

速報

冬期の高温がスギの成長と材形成に与える影響の評価*¹酒本 大*²・玉城雅範*³・栗田 学*⁴・阪上宏樹*⁵・田村美帆*⁵・渡辺敦史*⁵

酒本 大・玉城雅範・栗田 学・阪上宏樹・田村美帆・渡辺敦史：冬期の高温がスギの成長と材形成に与える影響の評価 九州森林研究 73：115－119，2020 気候変動により生じる将来的な平均気温の上昇によるスギへの影響が懸念される。しかし気温の上昇がスギに与える影響に関する理解は進んでいない。本研究では、冬期の高温がスギの表現型に与える影響を明らかにするため、冬期が温暖な気候下で生育し、長期的に冬期の高温の影響を受けていると推測される沖縄県に植栽されたスギの晩材率を評価した。沖縄県に植栽されたスギ7個体の晩材率は30.4%から41.2%と高い値を示した。また温室を用いて冬期高温処理を施したスギ実生苗の主軸部伸長成長と生重量の増加量及び挿し木苗の主軸部伸長成長を経時的に評価した。挿し木苗の伸長成長の評価では、コントロールと冬期高温処理区の成長パターンに違いが認められたことから、冬期の高温が成長フェノロジーに影響する可能性を示唆し、また品種間で冬期の高温に対する応答性が異なることが示唆された。

キーワード：スギ、冬期の高温、成長フェノロジー、晩材率

I. はじめに

世界的な地球温暖化による気候変動の影響で今後の地球環境に大きな変化が生じることが予測されている。日本における平均気温の将来的な変化もその一例である。RCP 8.5 シナリオを用いた最新の気候変化予測（気象庁，2017）によると、日本ではいずれの季節においても、現在気候と将来気候（2076年～2095年）を比較した際に約4℃から5℃程度の昇温が予測されている。特に冬期は海水や積雪が融解し太陽放射を吸収しやすくなる影響により、四季のなかで最も昇温が見込まれており、全国平均で5.0±0.9℃の昇温が見込まれている。

暖冬環境下で生育したクロスグリ (*Ribes nigrum*) を対象とした研究では、花芽形成や発芽の時期などのフェノロジーに変化が生じたことや休眠や成長に関連する遺伝子の発現時期に違いが生じるなどのクローン間で応答性に違いがあることが報告され、暖冬がクロスグリの果実の収量やフェノロジーに影響を及ぼす可能性が指摘された (Andersen *et al.*, 2017)。しかし、気候変動による昇温が植物に与える影響を評価した研究の多くが、植物の成長期における高温を対象としている上に、多くのモデル植物が一年生植物であるため、休眠期にあたる冬期の高温による影響を評価した研究は非常に限定的である。

一般に、短日条件で温度が低下することによって植物の休眠が誘導され、逆に長日条件で温度が上昇することによって休眠が打破されることで様々な成長が開始する。温暖化は、温度条件には影響するものの、日長条件には影響することはない。Begum *et al.* (2010) は、冬期にスギ (*Cryptomeria japonica*) の木部を局所的に加温することで自然環境下よりも早く形成層活動が開始

することを報告した。この報告事例に従えば、スギでは、休眠期から成長期への移行には温度が強く影響し、冬期の高温は形成層活動に加えて、成長期の長さに影響する可能性があり、スギなどの造林樹種にとってはこれまで以上に成長期が長期化する可能性がある。

スギを含めた木本性樹木は個体サイズが巨大であり、長寿命性であることから、日長や温度等の環境要因の人工的なコントロールを長期的に行うことは困難である。スギの自然分布域は、北は青森から南は屋久島までの冷温帯から暖温帯であり、人工植栽地まで含めれば北海道南部から沖縄地方までの広範囲の温度帯に分布する。このうち、スギの自然分布域外である沖縄県は、亜熱帯海洋性気候下にあり、スギの自然分布域内の九州地方と比較して、夏期の気温には大きな相違がない一方で、冬期では約15℃から20℃程度の気温が維持される冬期の温暖な気候が特徴の1つであることから（気象庁，2018）、沖縄地方に人工植栽されたスギを利用することにより、長期的な冬期の高温による影響を推測できる可能性がある。

本研究では、冬期の高温によるスギの表現型への影響を明らかにすることを目的として、冬期の高温の影響を長期的に受けしていると推測される、沖縄県名護市に植栽されたスギ人工林を対象として成長と材形成への影響評価を行った。さらに、自然光下で温度の人工制御が可能であるファイトトロンを利用して、冬期間に低温暴露しなかったスギ実生苗の主軸部の伸長成長と生重量、さらにスギ挿し木苗の主軸部の伸長成長を経時的に測定することにより、冬期の高温が当年の成長期の伸長成長に与える影響の評価を試みた。

*¹ Sakamoto, D., Tamashiro, M., Kurita, M., Sakagami, H., Tamura, M. and Watanabe, A. : Evaluation of the effects of high winter temperatures on growth and wood formation in *Cryptomeria japonica*.

