

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K06132

研究課題名（和文）スギの水分生理特性における幼老相関の解明

研究課題名（英文）Clarifying relationship between juvenile and mature sugi clones in water relations parameters

研究代表者

河合 慶恵（Kawai, Yoshie）

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・主任研究員 等

研究者番号：20370851

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：苗木の乾燥実験によって得たスギの水分生理・形態特性と産地試験林での成長・生存との関連性を解析した結果、冬季の浸透調節機能に優れる、すなわち冬季乾燥耐性が高いほど成長・生存に優れることが示された。

三箇所の壮齢な産地試験林において冬季の浸透調節機能を測定し、苗木と成木との幼老相関を検証したところ、兵庫県の林分では浸透調節機能関連パラメータについて相関を認めたと、愛媛県と和歌山県では認められなかった。炭素安定同位体比については、測定した兵庫県と愛媛県の両林分で幼老相関を認めた。以上の結果からスギの水分生理特性は幼老相関を示し、適応に影響することから優良個体の選抜指標として有効であると考えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は成長と生存の間で、林分間での系統順位変動の大きさやその経時的パターンが異なることを示しており、この結果は造林時のスギ系統選択の上で重要な示唆を与える。また本研究に先立ち筆者らは、スギさし木幼苗を用いて成長や生存の内的要因である生理特性には系統間に違いがある事を示してきた。本研究はこれまでの成果を進展させ、水分生理特性における異なる成育段階間の共通性（幼老相関）の存在を示すとともに、幼苗で評価した系統の水分生理特性と壮齢林における成長・生存との関連を明らかにした。これらの成果は、今後の林木育種で優良個体の早期選抜ツールとして水分生理特性を活用する上での基盤情報となる知見である。

研究成果の概要（英文）：The results of an analysis of the relationship between sugi water relation characteristics and morphological characteristics obtained from sapling drying experiments and growth and survival in test stands showed that superior winter osmoregulatory function, i.e., higher winter drought tolerance, is associated with better growth and survival in matured stands. We measured winter osmoregulatory function in three mature test stands in the three production areas and verified the relationship between juvenile and mature clones. The carbon stable isotope ratios showed a positive correlation in both Hyogo and Ehime forests where measurements were made. Based on these results, we hypothesized that the water relation characteristics of sugi show juvenile-mature relationship and are effective as an indicator for selecting superior individuals because of their influence on adaptation in matured stands.

研究分野：森林遺伝育種

キーワード：スギ 幼老相関 水分生理特性 精英樹 系統間変異

1. 研究開始当初の背景

水分生理特性における樹木の種内変異は、気候変動に対応するための基盤情報として重要視され、国外では古くから研究が進んでいる。近年は育種への応用を目的とした遺伝性の解明を目指す研究も増加している。もし水分生理特性が、異なる成長段階間(幼苗と壮齢木など)で共通して維持され、成長や生存に影響するならば、今後の優良個体選抜において優れた水分生理特性を有し、成長・生存に優れた個体を幼苗段階で選抜可能となる。しかしながら、国外での研究において水分生理特性と成長との関連性が示唆される一方、この特性が苗から成木へどの程度引き継がれるか(幼老相関)について検証した知見はほとんど見られない。

我が国は広範な気候環境に生育する主要造林樹種を多数有しているが、その適応性に影響する水分生理特性の遺伝的変異に関する研究は少なかった。筆者らは我が国で初めてスギの水分生理特性の遺伝的変異を評価してきた。本研究ではこれまでの成果を発展させ、水分生理特性における幼老相関を明らかにし、この特性を今後の林木育種で開発される優良個体の早期選抜指標として活用するための基盤情報を得る。

2. 研究の目的

優れた遺伝的性質を有する林木の植栽は林業収益や環境保全に直結するため、これまで膨大な労力と長い時間をかけて植栽試験による評価に基づいた優良個体選抜が行われてきた。

