線の例を図2に示す。無欠点小試験体の荷重-たわみ曲線は大きく三段階で構成される。初期段階では直線状に荷重は上昇し、曲げ試験体の弾性領域を示す。続いて試験体にもめなどの圧縮側破壊が生じることで、その傾きは緩やかになり、引張側破壊が生じることで、荷重は低下する。

表1 曲げ試験結果一覧 (各 51 体)

樹種	ρ [kg/m ³]	ARW [mm]	MC [%]	E _b [kN/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
リュウキュウマツ	716 (80.5)	3.7 (2.3)	14.8 (1.5)	11.5 (3.4)	93.7 (22.9)
イタジイ	715 (61.1)	3.1 (1.2)	15.7 (1.4)	11.2 (2.6)	90.7 (15.7)
イジュ	676 (60.8)	3.8 (1.8)	15.1 (2.2)	10.9 (1.6)	93.4 (14.9)
クスノキ	559 (55.2)	4.0 (1.8)	15.1 (1.1)	8.9 (1.4)	78.8 (10.7)
センダン	540 (65.2)	4.6 (2.9)	15.2 (1.8)	8.7 (1.8)	62.8 (19.8)

記号 ρ : 密度、ARW : 平均年輪幅、MC : 含水率、E_b : 曲げヤング係数、 σ_b : 曲げ強度
値は平均値、() 内は標準偏差

表2 無等級材の基準強度算出根拠になった無欠点小試験体の樹種群別強度一覧[単位 : N/mm²]

樹種	縦圧縮強度	曲げ強度	せん断強度	
I あかまつ、くろまつ、べいまつ	44.1	78.4	8.8	
針葉樹	II からまつ、ひば、ひのき、べいひば	41.7	73.5	7.8
	III つが、べいつが	39.2	68.6	7.8
	IV もみ、えぞまつ、とどまつ、べにまつ、 すぎ、べいすぎ、スブルース	34.3	63.7	6.9
広葉樹	I かし	53.9	107.8	15.7
	II くり、なら、ぶな、けやき	42.1	83.3	10.8

注) この表は KGS 単位から SI 単位に変換したもの。

本試験において、荷重-たわみ曲線は樹種により異なった挙動特性を示した。イタジイ、イジュは最大荷重到達後すぐに崩壊せず徐々に荷重が低下し、ねばりのある破壊挙動を示す傾向がみられ、高い靱性を有していると考えられる。一方、リュウキュウマツ、クスノキ、センダンに関しては最大荷重到達後すぐに破壊し急激な荷重の低下がみられ、これらの樹種が脆い破壊挙動を示す傾向があると考えられる。脆い破壊挙動を示す試験体は、引張力によって生じた亀裂が中立軸を超えて圧縮側に到達している場合に多くみられた。一方、ねばりのある破壊挙動を示す試験体は引張力によって生じた亀裂は中立軸まで達しなかった。リュウキュウマツは、密度が低く板目面の繊維傾斜が大きい場合、荷重-たわみ曲線の初期直線域を脱する前に破裂するように急激に破壊するものが見られた。いずれの試験体も密度が平均値から一割程度低い値を示しており、密度が極端に低い個体は変形能力特性が低いと考えられる。密度は年輪幅と関係が大きく、低密度試験体は平均年輪幅がいずれも大きいものに多く見られた。他の樹種では一割以上密度に差がある場合でも平均程度の強度を示す場合もあり、目切れなどの繊維方向から生じる欠点による影響も考えられる。

曲げ試験によるヤング係数と強度(以下、MOE と MOR) の相関を図3に示す。曲げ試験における MOE と MOR の決定係数 R² から得られる相関係数 R はリュウキュウマツ、イタジイ、

イジュ、センダンが 0.78~0.80 と高い相関を示し、クスノキは 0.67 であった。MOE を非破壊的に把握することができれば、MOR をある程度推測する目安として考えることができる。

試験結果の曲げヤング係数を機械等級区分（農林水産省，2007）に基づき区分等級を行

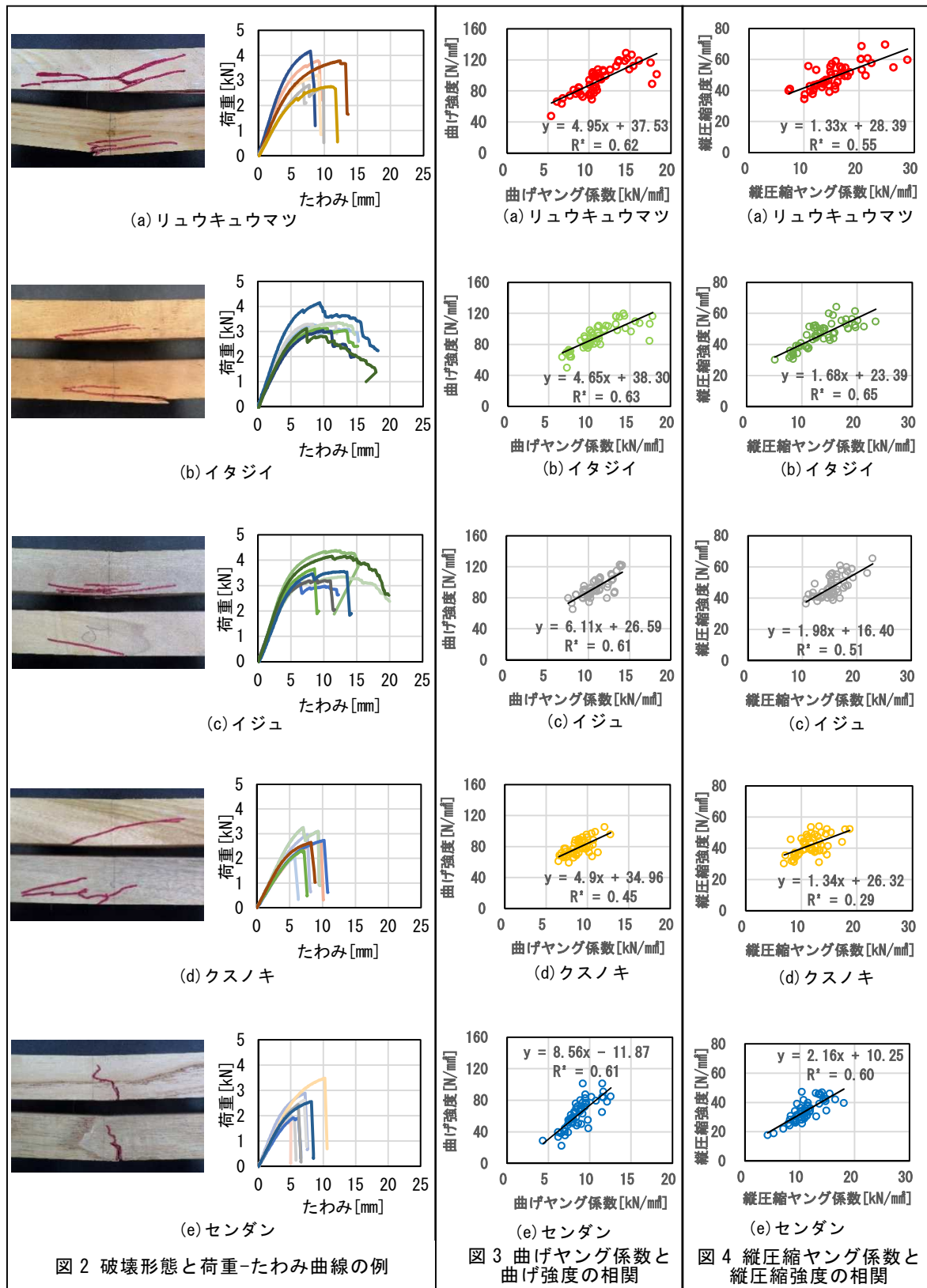


図 2 破壊形態と荷重-たわみ曲線の例

図 3 曲げヤング係数と曲げ強度の相関

図 4 縦圧縮ヤング係数と縦圧縮強度の相関

い、図5に度数分布を示す。対象樹種の曲げヤング係数はE90とE110を中心とした分布傾向を示した。一般の構造材として用いられるスギの曲げヤング係数は7.5kN/mm²（木材工業ハンドブック，2004）であり、表3の機械等級区分よりE70に区分される。本研究データはE70以上の曲げヤング係数が99.2%と大半を占めていたことから、県産木材は曲げヤング係数を用いた活用の展開に期待ができると考えられる。

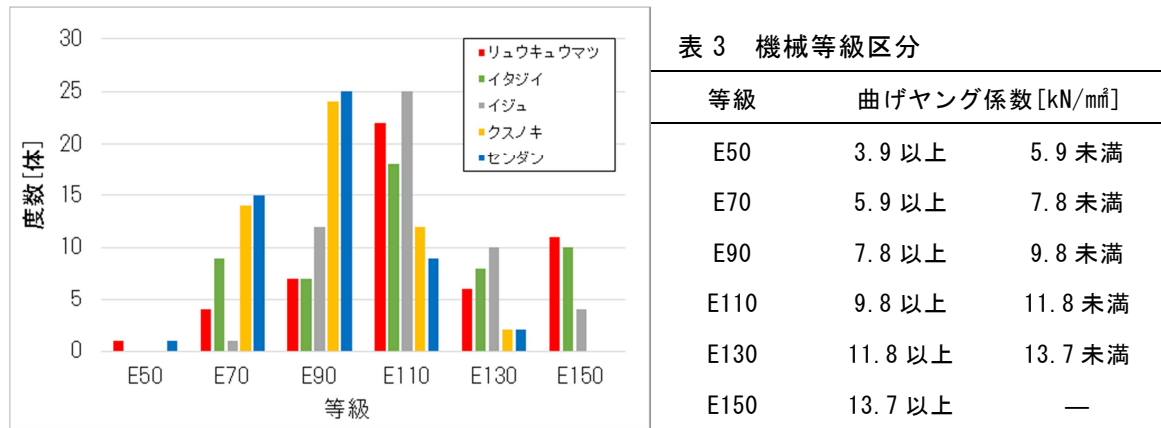


図5 曲げヤング係数の度数分布

2. 縦圧縮試験

縦圧縮試験結果を表4に示す。リュウキュウマツの縦圧縮強度は50.0N/mm²を示した。針葉樹樹種群の中でも非常に大きく、その強度は針葉樹I類の44.1N/mm²を上回った。イジュ、イタジイは広葉樹I類II類の樹種群の中間に相当する強度を示し、クスノキは広葉樹II類の樹種群に相当する強度を示した。センダンは広葉樹II類以下であった。縦圧縮試験結果のMOEとMORの相関を図4に示す。縦圧縮試験におけるMOEとMORの決定係数R²から得られる相関係数Rはリュウキュウマツ、イタジイ、イジュ、センダンは0.72~0.81と高い相関を示し、クスノキは0.54であった。MOEからある程度のMORを推測する目安として考えることができる。