*² 九州大学大学院生物資源環境科学府 Grad. Sci. Biores. and Bioenvir. Sci., Kyushu Univ., Fukuoka, 819-0395, Japan

*³ 沖縄県森林資源研究センター Okinawa Pref. Forest Resources Res. Ctr., Nago, Okinawa, 905-0012, Japan

*⁴ 森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター九州育種場 Kyushu Regional Breed. Office, Forest Tree Breed. Ctr., For. & Forest Prod. Res. Inst., Koshi, Kumamoto, 861-1102, Japan

*⁵ 九州大学大学院農学研究院 Fac. Of Agric., Kyushu Univ., Fukuoka, 819-0395, Japan

II. 材料と方法

2-1. 沖縄スギ林を利用した冬期の高温による影響評価

2-1-1. 林分調査の概要

2018年1月と10月に沖縄県名護市に植林されたスギ林のスギ71個体の樹高及び胸高直径を測定した。樹高測定にはパーテックスを、胸高直径の測定には、直径巻き尺を利用した。測定した胸高直径と樹高に基づき、以下の式を用いて個体ごとの形状比を算出した。

$$\text{形状比} = (\text{樹高(m)} / \text{胸高直径(cm)}) \times 100$$

2-1-2. 晩材率の評価

供試材料は2018年1月11日に2-1-1のスギ林のスギ7個体から採取した成長錐コアである。成長錐コアはインクリメントボア(コア直径5.15mm)を使用して現地で採取後、九州大学に持ち帰り、採取から5日以内に-5℃で冷凍保存した。冷凍保存した成長錐コアを実験室で自然乾燥させた後、滑走式マイクロームを用いて木工面を平滑にし、共焦点レーザー顕微鏡Leica TCS SP8 (Leica Microsystems) を使用して、切削面の樹皮側から10年輪分(偽年輪や測定不可な年輪は除く)の早材と晩材の境界を決定した。早材と晩材の境界の決定はモルクの定義(Mork 1928)に従い、晩材率(晩材幅/1年輪幅×100)を個体ごとに算出した。

2-1-3. DNA マーカーを用いた沖縄スギ林のクローン識別

供試材料は2018年1月11日に2-1-1のスギ林のスギ27個体から採取したシュートである。DNA抽出は、DNeasy Plant Mini Kits (QIAGEN) を使用して行った。本研究では、4つのSSR (simple sequence repeat) マーカー (Moriguchi *et al.*, 2003; Tani *et al.*, 2004) をクローン識別に使用した。PCR反応はMiyamoto *et al.* (2015) に従い、Simpliamp Thermal Cycler (ABI) を使用して行った。得られたPCR産物は3730 DNA Analyzer (Applied Biosystems) で電気泳動後、GeneMapper ver. 4.0 (Applied Biosystems) でフラグメントサイズを決定した。クローン同定には、スギ精英樹DNA型データベース(未公表)を利用した。

2-2. ファイトトロンを利用した冬期高温処理試験

2-2-1. 主軸部の伸長成長の評価

供試苗は、小型ビニールポットに1個体ずつ植栽されたスギ2年生実生苗80個体とスギ2年生挿し木苗60個体である。挿し木苗は九州育種基本区の精英樹品種である飢肥署5号・県大分5号・水俣署5号の3品種をいずれも20個体ずつ使用した。また植栽土壌には実生苗と挿し木苗共に鹿沼土細粒を使用した。

各処理区の使用個体数は表-1に、処理区ごとの処理期間の概略は表-2に示した。3つの冬期高温処理区の苗は、九州大学生物環境利用推進センター内のファイトトロン・ガラス室(20℃一定、自然光、相対湿度70±5%)内で十分に灌水を行い生育した。コントロールとした苗は、九州大学伊都キャンパス内の圃場にて、自然環境下で十分に灌水を行い生育した。