筆者らは水分要求性の高いスギに着目し、幼苗を用いた乾燥ストレス実験を温室内の制御灌水下で行い、系統の水分生理特性に遺伝的差異があることを明らかにしてきた(図1)。幼苗段階に限らず、もし水分生理特性に成長段階間の共通性(幼老相関)があり、この特性の優劣が成長・生存に影響するならば、水分生理特性を指標とした優良個体の早期選抜が可能となるが、幼老相関についての知見は非常に少ない。

そこで本研究は共通したスギ精英樹 15 系統を異なる立地環境下に植栽した壮齢産地試験林を複数用いて、冬季の浸透調節機能(葉が萎れないようにする能力)と炭素安定同位体比(水利用効率の指標)の系統間変異および、成長・生存との関連性を検証する。この結果に上述した幼苗による評価を加え(産地試験林と同一のスギ精英樹 15 系統を供試)スギ水分生理特性における幼老相関の解明を目標とする。

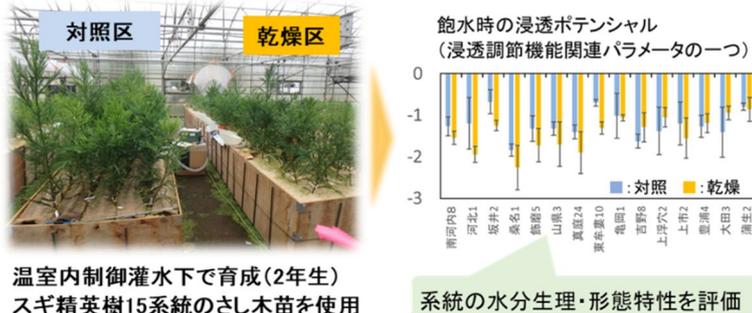


図1. スギ幼苗を用いた乾燥ストレス実験

3. 研究の方法

(1) 成長・生存における系統と試験林の交互作用

本研究では材料として関西・中四国地方で選抜されたスギ精英樹 15 系統を用いた。これら 15 系統のクローン(さし木)苗は 1972~77 年にかけて、北陸、近畿、中国、四国地域に設定された 43 箇所の産地試験林(図2)に共通植栽され定期的に調査されてきた。これら 15 系統のさし木幼苗を用いた乾燥ストレス実験により(前項2に記載)幼苗段階の水分生理特性について乾燥条件下(乾燥区)および湿潤条件下(対照区)で評価されている。

成長・生存における系統と試験林の交互作用(系統順位の試験林間変動を示す)を統合的に解析するため、産地試験林で記録されてきた生存数を再精査したデータセットを整備し、十分なデータ数を得た 37 箇所の産地試験林を対象に系統と試験林の交互作用を解明した。

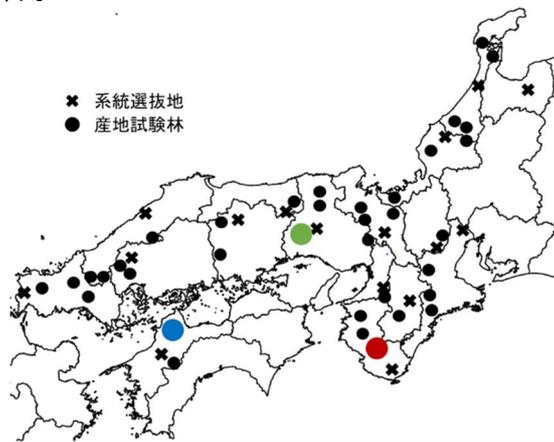


図2. データを供試した産地試験林と系統選抜地水分生理特性を測定した兵庫県(), 愛媛県(), 和歌山県()の試験林を含む

(2) 水分生理特性と選抜地気候との関連性

本研究で用いたスギ精英樹 15 系統は選抜地の気候が大きく異なることから、水分生理特性と選抜地気候との関連性を検証した。メッシュ気候値 2000 を用いて各系統選抜地の位置（緯度・経度）の該当する三次メッシュにおける気候値（年平均気温、年積算降雨量、年最大積雪深、年平均全日射量）を取得し、各気候値と前項 2 で得た水分生理特性（浸透調節機能関連パラメータ、炭素安定同位体比）との相関関係を明らかにした。