表4 縦圧縮試験結果一覧（各51体）

樹種	ρ [kg/m ³]	ARW [mm]	MC [%]	E_c [kN/mm ²]	σ_c [N/mm ²]
リュウキュウマツ	720 (90.5)	3.7 (1.9)	13.7 (1.1)	15.7 (4.4)	50.0 (8.5)
イタジイ	734 (65.3)	3.2 (1.3)	14.9 (2.0)	13.5 (4.1)	46.1 (8.5)
イジュ	660 (47.7)	3.0 (1.1)	13.8 (1.9)	15.5 (2.4)	47.1 (6.8)
クスノキ	556 (54.6)	3.6 (3.7)	13.9 (1.5)	11.8 (2.5)	42.2 (6.3)
センダン	535 (59.6)	4.5 (2.2)	14.6 (1.2)	11.1 (2.6)	34.2 (7.3)

記号 ρ : 密度、ARW : 平均年輪幅、MC : 含水率、 E_c : 縦圧縮ヤング係数、 σ_c : 縦圧縮強度
値は平均値、() 内は標準偏差

3. せん断試験

せん断試験結果を表5に示す。リュウキュウマツのせん断強度は針葉樹Ⅰ類のせん断強度 8.8N/mm²を大きく上回り、針葉樹類の中で非常に高い強度を有していることがわかる。広葉樹のイタジイ、イジュは広葉樹Ⅰ類に相当するせん断強度を示し、クスノキ、センダンは広葉樹Ⅱ類に相当する強度を示した。本研究にて、板目せん断強度と柾目せん断強度に一割以上の差はイジュのみにみられ、その他の樹種はほぼ同等であった。

表5 せん断試験結果一覧（各51体）

樹種	板目せん断				柾目せん断			
	ρ [kg/m ³]	ARW [mm]	MC [%]	σ_{cs} [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	ARW [mm]	MC [%]	σ_{ss} [N/mm ²]
リュウキュウマツ	715 (84.1)	3.7 (1.6)	13.5 (0.9)	14.6 (2.4)	707 (88.4)	3.6 (1.4)	13.4 (0.8)	14.7 (2.3)
イタジイ	747 (68.5)	3.3 (1.2)	14.7 (1.7)	14.1 (1.8)	724 (63.2)	3.5 (1.6)	14.6 (2.1)	13.1 (1.8)
イジュ	670 (53.7)	3.3 (1.4)	13.6 (1.6)	15.3 (2.3)	669 (44.6)	3.5 (1.6)	13.3 (1.4)	13.2 (2.1)
クスノキ	568 (54.4)	3.8 (1.6)	14.0 (0.9)	11.3 (1.7)	552 (54.8)	3.7 (1.7)	13.8 (0.9)	10.5 (1.8)
センダン	526 (81.6)	4.6 (2.4)	13.9 (2.0)	10.8 (1.9)	531 (64.3)	4.7 (2.5)	13.4 (0.9)	10.9 (2.)

記号 ρ : 密度、ARW : 平均年輪幅、MC : 含水率、 σ_{cs} : 板目せん断強度、 σ_{ss} : 柾目せん断強度
値は平均値、() 内は標準偏差

まとめ

沖縄県産木材を建築構造用部材としての活用の幅を広げることがを想定し、県産木材5樹種を対象に強度試験を行った。その結果から得られた知見は次の通りである。

- ① 本研究対象の沖縄県産木材は、現行の無等級材に相当する強度を示し、建築構造材としての活用が期待できる。
- ② 本研究の対象樹種の曲げヤング係数はE90~E110に分布が多く、E50以下の値はほとんど見られなかった。
- ③ 曲げヤング係数と曲げ強度は高い相関を示した。
- ④ 縦圧縮ヤング係数と縦圧縮強度はやや相関を示した。
- ⑤ 曲げ試験においてリュウキュウマツ、クスノキ、センダンは脆い破壊挙動を示した。
- ⑥ 曲げ試験においてイタジイ、イジュはねばりのある破壊挙動を示した。

本研究は沖縄県名護市産、国頭村産の木材を対象に実施したものである。今後も継続し定量的なデータの蓄積を行い、試験体の対象地域を拡大する必要がある。

謝辞

本研究は日本建築学会九州支部沖縄支所の研究・活動助成金で実施した。また、企業組合キンモク代表金城 忍氏、国頭村森林組合比嘉 進氏に試験体作成にご協力していただいた。ここに記して感謝の意を表す。

引用文献

琉球林業協会（1985）沖縄産有用木材の性質と利用，11p，丸正印刷社

日本木材学会（2015）ティンバーメカニクス 木材の力学理論と応用 木材強度・木質構造
研究会編，135pp，海青社

農林水産省（2007）製材の日本農林規格，平成 19 年 8 月 29 日農林水産省告示 1083 号

森林総合研究所（2004）改訂 4 版木材工業ハンドブック，194pp，丸善株式会社

フクギのさし穂の形状が発根率に与える影響

千吉良 治¹・松下 通也²・楠城 時彦¹・古本 良¹・加藤 智子³・仲里 長浩⁴

¹森林総合研究所林木育種センター西表熱帯林育種技術園, ²森林総合研究所林木育種センター海外協力部, ³森林総合研究所林木育種センター関西育種場, ⁴和歌山県立有田中央高等学校総合学科

Estimation of rooting ability influenced by some cutting branch forms in *Garcinia subelliptica*.

¹Osamu CHIGIRA, ²Michinari MATSUSHITA, ¹Tokihiko NANJO, ¹Ryo FURUMOTO, ³Tomoko KATO, ⁴Nagahiro NAKAZATO

¹Iriomote Tropical Tree Breeding Garden, Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Products Research Institute ²International cooperation Department, Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Products Research Institute ³Kansai Regional Breeding Office, Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Products Research Institute ⁴Wakayama prefectural Arita chuo High school

要約

南西諸島域において、防潮・防風垣等の用途で植栽されてるフクギ (*Garcinia subelliptica* Merr.) の、さし木発根率に関連する知見を得るために34個体から採取した451本のさし穂の形状と発根の有無を調べ、採穂個体、採穂個体の性表現、およびさし穂の形状が発根に与える影響について解析を行った。その結果、さし木発根率には個体間差が大きく関与していることが示唆された。また、発根に有利なさし穂は、節の直下に近い位置に切り口があり、節が多く、頂芽を含む節が長い傾向にあることが明らかになった。また、機械学習の一種であるランダムフォレストを用いて発根性とさし穂形状の関係を解析した結果、採穂個体による差異を考慮したモデルにおいては、3形状(切口側の節長、先端側の節長、節の数)を用いることで、発根の有無に約9割程度の適合性を得た。

キーワード: フクギ, さし穂の形状, 発根率, 一般化線形混合モデル, ランダムフォレスト

はじめに

フクギ (*Garcinia subelliptica*) は、奄美群島以南の南西諸島域では防潮・防風垣等として植栽されている。例えば、「沖縄の森林・林業」の平成24年度版から28年度版(沖縄県農林水産部森林緑地課, 2012; 2013; 2015; 2016; 2017)によると平成23年度から平成27年度までの沖縄県営苗畑における樹種別生産本数順位は、平成23年度と24年度が2位、平成25~27年度が1位であった。しかしながら、フクギから落下した果実が腐敗すると特有の臭気を発することが緑化樹としては欠点とされている(末吉, 1973)。

フクギは雌雄異株である(初島, 1975)が、近年の研究では、雌雄株の他に両全花、雄

性偽両全花，および雄花が5つの組み合わせパターンで雑居する株が一定の頻度で存在することが明らかになっている（仲里ほか，1992）。しかし，雑居株の頻度は低く，概ね雌雄株が半数程度ずつ存在することが確認されている（仲里ほか，1992；谷口ほか，2008）。

ところで，フクギはさし木による繁殖が可能であることが報告されている（外間，1954；末吉，1976；楠城，2017）ことから，フクギの問題解決の一つの方策として，さし木繁殖した雄株を植栽することが考えられる。本報告では，フクギのさし木増殖の効率化に寄与することを目的として，さし穂長，直径，および節間長等のフクギのさし穂の形状が発根率に与える影響を調査・解析した結果について報告する。

材料と方法

1. さし木と発根調査

2016年6月22日に石垣市内の34個体から採穂した451本のさし穂について，オキシベロン液剤（バイエルクロップサイエンス・東京）を水道水で40倍に希釈しインドール酪酸100ppm相当とした溶液に，夜間を含む16時間程度，切り口を含む基部を浸漬した後，鹿沼土細粒にさし付け，タイマー式自動灌水装置で用土表面が乾かない程度の灌水管理を発根調査まで行った。なお，さし穂は，樹体の1.5m前後の高さから，成長点を含む2節以上の枝を，長さ15cm程度までを上限として採取した。さし穂の採取にあたっては可能な範囲で病虫害を受けず，かつ枝分かれのない枝先を選んだ。なお，採穂個体の性別は楠城ら実施したフクギの発根率の性差に関する研究（楠城ほか，2017）での分類を用いた。本実験で用いた採穂木の性別の内訳は雄株20，雌株14個体であった。