主軸部の伸長成長の測定は、全ての実生苗・挿し木苗に対して

行った。実生苗は2018年11月2日、挿し木苗は2018年11月20日に苗高を測定した後、主軸部の頂端から-3cmの位置に油性マーカーで印を付け、その印から頂端までの長さを約1ヶ月おきに測定した。実生苗は2018年11月2日に測定を開始し、2019年10月9日まで計12回測定した。挿し木苗は2018年12月17日に測定を開始し、2019年10月17日まで計11回測定した。測定した樹高に基づき、処理区ごとの月別成長率を以下の式に従って算出した。

$$\text{月別成長率} = (\text{当月測定日の樹高(cm)} - \text{前月測定日の樹高(cm)}) / \text{前月測定日の樹高(cm)}$$

2-2-2. 生重量の評価

供試苗は2-2-1で使用したスギ2年生実生苗80個体である。生重量の初回測定は、2-2-1の実験開始前の2018年10月25日に自然環境下で生育した実生苗を土から掘り起こし、きれいに土を取り除いた後、電子天秤を使用して行った。2回目の測定は、2-2-1の実験終了後の2019年10月14日に同様の方法で再度行った。測定した生重量から、増加重量(2019年10月の生重量(g)) - 2018年10月の生重量(g)を算出して、増加重量を基にR version 3.4.3 (R Core Team, 2017) を用いて一元配置分散分析を行い、処理区間の有意差を検討した。さらに個々の処理区間の有意差を検討するため、チューキー・クレーマーの検定を実施した。

表-1. 各処理区に使用した苗の個体数

苗種	コントロール	冬期高温処理		
		1ヶ月	2ヶ月	3ヶ月
実生	35	15	15	15
挿し木	3品種×5	3品種×5	3品種×5	3品種×5

表-2. 各処理区の処理期間

苗種	処理区	冬期高温処理	自然環境
実生	1ヶ月処理	2018 11/5~12/5	2018 12/6~2019 10/9
	2ヶ月処理	2018 11/5~2019 1/4	2019 1/5~10/9
	3ヶ月処理	2018 11/5~2019 2/4	2019 2/5~10/9
	コントロール	×	2018 11/2~2019 10/9
挿し木	1ヶ月処理	2018 11/13~12/13	2018 12/14~2019 10/17
	2ヶ月処理	2018 11/13~2019 1/11	2019 1/12~10/17
	3ヶ月処理	2018 11/13~2019 2/13	2019 2/14~10/17
	コントロール	×	2018 11/13~2019 10/17

※冬期高温処理…20℃一定・自然光・相対湿度70±5%の条件下にて生育
自然環境…九州大学伊都キャンパス圃場にて生育

III. 結果と考察

3-1. 沖縄スギ林を利用した冬期の高温による影響評価

本研究で対象とした沖縄県名護市に植栽されたスギ林は、植栽クローン・植栽時期・植栽本数等の林分の基本情報が不明であった。そこで、DNAマーカーを利用したクローン識別を行った結果、オビスギ系の九州産スギ精英樹の品種とDNA型が完全に一

致したクローンが複数認められた。従って本林分には過去に九州地域の挿し木品種が導入されたと考えられる。植栽時期については、取得した成長錐コアの年輪が約40年程度であったことから、およそ1980年頃に植栽されたと考えられる。本試験地では、植栽個体は約2m間隔で列状に植栽されていた。しかし、沢沿いを除いて多くの個体が既に失われており、植栽当時の本数は不明である。本研究で林分調査の対象としたスギ71個体を含め、現在この林分には約100個体程度が遺存するのみであった。本研究では、尾根沿いなどに認められた明らかに成長不良な個体については調査対象から除外した。調査した71個体の平均樹高は14.0mであり、平均胸高直径は20.2cmであった(表-3)。オビスギ系の挿し木品種が利用されていたことから、宮崎県長伐期施業技術指針(宮崎県環境森林部, 2008)の林分収穫表を参考にした結果、40年生のスギで一般に樹高は16.8~24.3m、胸高直径は22.6~29.2cmと示されていることから、この林分の成長は、地位指数が最も低い箇所の成長と比較して、やや不良であると考えられる。