発根調査は，2017年1月11日～13日の間に行い，茎や切口の癒傷組織付近から肉眼で確認可能な白い根の組織が発生したさし穂を発根と判定した。

2. さし穂の形状の調査

さし穂の形状の調査は，2016年6月27日～7月5日の間に，さし穂が乾燥しないように順次行った。まず，さし穂の主軸の一か所を1cmの方眼をプリントした平面上に密着させた状態で写真撮影（カメラ：OLYMPUS STYLUS社TG-2，撮影距離：25cm）を行った。取得した写真画像から，さし穂の形状をフリーの画像解析ソフトImageJ1.51（Rasband, W.S., 1997）上で測定した。測定項目は，切口を含む節（以下切口節と略記）と頂芽を含む最先端の節（以下先端節と略記）の直径，および全ての節の長さとした。ただし切口節長は切口と直近の節までの長さとした。なお，さし穂の形状と発根の状況をさし穂毎に確認できるように，写真撮影時に全てのさし穂に番号ラベルを固定した。穂の形状として解析に用いたデータは，切口節径，先端節径，切口節径と先端節径の平均値（以下平均径と略記），節数，切口節長，先端節長，さし穂毎の全ての節間長（以下節間長と略記）である。

3. 解析の方法

主成分分析により，測定した穂の諸形状の情報を要約した。次にさし穂の発根の有無を従属変数，さし穂の諸形状，性別（雌雄），採穂個体を説明変数として一般化線形混合モデル（誤差分布：二項分布）を構築し，それぞれのモデルの妥当性を赤池情報量基準（AIC）に基づいて検討した。さらに，機械学習の一種であるランダムフォレストを用いた解析を

実施し、一個抜き交差検証法でそれぞれの穂の発根の有無を予測し、実際の発根の有無との適合を検証した。なお解析にはフリーの統計解析ソフト R. 3. 0. 1 を用いた。

結果

1. さし穂形状の調査

さし穂の形状別の平均値は、切口径、先端径、平均径、節数、切口節長、先端節長、節間長、穂毎の節長の合計値であるさし穂長の順に 5.4mm, 4.9mm, 5.1mm, 4.4 節, 19.4mm, 27.4mm, 19.8mm, 87.7mm, であった。いずれの形状も最低値と最高値には 2 倍以上の差が認められ、切り口節長のそれは 120 倍を超える値であった。表 1 にさし穂の形状毎のレンジ、平均値、標準誤差を示した。

表 1 さし穂の形状毎のレンジ、平均値、および標準誤差

さし穂の形状	最小値	最大値	平均値	標準誤差
切口径	3.5	9.6	5.4	± 0.041
先端径	2.8	8.1	4.9	± 0.042
平均径	3.3	7.7	5.1	± 0.035
節数	2	12	4.4	± 0.087
切口節長	0.7	86.8	19.4	± 0.650
先端節長	4.8	97.9	27.4	± 0.647
節間長	0.7	97.9	19.8	± 0.287
さし穂長	36.5	168.9	87.7	± 0.896

注: 最小値、最大値、平均値の単位は節数を除き、mm
節間長の平均値および標準誤差は全データを込みにした値

測定した諸形状について主成分分析で解析した結果、図 1 に示すように大まかに 3 つのベクトル群（節の長さ、節の径、節の数）によって分散が説明された。

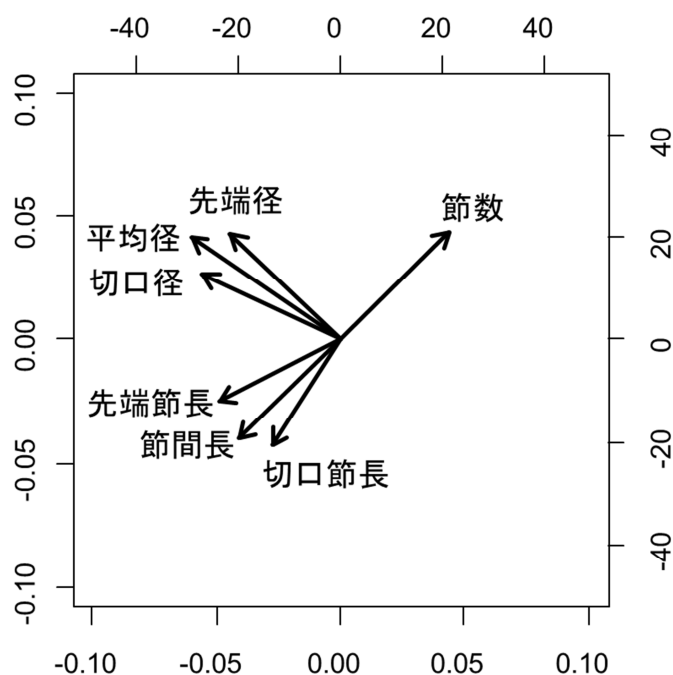


図 1 主成分分析によるさし穂の諸形状の要約

2. 発根の状況

供試したさし穂で、発根の有無の確認まで追跡できたのは499本であった。追跡調査を行ったさし穂のうち、発根したさし穂の割合（以後発根率とする）は全体で76.2%であった。採穂個体別の発根率は27%～100%の間に分布していた。個体あたりのさし穂数は6～28本と少ないものの、発根率に大きな変異があることが伺われた。図2に個体別の発根率の頻度を示す。

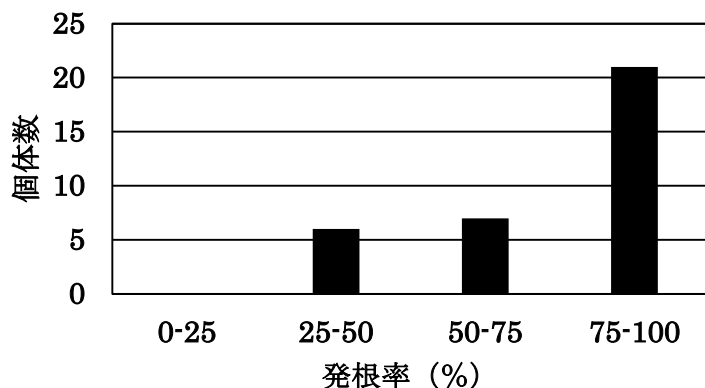


図2 個体別の発根率の頻度分布

3. 発根性に影響するさし穂の諸形状の解析結果

採穂個体、性別(雌雄)、およびさし穂の諸形状の影響を一般化線形混合モデルで解析した結果、発根性に雌雄間の違いは認められなかった。また、採穂個体によるばらつきの効果を説明変数として含むことでAIC値が低下しており、採穂個体による発根性の大きな変異が示唆された。さし穂の諸形状に関しては、切口節長、先端節長、および節数といった説明変数が発根の有無に対して影響を及ぼしていた。表2に解析で得られたモデルとそれぞれのAIC値を示す。

表2 一般化線形混合モデルの説明変数とそのAIC値

共変量(固定効果)	変量効果		
	性別と採穂個体	採穂個体	無し
切口節長 + 先端節長 + 切口径 + 先端径 + 節数	1642.9	1640.9	2163.4
切口節長 + 先端節長 + 切口径 + 節数	1642.8	1640.8	2164.7
切口節長 + 先端節長 + 節数	1642.5	1640.5	2166.7
切口節長 + 節数	1644.2	1642.2	2166.1
切口節長	1646.2	1644.2	2168.1

AIC値が最も低いモデルでは、採穂個体間の分散の他に切口節長、先端節長、および節数を固定効果とすることによってさし穂の発根の有無を効率的に説明できることが示唆された。また、その回帰係数からは、重要な因子の順に、切口節が短く、節数が多く、先端節が長い穂でより発根しやすい傾向が示された。表3に最も低いAIC値を得られたモデルの固定効果の係数を示す。

ランダムフォレストを用いて発根性とさし穂形状の関係について解析を実施した結果、採穂個体の効果を考慮しないモデルにおいて、切口節長、先端節長、および節数の3形状を用いて、観察された発根の有無の約76%を予測できた。さらに、採穂個体による差異を

考慮したモデルにおいては、3 形状（切口節長、先端節長、節数）を用いることで、観察された発根の有無と約 9 割程度の適合性であった。表 4 に各モデルの自由度調整済み R² 値を示す。

表 3 最も低い AIC 値を得られたモデルの固定効果の係数

固定効果	推定された係数	標準誤差	Z値	P値
切片	2.2640	0.4166	5.4350	0.0000
切口節長	-0.2910	0.0753	-3.8660	0.0001
先端節長	0.1219	0.0789	1.5450	0.1224
節数	0.1852	0.0932	1.9870	0.0469

表 4 各モデルの自由度調整済み R² 値

共変量	性別と採穂個体	採穂個体	カテゴリ無し
切口節長 + 先端節長 + 切口径 + 先端径 + 節数	97.72	97.76	93.65
切口節長 + 先端節長 + 切口径 + 節数	97.38	95.26	88.90
切口節長 + 先端節長 + 節数	64.14	92.16	76.15
切口節長 + 節数	53.26	84.82	48.54
切口節長	42.56	82.86	24.40

考察

さし木発根率は、既報を大幅に上回り全体で 76.5%であった。さらに採穂する個体によって発根率が大きく異なった。同一種内、同一条件でも採穂個体によってさし木発根率が大きく異なることは多くの樹種で知られており、その原因として樹齢 (Rasmussen, *et al.*, 2015)、環境や遺伝的な因子 (Baltunis *et al.*, 2005) 等があげられている。今回の採穂場所は防風帯として植栽・管理されており一部は近年補植したと考えられる小径木が含まれていることから、採穂木には様々な樹齢の個体が含まれている可能性がある。採穂個体の違いによる発根率の差の原因については今回の試験では明らかにならなかったが、採穂個体を選択することで大幅な発根率の向上が図れると推察される。