採取した成長錐コアに基づき算出した7個体の晩材率は30.4~41.2であり、平均は約32.2%であった(表-4)。既往研究では、スギの晩材率は一般に6.9%から29.3%とされ、平均が15.8%であると報告されている(鈴木, 1991)。渋谷・藤崎(1987)は、光学顕微鏡を用いた晩材率の算出により、九州産スギ品種の晩材率が約6.0%~9.6%であることを報告している。彼らの晩材率の算出法は、レーザー顕微鏡を使用した本研究の晩材率の算出法と類似しており、比較データとして非常に有効であると考えられる。さらに仲宗根(1970)は、沖縄県に植栽されたスギの晩材率が福岡産のスギよりも有意に高いことを報告している。上述の3つの既往研究と本研究の結果を加味すれば、沖縄県に植栽されたスギの晩材率は、自然分布域内で生育したスギの晩材率よりも高い傾向にあると考えられる。

山本ほか(2004)は、温暖化によるスギの成長への影響を評価するため、外気よりも最大3℃高いグロースチャンバー(加温区)を使用してスギを生育した。その結果、加温区では無加温区よりも成長期が長くなり、樹高成長も大きくなることを報告した。山本ほか(2004)はこの結果について、夏期の気温上昇がスギの伸長成長量を増加させると考察している。しかし山本ほか(2004)の報告とは対象的に、本研究で調査した沖縄のスギの成長は上述の林分収穫表と比較してむしろ小さくなる傾向を示した。沖縄県名護市の成長期の温度は、九州地方と比較して約3℃程度高く(気象庁, 2018)、山本ほか(2004)の試験で使用した加温区と外部温度との温度差とほぼ同等であることを考慮すると、沖縄のスギで示した表現型の応答には、休眠期の温度が影響している可能性も現時点で無視することは困難である。しかし林分の成長には、水分条件や植栽間隔、下層植生の影響など様々な要因が複雑に関係していることから、沖縄スギの成長に影響した要因の断定には更なる詳細な調査が必要である。さらに山本ほか(2004)は、加温によって細胞長が増大する傾向を示すことから、材の強度が低下する可能性を指摘した。細胞長の増大と晩材形成では温度ストレスに対する反応や形成プロセスが異なると考えられる。沖縄のスギの晩材率は高くなる傾向を示しており、本研究の結果を加味すれば、山本ほか(2004)が指摘する材強度の低下

が生じるかどうかについては単純に論じることは困難であり、より総合的な視点から検討する必要があると考えられる。

表-3. 沖縄スギ林の林分調査データ

	個体数	平均	標準偏差	最大値	最小値
胸高直径 (cm)	71	20.18	5.05	36.8	9.0
樹高 (m)	71	14.01	2.60	22.2	7.3
形状比 (m/cm)	71	71.58	11.71	100	48.6

表-4. 沖縄県に植栽されたスギ7個体の晩材率

	測定年輪数	平均晩材率(%)	標準偏差	最大値(%)	最小値(%)
1	10	31.60	8.74	43.49	19.16
2	10	34.36	8.02	44.40	17.84
3	10	30.35	5.96	38.17	22.78
4	10	41.15	15.91	67.84	15.74
5	10	30.36	9.92	51.81	20.29
6	10	28.20	8.70	40.43	17.61
7	10	29.06	10.54	50.91	16.01

3-2. ファイトトロンを利用した冬期高温処理試験

約1ヶ月おきに測定した主軸部の伸長成長を基に算出した1ヶ月ごとの各処理区の伸長成長率を図-1から図-4に示した。実生苗では、全ての処理区が月ごとの成長率に大きな変動を示した(図-1)。各処理区はそれぞれ異なる成長パターンを示し、特に3ヶ月処理区は一般には冬期である2月に高い成長率を示した。3ヶ月処理区の複数の個体は2月の測定日の時点で脱黄化や新芽形成が確認されており、3ヶ月処理区の実生苗の多くは、冬期高温処理中の2月に休眠期から成長期に移行したと考えられる。2月は1年間の中で最も寒冷な時期であり、一般に植物の休眠期にあたる時期である。Singh *et al.* (2016)は、植物の休眠打破は冬から春にかけての高温が誘導することを示唆している。本研究では、冬期高温処理を20℃一定のファイトトロンを利用して行っており、20℃一定環境下での長期間の生育が休眠打破を誘導したと考えられることから、スギでも休眠打破には温度が大きな要因であることを示している。

挿し木苗では、全ての品種で冬期高温処理区がコントロールより高い成長率を示した(図-2~図-4)。この結果は、冬期の高温が挿し木苗の成長期の主軸部の伸長成長を促進する可能性を示唆している。また1ヶ月処理区と2ヶ月処理区では、4月から5月の間に成長期に達し、成長期初期(6月頃)に高い成長率を示したのに対し、3ヶ月処理区は5月から6月の間に成長期に達し、成長期後期(7月頃)に高い成長率を示した。この結果は、冬期の高温の期間の長さや時期は、成長期の成長パターンに大きく影響することを示唆している。

また県大分5号は全ての冬期高温処理区が高い成長率を長期間維持するパターンを示したのに対し(図-2)、水俣署5号・飢肥署5号は高い成長率が長期間維持されない成長パターンを示すなど品種間での相違も認められた(図-3・図-4)。この冬期高温処理区の成長パターンは、各品種のコントロールの成長パターンと類似していることから、この結果は各品種が持つ品種特性が影

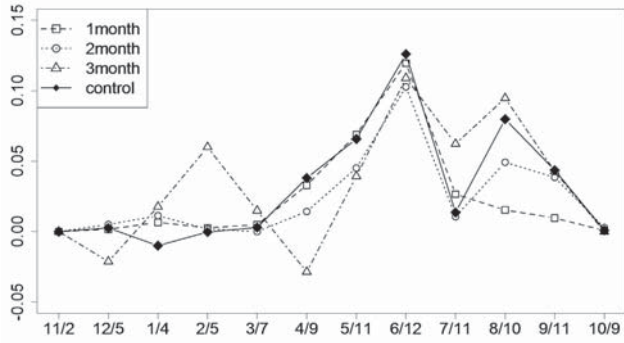


図-1. 実生苗の月別伸長成長率

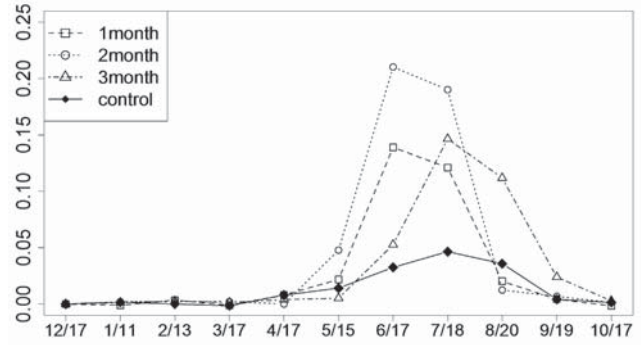


図-2. 挿し木苗（県大分5号）の月別伸長成長率

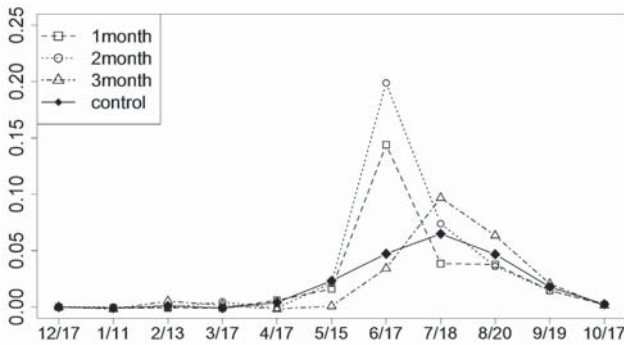


図-3. 挿し木苗（水俣署5号）の月別伸長成長率

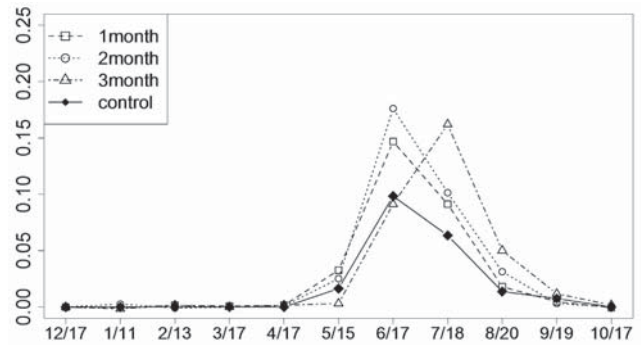


図-4. 挿し木苗（飢肥署5号）の月別伸長成長率

響していると考えられる。またコントロールと比較した際の各処理区の成長率の高さにも品種間の相違が確認された。このことから冬期の高温環境下に曝された際に、高い成長率を示す品種や影響が少ない品種など、冬期の高温に対する品種間の応答性に違いが存在することが示唆された。