さし穂の形状も発根率に影響を与える結果が示された。さし穂の切り口と直近の節の位置関係については一般的に節の直下に切り口を作ることが推奨されており (FAO, 2017)、今回の実験でもその効果が確認できた。さし穂が含む節数が発根率に与える影響については報告が見当たらないが、一節をさし穂とした場合の頂芽節から数えた節数や、さし穂長によって発根率が異なることが報告されている (Tchoundjeu and Leakey, 1996)。FAO では、さし穂のサイズとサイズに依存して変化する採穂可能なさし穂数の観点からさし穂に含まれる節数を決定するとしている (FAO, 2017)。フクギについては今回のさし穂長の範囲では、節数が多いさし穂ほど発根しやすいと考えられる。

ところでさし穂の長さの上限に制約を設けた今回の採穂方法では、節数が多いほど節長が短くなる傾向にある。節数が多いさし穂ほど発根しやすい一方で、先端の節長が長いさし穂の発根率が高くなる傾向が伺われたことは相反するようにも考えられる。しかしながら、主成分分析の結果では節数と先端節長の類似性が、他の形状間の類似性と比べて相対的に低いことから、節数が多く先端節長が長い形状のさし穂が発根に有利と考えても矛盾はしないと考えられる。このようなさし穂は、樹体の日の当たらない場所で発生し比較的

ゆっくりと伸長した後に何らかの原因で採穂前の成長期に大きく伸長した可能性などが考えられる。

今回の試験ではランダムフォレストを用いて発根性とさし穂形状の関係について解析を実施した結果、採穂個体による差異を考慮したモデルにおいては、3形状（切口節長、先端節長、節数）を用いることで、観察された発根の有無と約9割程度の適合性であった。このことは、今回の試験と同様の環境下という条件ではあるものの、採穂する枝の選択やさし穂の調整によって、フクギのさし木発根率を9割程度まで向上することができる可能性があることを示唆している。

今回の試験で、一般化線形混合モデルの適用によって高い予測精度で発根の有無を予測できた背景には、全体の発根率が76.2%と高かったことが大きく関与していると考えられる。全体的な発根率が低い環境下などで、採穂個体やさし穂の形状の選択によってどの程度の予測精度をもつモデルの構築が可能であるかを調べることは今後の課題であろう。

フクギは主に台風等の強風に耐える性質等が期待されて植栽されていると考えられることから、さし木苗生産の実用化にあたっては、実生苗と同等の耐風性能が求められる。その他にも、さし付けから植栽までの様々な過程、例えば採穂源の確保、さし付けから養苗過程を経て植栽までに要する期間、根系の形状、およびクローン化した際の性表現の再現性等を評価あるいは確認し、問題点があればそれに対応した技術開発が必要になる可能性がある。

引用文献

Baltunis Brian S, Huber Dudley A, White Timothy L, Goldfarb Barry, Stelzer Henry E (2005) Canadian Journal of Forest Research 35(5):1098-1108.

FAO Corporate document repository (2017.10.10日参照) FAO Forestry department, Rooting Cuttings of Tropical Trees.

初島住彦 (1975) 琉球植物誌 (追加訂正版), p415.

外間現誠 (1954) 沖縄県林業試験場研究報告 2, 1-14.

仲里長浩・長野克也・戸田義宏 (1992) 日林九支研論, 45:35-36.

楠城時彦, 古本良, 加藤智子, 千吉良治, 松下通也, 仲里長浩 (2017) 亜熱帯森林・林業研究会研究発表論文集 28: 17-20.

沖縄県農林水産部森林緑地課 (2012) 沖縄の森林・林業 (平成24年度版), 67.

沖縄県農林水産部森林緑地課 (2013) 沖縄の森林・林業 (平成25年度版), 70.

沖縄県農林水産部森林緑地課 (2015) 沖縄の森林・林業 (平成26年度版), 48.

沖縄県農林水産部森林緑地課 (2016) 沖縄の森林・林業 (平成27年度版), 53.

沖縄県農林水産部森林緑地課 (2017) 沖縄の森林・林業 (平成28年度版), 53.

Rasband, W.S., ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://rsb.info.nih.gov/ij/>, 1997-2012.

Rasmussen A, Seyed Abdollah Hosseini, Mohammed-Reza Hajirezaei, Uwe Druege, and Danny Geelen (2015) Journal of experimental botany, 66(5): 1437-1452.

末吉幸満 (1976) 沖縄県林業試験場研究報告 19, 35-41.

谷口真吾・西原史子・中須賀常雄 (2008) 九州森林研究, 61:21-25.

Z. Tchoundjeu and R. R. B. Leakey (1996) *New Forests*, Volume 11(2):125–136.

リュウキュウマツにおけるマツノザイセンチュウ抵抗性候補木の選抜

玉城 雅範¹

¹ 沖縄県森林資源研究センター

Selection of *Pinus luchuensis* Mayr individuals Resistant to Pine Wilt Disease.

Masanori Tamashiro¹

¹Okinawa Pref. Forest Resources Research Center

要約

リュウキュウマツは沖縄県の風土にあった樹種として重要であるが、1973年にマツ材線虫病の沖縄県侵入が確認されて以降、その被害が現在も続いている。そのため、マツ材線虫病に対するリュウキュウマツ抵抗性育種事業に期待が寄せられている。リュウキュウマツ抵抗性個体選抜に向けた取り組みは、1989年から開始され、現在、抵抗性候補木11家系を選抜している。今後はこれら選抜した家系を中心として抵抗性品種開発に向けて取り組んでいく予定である。一方で、抵抗性品種を開発するだけでなく、植栽した場合に周辺マツ林の遺伝的多様性減少や改変を考慮するため、県内のリュウキュウマツの遺伝的多様性の評価も併せて行い、遺伝的多様性を踏まえた上での抵抗性リュウキュウマツ品種開発に取り組んでいく。

キーワード：抵抗性、マツノザイセンチュウ、リュウキュウマツ

はじめに

沖縄県において林木育種が本格的に実施されたのは、1972年の日本復帰以降のことである。1974年にリュウキュウマツ、1975年にイヌマキの精英樹が選抜された。その後、広葉樹について1994年度からイジュ、1996年度からタイワンオガタマノキ、2000年度からセンダン等の優良個体の選抜が行われてきた。近年では、マツ材線虫病の被害が続く中で、特にマツ材線虫病に対するリュウキュウマツ抵抗性育種事業を行っている。本稿では、本県におけるリュウキュウマツの重要性を記した上で、これまでのマツ材線虫病に対するリュウキュウマツ抵抗性個体選抜に向けた取り組み、及び近年の研究状況を踏まえ今後の抵抗性育種事業の方向性について報告する。

本県におけるリュウキュウマツの重要性

リュウキュウマツはトカラ群島以南の琉球列島に天然に分布する固有の亜熱帯性のマツ類である。リュウキュウマツは、沖縄県における植栽の歴史が特に古い樹種の一つである。史料に残るリュウキュウマツ植栽の始まりは、琉球王国尚真王（1465～1527年）の時代からである。尚真王の時代には土木・建築事業が盛んに行われ、琉球王国の中心であった首里と地方を結ぶ石畳道が多く整備された。代表的なものとして真珠道（まだまみち）

が挙げられる。真珠道は首里城から那覇港までの約4kmを結ぶ石畳道で、生活道はもとより、防衛上重要な道であった。尚真王は真珠道の路面を石畳で補強しただけでなく道の両側にリュウキュウマツの植栽を行うことにより、風致景観形成等を行っていた（1995, 中須賀）。更に、尚真王は1497年に首里城外に官吏の散策する公園として官松嶺にリュウキュウマツ千株の植栽を行っていた（写真1）。その景観の美しさは、植栽から約350年後の1853年に琉球を訪れたペリー艦隊一行として参加したジェイムズ・モロー博士により称えられた（1987, ラブ・オーシュリ・上原正稔）。現在においても、国頭村蔡温松保全林をはじめとして、今帰仁村仲原馬場など昔から続く沖縄らしい風景を残すリュウキュウマツ並木が各地域に残っている。

リュウキュウマツが経済林目的で植栽されたのも尚真王の時代からである。尚真王は祖先供養と国家の平和を祈願して円覚寺を創建した。1501年に建立された「サシカヘシ松尾之碑」には、円覚寺の今後の定期的な修理に備え、寺側の空閑地に1万株のリュウキュウマツを植え、永代修補の資材とすることが記されている。その後17世紀後半からは、海運業の発展や製糖業の拡大、人口増加に伴う生活用材の需要増大などにより、多くの木材が必要とされた。特にリュウキュウマツは、琉球王府における行政の最高決定機関である評定所から山奉行宛にだされた「杣山法式仕次」（1747年）の中でも船用材や陶器を焼く薪として重要視され、広く植林が進められていた。更に、「樹木播植方法」（1747年）ではリュウキュウマツの仕立て方や採種時期等についても詳細に記載されており、重要な樹種であったことが窺える。廃藩置県後、旧藩制度を基礎として編集された「杣山制度論」（1904年）においても、矮小な林木のみが取り残されている粗悪林では、立木を伐採し乾燥後、火入れを行い、リュウキュウマツの直播き造林を行うことで林分を改善することが記載されている。このように、リュウキュウマツは景観形成や経済林の目的だけでなく、粗悪な林分にも適応可能な樹種として扱われていた。

1910～2015年の民有林の年度別造林面積とリュウキュウマツの造林面積割合を示す（図1）。沖縄県発足後の1910年から太平洋戦争前の1940年まで、造林面積に大きな増減はあるもののリュウキュウマツ造林は造林面積の50%以上を占めていた。アジア太平洋戦争直後は、海岸防風林・防潮林の早期造成が必要とされたことや育苗技術が確立されていたこと等から一時期モクマオウが主要造林樹種になっていたが、造林事業の進展につれ、その対象地が次第に奥地化したことなどの理由により、再び、より土壌の適応範囲が広いリュウキュウマツに重点が置かれた。

近年においては、リュウキュウマツはその木目の美しさや歩留まりの良さから家具用材や木製食器等に利用拡大が期待されているが（沖縄県農林水産部農林水産総務課，2017）、マツ材線虫病のため造林できず、需要と供給の均衡が崩れていること、マツ材線虫病の撲滅が困難であること、それ故、マツ材線虫病のまん延している下でも造林が可能な遺伝子源が必要であることからマツ材線虫病に対する抵抗性リュウキュウマツ育種事業に期待が寄せられている。



写真1 大正初期に撮影された官松嶺付近（出典：那覇市歴史博物館）

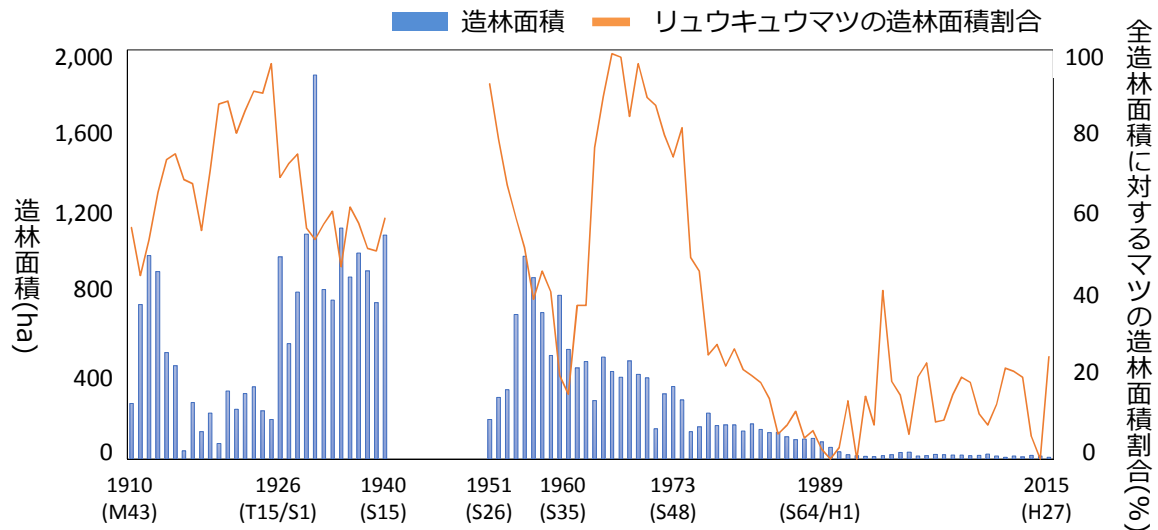


図1 年度別民有林の造林面積及びリュウキュウマツの造林面積割合（1910-2015年）

※1910～1926年度は「沖縄県農林水産行政史第15巻」（1983）。1927～1939年度、1951～1961年度、1964～1971年度は「亜熱帯地域の沖縄林業の歩み」（1984）。1962年度は「琉球要覧 1962年度版」（1963）。1963年度は「琉球要覧 1963年度版」（1964）。1972～2015年度は「沖縄の森林・林業 平成28年版」（2017）より出典。なお、1940～1950年度までのデータは不明

これまでのマツ材線虫病に対するリュウキュウマツ抵抗性個体選抜に向けた取り組み

リュウキュウマツ抵抗性個体選抜に向けた取り組みは、1989年に林木育種センター九州育種場（以下、「九州育種場」とする。）の協力を得て開始された。沖縄県旧仲里村（久米島町）産の種子を九州育種場に送付し、1989年に同所でまき付けを行い約1年半育苗後、1本当たり5,000頭の島原系統を接種し、接種本数718本に対して130本が生存した（生存率18.1%）。そのうち健全であった32本（以下、「仲里り家系」とする。）を1994年に嵐山リュウキュウマツ採種園内（沖縄県名護市）に植栽した（照屋ら、1997）。また、沖縄県林業試験場（現 沖縄県森林資源研究センター（以下、「沖森研」とする。))では、1996年8月に嵐山県有林（沖縄県名護市）の自生リュウキュウマツ420本に対して胸高直径階毎に線虫接種頭数を変え島原系統の接種を行い、約2年半後の1998年3月に160本の生存木を得ている（照屋ら、1998）。2001年から2004年にかけては既述の照屋ら（1998）の試験の生存木や嵐山県有林内の未接種木に対し、接種時期を考慮し再度島原系統の接種を行い、128本が生存し（以下、「AI家系」とする。）、特に樹脂滲出異常を示さない9本が確認された（中平、2004）。2006年からは仲里り家系やAI家系、激害地で生存していた68個体から種子を採種し、この種子に基づいて作出した苗を約1年半育苗後、1本当たり5,000頭の島原系統の接種検定を繰り返し行うことにより、高い抵抗性を有すると期待される抵抗性候補木11本を選抜した（酒井、2012）。選抜にあたっては推定生存率60%以上を抵抗性とした。なお、60%以上の基準は、九州育種場から供与を受けた九州育種場産及び金峰山産テーダマツを沖森研で育苗し、1本当たり5,000頭の島原系統の接種検定を行った186本の結果に基づき設定した（中平、2007）。このように選抜してきた抵抗性候補木を用いて、2012年には沖縄県営林内（沖縄県国頭郡東村）に、抵抗性リュウキュウマツ暫定採種園の造成を開始した。

近年の研究状況と今後の抵抗性育種事業の方向性について

宮田ら（2015）は、全国からクロマツを収集し、DNAマーカーを利用することによって、地域間に遺伝的構造が存在することを明らかにしている。リュウキュウマツについても離島を含めて各地域に広がっており、離島間等の地域によって遺伝的構造が異なる可能性がある。一方で、選抜した抵抗性候補木11本（酒井、2012）は旧仲里村由来が6本、嵐山の自生リュウキュウマツ由来が4本、国頭村辺野喜由来が1本と地域に偏りがある。今後、これら抵抗性候補木から開発された抵抗性品種が各地域に持ち込まれた場合、地域によっては固有の遺伝子構造が改変される可能性が考えられる。そのため、沖森研ではリュウキュウマツにおける遺伝的多様性評価や島嶼群の固有性を明らかにし、これら結果を踏まえた上で、抵抗性候補木の追加選抜や抵抗性リュウキュウマツの品種開発に取り組んでいく予定である。また、品種開発には選抜実施要領の策定や抵抗性品種開発の基準となる対照系統の選定に加え、接種検定に向けたリュウキュウマツのクローン増殖方法等の確立など、解決すべき課題があることから、引き続き、関係機関とともに検討を進める予定である。

引用文献

宮田翔介・岩泉正和・井城泰一・田村美帆・渡辺敦史（2015）クロマツ多様性評価に基づく抵抗性品種の再評価，https://www.jstage.jst.go.jp/article/jfsc/126/0/126_415/article/-char/ja/（2017年9月3日アクセス）

- 那覇歴史博物館,<http://www.rekishu-archival.city.naha.okinawa.jp/archives/item3/15780>,
(2018年1月24日アクセス)
- 中平康子 (2004) リュウキュウマツ成木へのマツノザイセンチュウ接種試験—嵐山における2003年～2005年までの試験接種結果—. 沖縄県林業試験場研究報告47: 8-14.
- 中平康子 (2007) 抵抗性リュウキュウマツの選抜育種. 沖縄県林業試験場業務報告18: 17-18.
- 中須賀常雄 (1995) 沖縄林業の変遷, 188pp, ひるぎ社, 沖縄.
- 沖縄県農林水産部農林水産総務課 (2017) 沖縄の農林水産業, 65pp, 沖縄県農林水産部農林水産総務課, 沖縄.
- 沖縄県農林水産部森林管理課 (2017) 沖縄の森林・林業 平成28年版, 80pp, 沖縄県農林水産部森林管理課, 沖縄.
- 沖縄県農林水産行政史編集委員会 (1984) 沖縄県農林水産行政史 第15巻, 886pp, 農林統計協会, 東京.
- ラブ・オーシュリ・上原正稔 (1987) 青い目が見た大琉球, 240pp, ニライ社, 沖縄.
- 琉球政府計画局 (1963) 琉球要覧 1962年度版, 563pp, 琉球政府計画局広報課, 沖縄.
- 琉球政府計画局 (1964) 琉球要覧 1963年度版, 563pp, 琉球政府計画局広報課, 沖縄.
- 酒井康子 (2012) 松くい虫抵抗性リュウキュウマツの育種母樹の選抜について—抵抗性候補木由来の実生苗への線虫接種検定による母樹の抵抗性評価と接種年による比較—. 沖縄県林業試験場研究報告53: 5-9.
- 篠原武夫 (1984) 亜熱帯地域の沖縄林業の歩み, 128pp, 琉球林業協会, 沖縄.
- 照屋秀雄・嘉手苺幸男・比嘉亨・上地豪 (1997) 松の材線虫病抵抗性松の育種—松材線虫病抵抗性松 (リュウキュウマツ) 種子採種園造成 (Ⅲ) —. 沖縄県林業試験場業務報告8: 48.
- 照屋秀雄・嘉手苺幸男・比嘉亨・仲栄間盛長・戸田忠雄 (1998) 松の材線虫病抵抗性松の育種—松材線虫病抵抗性松 (リュウキュウマツ) 種子採種園造成 (Ⅴ) —. 沖縄県林業試験場業務報告9: 53.

デイゴヒメバチ *Quadrastichus erythrinae* の天敵デイゴカタビロコバチ *Eurytoma erythrinae* の環境影響評価

安田慶次¹・喜友名朝次¹・玉城雅範¹・清水優子¹・春日大輔¹・湯川淳一²・松尾和典²・徳田誠³・上地奈美⁴・喜久村智子⁵

¹沖縄県森林資源研究センター、²九州大学、³佐賀大学農学部、⁴農研機構果樹茶業研究部門、⁵沖縄県北部農林水産振興センター農業改良普及課

Environmental impact assessment of the natural enemy *Eurytoma erythrinae* of *Erythrina* Gall Wasp *Quadrastichus erythrinae*

Keiji Yasuda, Cyouji Kiyuna, Masanori Tamashiro, Yuko Shimizu and Daisuke Kasuga (Okinawa Prefectural Forest Research Center), Junichi Yukawa and Kazunori Matsuo (Kyushu University), Nami Uechi (National Agriculture and Food Research Organization Breeding & pest management research division), Tomoko Kikumura (Okinawa Prefectural Agriculture, Forestry and Fisheries Promotion Center).