本研究では、全ての挿し木品種の冬期高温処理区がコントロールより高い成長を示したのに対し、実生苗では1ヶ月処理区や2ヶ月処理区の成長がコントロールより低い結果が得られており、応答性に関して実生苗と挿し木苗で異なる結果が得られた。本研究では、実生苗が播種後2年生、挿し木苗では挿し木2年生苗を利用しており、同じ2年生とはいえ、個体サイズがやや異なることや実生と挿し木では個体内での生理反応に相違があることが推定されるものの、本研究から十分な説明を行うことは困難である。しかし、実生苗・挿し木苗共に冬期高温処理区とコント

ロールの成長パターンの違いが確認されたことから、冬期の高温がスギの成長フェノロジーに影響を及ぼす可能性が示唆された。

図-5に測定した実生苗の生重量の増加重量を示した。全ての冬期高温処理区の増加重量が有意にコントロールを上回る結果となった。この結果について、チューキー・クレーマー検定を行ったところ、1ヶ月処理区とコントロール間 ($P < 0.1$)、3ヶ月処理区とコントロール間 ($P < 0.01$) で特に有意差が認められた。しかし同じ実生苗を使用した主軸部の伸長成長の評価では、コントロールが1ヶ月処理区や2ヶ月処理区を上回っており(図-3)、評価対象により異なる結果が得られた。これには、地上部の肥大成長・枝の伸長成長・地下部の根量等の評価対象外とした要因が関係していると考えられる。

IV. おわりに

本研究の結果により、冬期に高温に曝されたスギの挿し木苗の成長期の成長量が増大することや、冬期が温暖な環境で生育した沖縄のスギの晩材率が高い傾向にあることが示唆された。しかし、現在の沖縄地方と九州地方では、温暖化シナリオで想定される温度以上の差があり、また既往研究の人工処理による結果とも併せて考えれば、冬期の高温がどの程度の影響をスギの成長に及ぼしているか、不明な点が多いことが浮き彫りになった。また成長量の増大や晩材率の増加は、温暖化によるスギの収量や品質の向上に繋がる可能性がある一方で、挿し木品種には品種間差が認められ、温暖化に伴う悪影響については十分な理解が出来ていないことから、今後も継続して影響評価を行う必要がある。

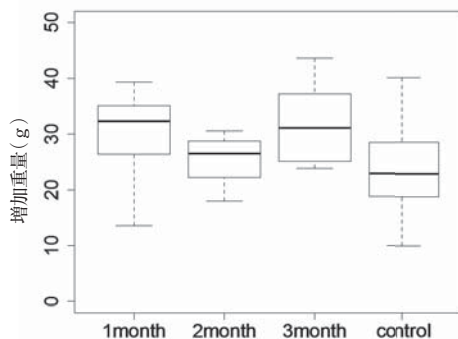


図-5. 実生苗の増加重量

V. 謝辞

本研究は、農林水産省技術会議委託プロジェクト「森林・林業、水産業分野における気候変動適応技術の開発」により行った。沖縄県森林資源研究センターの皆様には調査等で便宜を頂いた。ここに謝意を表す。

引用文献

- Andersen UB *et al.* (2017) *Environmental and Experimental Botany* 140 : 96 - 109
- Begum *et al.* (2010) *Annals of Botany* 106 : 885 - 895
- 気象庁 (2017) 地球温暖化予測情報 第9巻 : 7 - 10
- 気象庁 (2018) 気象庁ホームページ, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html> 参照:2018-12-1~2019-2-28, 2018-3-21~2018-9-23 (2019年11月5日利用)
- Miyamoto N (2015) *J For Res.* 20 : 186 - 196
- 宮崎県環境森林部 (2008) 宮崎県長伐期施業技術指針 : 57
- Moriguchi Y *et al.* (2003) *Theor Appl Genet.* 106 : 751 - 758
- Mork E (1928) *Papier-Fabrikant* 26 : 741 - 747
- 仲宗根平男 (1970) 琉球大学農学部学術報告 17 : 192 - 202
- 渋谷昌資・藤崎謙次郎 (1987) 愛媛大学農学部演習林報告 25 : 149 - 158
- Singh RK *et al.* (2016) *New Phytologist* 213 : 511 - 524
- 鈴木滋彦 (1991) 木材の科学と利用技術Ⅱ : 68 - 74
- Tani N *et al.* (2004) *Ann. For. Sci.* 61 : 569 - 575
- 山本将功ほか (2004) 環境工学研究論文集 41 (2019年11月8日受付; 2019年12月8日受理)