1. はじめに

沖縄の県花としても親しまれるデイゴ（マメ科）は、近年、侵入害虫のデイゴヒメコバチ *Quadrastichus erythrinae*（以下 **Qe**）によって、大きな被害を受けている。**Qe** はデイゴ属植物の小葉や葉柄に不定形のゴールを形成するアフリカ原産のヒメコバチで、世界的なデイゴ害虫として知られている。とくに新芽が加害されるため、樹勢が弱まり、開花率は著しく低下する（安田，2015）。一部の被害木の中には枯死するものもあり、本種との関係が疑われているところである。

石垣島で2005年5月に国内で初めて発見されて以来、**Qe** は沖縄県や鹿児島県（奄美地方）で侵入・定着が確認されている（Uechi, et al. 2007）。われわれは、すでに実施されている化学的防除（喜友名，2017）に加え、カタビロコバチ科の寄生蜂 *Eurytoma erythrinae*（以下、**Ee**）による伝統的生物的防除の可能性を検討してきた（安田，2015）。**Ee** はアフリカ原産で、デイゴヒメコバチに特異的に寄生する蜂として記録されており（Gates & Dlevare, 2008）、すでに、タンザニアからハワイに導入され、ハワイでは **Qe** の密度低減に効果があることが認められている（Yalemar and Bautista, 2011）。当面は、防除効果の高い化学的防除と伝統的生物的防除を組み合わせることによって、広範で **Qe** の発生密度を大幅に低下させることが可能になると考えている。また、沖縄県内で、現行の防除対策を実施するのに1億円前後の経費が使われており、今後長期にわたる財政的な負担は大きな課題となっている。一方、**Ee** 導入後のハワイではデイゴ属の樹木は回復しつつあり、すでに樹幹への薬剤注入等も行われていない。将来、伝統的生物的防除法によりデイゴへの薬剤処理が全廃されれば、資金面、環境面からも利益は大きい。**Ee** を防除のために野外に放飼するには、生物農薬として農薬登録する必要がある。

さらに、**Ee** を野外に放飼する前に、在来生物相に与える影響を十分に評価し、導入の可否を慎重に検討する必要がある。そこで、影響評価対象の昆虫を選定するため、文献等に

より寄主範囲の傾向を調査し、それに基づいて沖縄県内に分布する影響評価対象の昆虫の絞り込みを行った。絞り込んだ昆虫に加え、農業上の害虫やその天敵を対象に産卵行動、非標的寄主での発育調査等を実施した。

また、Ee の形態と在来の近縁種 1 種との形態比較を行ったうえ、DNA 解析で在来種との違いを明らかにした。

2. 材料と方法

1) 文献による調査

Eurytoma 属は種数が豊富で、その宿主範囲が広い (松尾ら, 2014)。およそ世界中で 700 種が知られ、301 種は旧北区から、61 種はアフリカから発見されている。47 種のアフリカ種が寄生者として記録されており、そのうち 7 種は *Hymenoptera* (蜂の仲間) を攻撃する。これらの 7 つの種のうち、2 つだけがアシブトコバチ上科 (*Chalcidoidea*) の寄生者として知られている。(Gates & Delvare, 2008)

多くの寄生蜂と同様、*Eurytoma* 属の寄主範囲は、寄主の分類学的位置や生活様式に密接に関連していた。そこで、ゴール形成者 (タマバエ科、タマバチ科) や潜葉者 (ハモグリバエ科、ハモグリガ科)、ヒメコバチ科に寄生する種について、重点的に、寄主範囲の傾向をこれまでの記録をもとに調査した (松尾ら, 2014)。

2) 産卵行動および成虫の交尾行動からみた影響調査

沖縄県内に分布する影響評価対象となる昆虫の絞り込みを行い (表 1)、その対象となる昆虫を野外から確保し、対象となる寄主への Ee 雌成虫の産卵行動を中心に影響評価を実施した。

a 直接観察による対象寄主虫こぶと Qe 虫こぶへの Ee 雌成虫による二者択一試験

直接観察による Ee 雌成虫による二者択一試験を実施した。調査は直径 10cm のシャーレ内に供試する昆虫の虫こぶもしくは昆虫 (表 1) と Qe 虫こぶ 1.2–1.5g を入れ、Ee 雌成虫が 60–75 分間にいずれに産卵行動を示すかを観察した。なお、産卵行動を示した Ee 雌成虫は直ちに除外した。また、調査は Ee 雌成虫 2 頭を同時に入れて行ったが、事前の調査で、互いの行動に影響を与えないことを確認した。また、Ee 雌成虫が産卵行動を示した虫こぶ等は保管後調査を行い、捕食の有無や Ee の有無を調べた。

b 虫こぶに対する網掛産卵試験

デイゴに寄生した Qe の虫こぶを対照区にイスノキミタマバエの虫こぶ、インゲンモグリバエの被害茎、ミナミノブドウミタマバエの虫こぶ (カタビロコバチが一部寄生) の 3 種について網掛け産卵試験を実施した。試験は評価対象昆虫の虫こぶに網掛けて既交尾と思われる Ee 雌成虫を 10 頭放し、14–30 日程度保管し、その後、羽化する Ee 成虫の種類と虫数を調べ、さらに虫こぶを解剖して捕食痕の有無を調べた。繰り返しは各種 3–4 回とした。

c マメ科作物加害の有無に関する試験

沖縄県内でよく栽培されるマメ科のインゲンマメ、アズキ、ササゲ、ソラマメおよび加害されていないデイゴの鉢植えに網掛けして Ee 雌雄各成虫 10 頭を放飼し、放飼 1 時間の産卵行動観察 20 日程度保管後の作物加害の有無を調べた。

d 異種成虫間の交雑試験

ミナミノブドウミタマバエ *A. sp* 成虫 (B) と *Ee* 成虫 (D) による交雑の観察は長さ 10cm、直径 1cm の透明プラスチック製チューブに各雌雄成虫を 1 ペア入れ、1 時間行った。B♂対 D♀が 5 ペア、B♀対 D♂が 10 ペア、B♂対 B♀が 5 ペア、D♂対 D♀が 15 ペアを観察した。

表1. デイゴカタビロコバチ雌成虫の産卵行動、カタビロ幼虫の捕食発育の有無、捕食の有無及び判定

種名	産卵行動	<i>Ee</i> の幼虫の発育、捕食	判定
イスノキミタマバエ	×	×	×
ミナミノブドウミタマバエ	×	×	×
テリミノイヌホオズキミタマバエ	○	×	×
アオノクマタケランミタマバエ	×	×	×
マツバナタマバエ	○	×	×
インゲンモグリバエ	○	×	×
マメハモグリバエ	×	×	×
トマトハモグリバエ	×	×	×
ナモグリバエ	○	×	×
ハモグリミドリヒメコバチ	×	×	×
ナモグリバエの寄生蜂	○	×	×
ノブドウカタビロに寄生するカタビロコバチ	○	×	×
アオノクマタケランのタマバエに寄生するカタビロコバチ	×	×	×
ガジュマルの気根に寄生するカタビロコバチ	×	×	×
ミカンコナカイガラムシ	×	×	×
対照 デイゴヒメコバチ	◎	◎	◎

3) 成虫の形態による在来種との比較

デイゴカタビロコバチと在来のカタビロコバチ (9 種?) の雌成虫について、顕微鏡を用いて外部形態を観察した (表 2)。

表 2 成虫の形態比較に供試した在来のカタビロコバチとその近縁種

種名	宿主	備考
デイゴカタビロコバチ <i>Eurytoma erythrinae</i>	デイゴ	茎、葉
ヨモギクキワタ <i>Eurytoma sp.A</i>	ヨモギ	茎
クヌギエダイガ <i>Eurytoma sp.B</i>	クヌギ	枝、イガ
<i>Eurytoma sp.C</i>	ボロボロノキ	実
<i>Eurytoma sp.C</i>	イスノキ	実
<i>Eurytoma dentata</i>	キツタツボミ	ツボミ
<i>Eurytoma dentata</i>	ノブドウ	実
<i>Eurytoma dentata</i>	アオキ	実
<i>Eurytoma sp.D</i>	ガジュマル	気根

<i>Eurytoma goidanichi</i>	アオムシコマユバチ	マユ
<i>Syceurytoma</i>	サワフタギ	種子
オナガコバチ <i>Torymus aiolomorphi</i>	モウソウチク	

4) DNA 塩基配列による比較

日本に分布するカタビロコバチ科の mtDNA 701 塩基配列を調べ、近隣結合樹を作成し、デイゴカタビロコバチとの遺伝的違いを調べた。

5) 既存の評価方法による導入可否の評価

a. 環境省による導入天敵に対するガイドラインに基づく評価と b. 農林水産省による定量的リスク評価を行った。

3. 結果

1) 文献による調査

ゴール形成者や潜葉者（ハモグリバエ科、ハモグリガ科）、ヒメコバチ科に寄生する *Eurytoma* 属は 146 種で、そのうち、54%の種は単食者もしくは同属複数種に寄生する狭食者であり、比較的寄主特異性の高い分類群であることが分かった。タマバエ科では、*Asphondylia* 属をはじめ、*Dasineura* 属、*Lasioptera* 属、*Orseolia* 属、*Rabdophaga* 属に *Eurytoma* 属が寄生していた。これらのうち、*Rabdophaga* 属はヤナギ類を寄主としていることから、沖縄県や奄美群島には分布していないと考えられる。したがって、これらの地域で Ee の寄生対象になる可能性のある種は、前 4 属のタマバエ科と考えられる。また、Qe を含む *Quadrastichus* 属は、ハモグリバエ類の一次寄生蜂として記録されている種がある。Ee がハモグリバエ類の一次寄生蜂に高次寄生する可能性があり、導入に際しては注意を払う必要がある。天敵導入が在来生物相に与える影響を評価するために Ee の寄主範囲を文献調査等により、影響評価対象となる昆虫を選定した。*Eurytoma* 属全体を俯瞰し、寄主範囲の傾向を調査した。多くの寄生蜂と同様、*Eurytoma* 属の寄主範囲は、寄主の分類学的位置や生活様式に密接に関連していた。そこで、沖縄県に分布するゴール形成者（タマバエ科、タマバチ科（沖縄県に分布する種に影響を与えそうな種は見つかっていないため省略（阿部氏））や潜葉者（ハモグリバエ科、ハモグリガ科）およびヒメコバチ科に寄生する種について、重点的に、寄生の可否を調査すべきである。Qe の虫こぶ上でよく寄生が認められるミカンコナカイガラムシ *Planococcus citri* についても調査を行うべきであると考えた。

これらの結果を基に、2015 年から 2017 年にかけて沖縄県下を調査し、調査可能な虫こぶおよび対象の昆虫が入手可能な 15 種を表 1 に示した。有力な虫こぶを形成するイボタミバエ（寄主はネズミモチ）が分布することが過去に Uechi *et al* (2012) によって明らかとなっているが今回 3 年間にわたり数十カ所、数百樹の花、ツボミ、果実を調査したが、タマバエの虫こぶは発見できなかった。

2) 産卵行動および成虫の交尾行動からみた影響調査

a 直接観察による対象寄主虫こぶと Qe 虫こぶへの Ee 雌成虫による二者択一試験

調査方法の妥当性を検証するため、デイゴ健全新鞘と Q_e のゴールに対する E_e 成虫の産卵行動を中心に事前に調査したところ、 E_e 雌成虫 40 頭中 39 頭 (97.5%) が Q_e の虫こぶのみに産卵行動を示したことから、この調査方法は妥当であると判断した。

試験の結果を表 1 に示す。供試した 15 種のうち、テリミノイヌホオズキミタマバエ $A.sp.$ 、マツバナタマバエ、インゲンモグリバエ、ナモグリバエ、ミナミノブドウミタマバエに寄生するカタビロコバチの一種の 6 種で産卵行動が確認されたものの、 E_e の幼虫生息や食害痕はなく、寄生は認められなかった。

b 虫こぶに対する網掛産卵試験

デイゴに寄生した Q_e の虫こぶを対照区にイスノキミタマバエの虫こぶ、インゲンモグリバエの被害茎、ミナミノブドウミタマバエの虫こぶ (カタビロコバチが一部寄生) の 3 種とも、 E_e の羽化は認められなかった。さらに虫こぶを解剖して捕食痕の有無を調べたところ、食害痕はなく、 E_e は認められなかった。なお、対照区の Q_e 虫こぶに対する E_e 成虫網掛け試験では供試 3 株から E_e の成虫が羽化し、虫こぶ内を解剖した結果、 E_e による捕食痕が認められた。

c マメ科作物加害の有無に関する試験

マメ科の草本 4 種 (インゲンマメ、アズキ、ササゲ、ソラマメ) と加害されていないデイゴとも、 E_e による産卵行動や幼虫による作物の加害は認められなかった。その後、新成虫の羽化等は観察されなかった (データ省略)。

d 異種成虫間の交雑試験

ノブドウカタビロ成虫 (B) と E_e 成虫 (D) による交雑の観察の結果、異種間でのマウント等の交尾につながる行動は観察されず、交尾率はそれぞれ 0% であった。接触も多くの場合触覚を接触することで終了した (図 1)。同種間での交尾率は B♂対 B♀が 4 ペア (交尾率 80%)、D♂対 D♀が 14 ペア (交尾率 93.3%) と高く、それぞれ交尾能力を有することがわかった (表 3)。

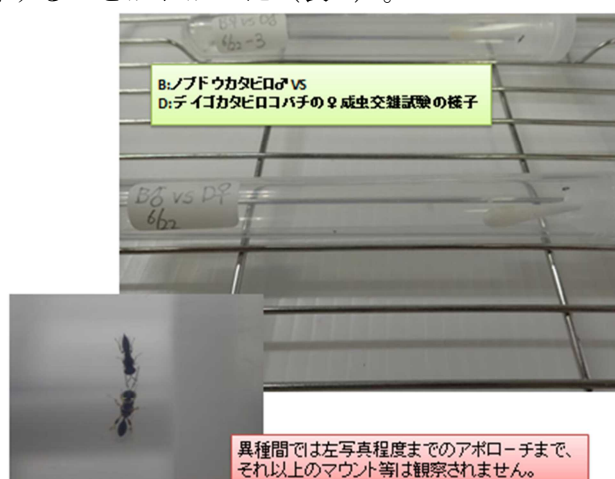


図 1. デイゴカタビロコバチとノブドウカタビロの成虫交雑試験

表 3.

デイゴカタビロVSノブドウカタビロの交雑試験

B♂:ブドウの雄、B♀:ブドウの雌、D♂:デイゴの雄、D♀:デイゴ♀

	B♂ VSD♀		B♀ VSD♂		B♂ VSB♀		D♂ VsD♀	
	行動	月日	行動	月日	行動	月日	行動	月日
1	×	6月15日	×	6月13日	○	6月16日	○	6月16日
2	×	6月16日	×	6月15日	×	6月17日	○	6月17日
3	×	6月20日	×	6月20日	○	6月21日	○	6月21日
4	×	6月22日	×	6月21日	○	6月22日	○	6月22日
5	×	6月22日	×	6月22日	○	6月24日	○	6月24日
6			×	6月22日			○	6月27日
7			×	6月22日			○	6月28日
8			×	6月22日			○	6月28日
9			×	6月22日			○	6月29日
10			×	6月27日			○	6月29日
11							○	7月22日
12							○	7月22日
13							×	7月22日
14							○	7月22日
15							○	7月22日

3) 成虫の形態による在来種との比較

顕微鏡を用いて外部形態を観察した結果、Ee は頭部後縁隆起がなく（図省略）、前脚腿節の突起もないことから、在来のカタバニコバチとの違いが明確であった。このことを用いれば、野外放飼後にカタビロコバチを調査する際には Ee が在来種かを容易に判断できることがわかった。

4) DNA 塩基配列による比較

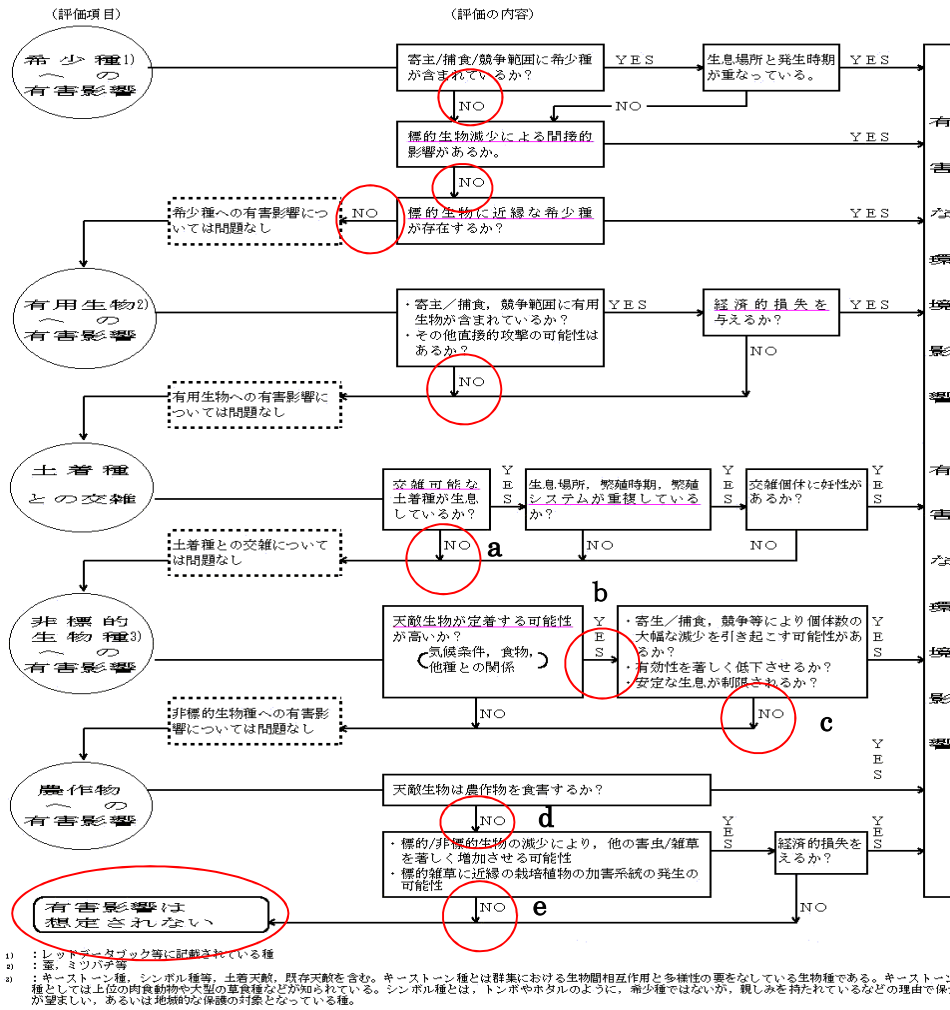
系統樹から、最も配列の近い種(Eurytoma sp.A)であっても、Ee とは約 11%も違っており、明らかな別種であることが分かり、交雑の可能性はないと考えられる。また、DNA の情報は、幼虫や一部欠損個体でも在来種と区別するために活用できる（図省略）。

5) 既存の評価方法による導入可否の評価

a 環境省による環境評価ガイドラインに基づく説明

環境省による「天敵農薬に係る環境影響評価ガイドライン」を基に Ee を沖縄に導入する際の適合性を検討した。

表 4. 天敵農薬の環境影響評価のフロー



①文献調査：Ee が農作物や他の昆虫に有害影響を与えるという報告はなかった。

(Nagamine, et al. 2014)

以下環境影響評価フロー（表 4）。

②土着種との交雑：本種が生息するデイゴ虫こぶ上に他のカタビロコバチの生息は確認されていない。また同属のミナミノブドウタマバエに寄生するカタビロコバチ sp. との交雑試験の結果、交雑は起こらず、土着種との交雑は問題なしと判断された（表 3a）。

③非標的生物種への有害影響：Ee が定着する可能性は高い（表 3b）が、Ee はデイゴヒメコバチのみを加害する単食性のため非標的生物への影響はないと判断された（表 3c）。

④農作物への有害影響：Ee はインゲンマメ、アズキ、ササゲ、ソラマメ、デイゴを加害しない（データ省略）。また、マメ科作物の害虫マメハモグリバエ、インゲンモグリバエの幼虫に寄生することもなかった。また、マメ科作物の潜葉害虫に寄生するハモグリミドリヒメコバチに寄生することもなく、農作物への有害影響はないと判断された（表 3d）。また標的／非標的生物の減少により、他の害虫を著しく増加させる可能性はない（表 3e）。

以上より有害影響は想定されないと判断された。

b. 農林水産省農業環境研究所（独法）望月氏による「導入天敵昆虫等の新たな生態系

影響評価方法と導入判断基準」(定量的リスク評価手法)に基づく適合性の検討(望月, 2013)

導入天敵が生態系に与える影響を、その可能性と程度に分けて、定着性から交雑まで6つの評価の項目(表5)について、適合性を5段階の基準で評価した。1次指標では生態影響を中心に、総合指標で固有種への直接影響を加えて評価した。1次指標が40以下、総合指標で80以下を導入可とした。

表5. 「導入天敵昆虫等の新たな生態系影響評価方法と導入判断基準」への適合性(農業環境研究所)

天敵の種類\評価項目		定着	分散性	寄主範囲	1次指標	直接影響	競争	交雑	総合指標
デイゴカタビ ロコバチ	L	5	1	2	10	1	1	2	16
	M	1	3	1		1	1	2	
	L×M	5	3	2		1	1	4	

<40 ← 導入可能水準 → <80

① 1次基準への適合性の判断

L:生態系影響の可能性

a:定着性は年2化以上、休眠性ありで、5ポイント、b:分散性(導入ステージの余命):野外では1週間未満(網掛け試験の結果)で、1ポイント。c:天敵の摂食量=体長(最大雌2.4mm)で2ポイントとなる。

M:生態系影響の程度

a:定着はQeの虫こぶの存在する場所に限られるため、ごく限られた地域だけで、1ポイント。b:分散性(導入ステージの移動速度)は1m/s未満、ほとんど動かさずで、1ポイント。c:寄主範囲はQeのみに寄生することから、同属の種となり1ポイントとなる。

上記より1次指標は10ポイントとなり、導入可の40ポイントを下回り、導入可能と判断された。

② 2次基準(総合指標)への適合性の判断

L:生態系影響の可能性

a:希少種や地域固有種への直接影響は寄生がデイゴ属の虫こぶのみ限られ、虫こぶ内に生息する他のカタビロは発見されていないため、1ポイント。b:近縁種との競争は寄主範囲が重ならないため、1ポイント。c:近似種との交雑は限られた生息場所から、交雑率は低い(一種のみ、交雑しないことを確認)ため、2ポイント。

M:生態系影響の程度

a:希少種や地域固有種への直接影響について、希少種等は寄主となり得ないため、1ポイント。b:近縁種との競争はデイゴ上では競争が生じないため、1ポイント。

c: 近似種との交雑は形態的には似通っているが、雄が雌との接触後、相手を認知しないし、雌も受け入れないため（一種のみ、交雑しないことを確認）ため、雌雄交尾信号に種間差ありで、2ポイント。

上記より、1評価が40ポイントを上回った場合に行う総合指標でも16ポイントと、導入可能水準の80ポイントを大きく下回り、Eeは導入可能と判断された。

考察

文献調査の結果、*Eurytoma* 属の寄主範囲は、寄主の分類学的位置や生活様式に密接に関連していた。そこで、沖縄県に分布するゴール形成者（タマバエ科）とその寄生者や潜葉者（ハモグリバエ科）とその寄生者ヒメコバチ科、に属する15種について調査をおこない、さらに、Qeの虫こぶ上でよく寄生が認められるミカンコナカイガラムシ *Planococcus citri* についても調査を行ったが、いずれもEeの寄生（捕食）を受けたりすることはなかった。タマバエ科5種については発生時期の多くが冬から春に限られており、また、Qeの発生がピークとなる夏場が休眠している可能性が高い。逆にQeの発生も5月中旬以降となるため生活史の上からも寄生は困難であると考えられる。ハモグリバエ科4種はいずれも沖縄県の農業上重要な害虫であるが、Eeはこれらを捕食したり、寄生することはなく、影響はないと考えられた。また、沖縄県におけるハモグリバエ科の代表的な寄生蜂ハモグリミドリヒメコバチやナモグリバエの寄生蜂 *Dances nipponica* を捕食することはなかった。また、Qeの虫こぶによく発生し、Eeを野外に放飼した際に最も身近な昆虫と考えられるミカンコナカイガラムシをEe成虫が捕食し、または産卵行動等を示すことはなかった。ただ、ミカンコナカイガラムシのハニーデューをEeの成虫が摂食する行動が観察された。交雑試験はミナミノブドウミタマバエの1種のみで行ったが観察の結果、交尾につながる行動は観察されなかった。顕微鏡を用いて外部形態を観察した結果、在来のカタビロコバチとの違いが明確であった。DNA塩基配列による比較でも最も配列に近い種(*Eurytoma* sp.A)であっても、Eeとは約11%も違っており、明らかな別種であることが分かり、交雑の可能性はないと考える。

Nagamine (2006) によれば、ハワイでの宿主特異性試験は、HDOA（ハワイ州農務省）昆虫隔離施設で行われた。Eeの宿主範囲調査はゴールを形成する7種で行われ、それらはハワイ土着種のトガリキジラミの1種、4種の有益な種（雑草の生物学的防除のために使用される1種類のカイガラムシを含む3種のミバエ類）さらに1種のイチジクコバチおよび1種のヒメコバチが含まれる。調査の結果、Eeはそれらの非標的宿主を攻撃することはなかった。さらにEe雌成虫による行動観察をおこなった。すなわち、刻んだ植物および寄生虫に対する誘引試験を非標的種の虫こぶとQe（対照）との選択試験でおこなった。Eeのメスは非標的種の植物にはほとんど興味を示さず、明らかにEeゴールを持つデイゴを好んだ。Qe羽化は非標的種の寄生虫を曝露した虫こぶでは起こらなかった。その後の虫こぶ解剖調査ではEeの寄生は認められなかった。EeはQeに宿主特異な種であることが証明されたと、述べており、上記の結果を裏付けた。また、これを受けてハワイでは野外放飼を実施したが、農作物や他種への影響は認められていない。

以上のことから沖縄県の野外にEeを放飼してもその影響はほとんど認められないと思われる。

引用文献

- Gates&Delvare (2008) A new species of Eurytoma (Hymenoptera:Eurytomidae) attacking *Quadrastichus* spp. (Hymenoptera:Eulophidae) galling *Erythrina* spp. (Fabaceae) ,with a summary of African Eurytoma biology and species checklist
- Heu,R.A., Tsuda,D.M., Nagamine,W.T., Yalamar,J.A., Suh,T.H. (2006)
- Joseph J. Docola, Sheri L. Smith, Brian L. Strom, Arthur C. Medeiros, and Erica von Allmen (2009) Systemically Applied Insecticides for Treatment of *Erythrina* Gall Wasp, *Quadrastichus erythrinae* Kim(Hymenoptera:Eulophidae). *Arboriculture & Urban Forestry* 2009.35(4):173-181
- 環境省 (1999) 天敵農薬環境影響調査検討会報告書 - 天敵農薬に係る環境影響評価ガイドライン - <http://www.env.go.jp/water/report/h11-01/all.html>.
- 喜友名朝次 (2013) 九州森林研究 **66** : 71-73
- 喜友名朝次 (2017) 林業と薬剤 **219** : 7-12
- 松尾和典ら (2014) 第24回天敵利用研究会講演要旨
- 望月 淳 (2013) 海外における導入天敵のリスク評価 植物防疫 **67** : (6) 8-11
- Nagamine, et al. (2014) Host specificity and biological studies for *Eurytoma* sp. (Hymenoptera:Eurytomidae), a potential biological control agent of the *Erythrina* gall wasp, *Quadrastichus erythrinae* Kim(Hymenoptera:Eulophidae) Hawaii Department of Agriculture 1-15.
- Nagamine W.,Mohsen Ramadan,and Julian Yalamar(2006) Host specificity and biological studies for *Eurytoma* sp.(Hymenoptera:Eurytomidae),a potential biological control agent of the *Erythrina* gall wasp,*Quadrastichus erythrinae* Kim (Hymenoptera:Eulophidae) HDOA,1-15.
- Uechi, et al. (2007) Detection of an invasive gall-inducing pest, Entomological *Quadrastichus erythrinae* (Hymenoptera :Eulophidae), causing damage to *Erythrina variegata* L. (Fabaceae) in Okinawa Prefecture, Japan. *Entomological Science* 10:209-212.
- Uechi, N., et al. (2012) Findings of New Cecidomyiid Galls Induced by *Asphondylia* Segregates (Diptera:Cecidomyiidae) in Japan
- Uechi,N., Takumi,U., & Yukawa, J.(2007) Detection of an Invasive gall-Inducing pest,*Quadrastichus erythrinae* (hymenoptera:Eulophidae) ,causing damage to *Erythrina variegata* L. (Fabaceae) in Okinawa Prefecture,Japan.*Entomological Science*,10,209-212.
- Yalamar,J.A. and Renato C.Bautista (2011) Biological Control of the *Erythrina* Gall Wasp in Hawaii.USDA APHIS PPQ Biological Control.HDOA,1-9.
- 安田慶次 (2015) みどり **173** : 7-10