(3) スギ壮齢試験林における水分生理特性の幼老相関

前述したスギ精英樹 15 系統が共通植栽された産地試験林より兵庫県（46 年生）、愛媛県（48 年生）および和歌山県（48 年生）の 3 箇所を選抜し（図 1）幼老相関を検証するため水分生理特性を測定した。各試験林において各系統 1 から 4 ラメートより厳冬期にシュートを採取した。高さ 15m 以上の陽樹冠面より採取したシュートを密封のうえ研究室に持ち帰り、プレッシャーチャンバーを用いた P-V 曲線法に基づき浸透調節機能の関連パラメータを求めた。得られた壮齢段階のパラメータ値と幼苗段階の値との幼老相関を検証した。また、兵庫県と愛媛県の林分から採取したシュートの当年伸長部位を用いて炭素安定同位体比を測定し、幼老相関を検証した。

(4) 水分生理・形態特性が成長・生存に与える影響

幼苗段階の水分生理・形態特性と造林地植栽後の適応力との関連性解明のため、産地試験林における成長・生存に対する苗木の水分生理・形態特性の影響を解析した。解析に当たっては、上述のスギ 15 系統が共通植栽された複数の試験林における成長・生存の系統偏差値を従属変数、水分生理特性（浸透調節機能関連パラメータの一つである飽水時浸透ポテンシャル、炭素安定同位体比、光合成速度）と形態的特性（成長フェノロジー、乾燥重量の地上部と地下部の比率（T/R 比））を説明変数とする GLM を適用し、補正赤池情報量規準（AICc）に基づき最適モデルに採用された説明変数を検討した。なお解析に先立ち、説明変数間に多重共線性が無いことを確認した。

4. 研究成果

(1) 成長・生存における系統と試験林の交互作用

産地試験林における樹高、胸高直径および生存率データを用いて系統と試験林の交互作用を解析した。その結果、成長形質では交互作用は全体的に小さく、クローン間の順位関係は試験林によらずおおむね共通していたが、交互作用は林齢とともに大きくなった（図 3）。一方で、生存率には年次によらず GE 交互作用が成長形質よりも大きく、試験林間でのクローン順位は共通性は低かった。これらの結果より、造林地に植栽するクローンの選定にあたっては、生存率における GE 交互作用のリスクに加え、壮齢時の成長形質の地域適応性についても考慮する必要があると考えられた。

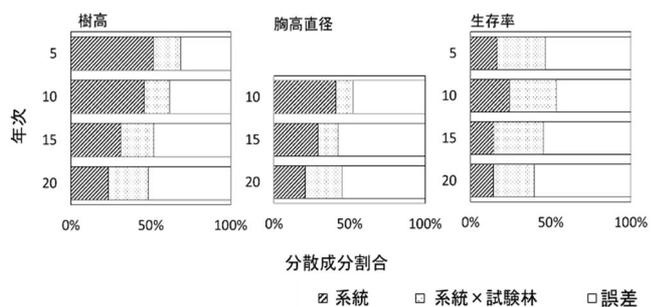


図 3. 樹高、胸高直径および生存における各調査年次での分散成分割合

(2) 水分生理特性と選抜地気候との関連性

スギ精英樹幼苗の乾燥ストレス実験によって得た（前項 2）冬季の乾燥耐性に関連する浸透調節機能および炭素安定同位体比と選抜地気候との関連性を検証した。対照区において、浸透調節機能に関する 2 つのパラメータは系統選抜地の年積算降雨量との相関を示したが（全て $p < 0.05$ ）、乾燥区では年降雨量との相関は見られなかった（図 4）。また乾燥区の炭素安定同位体比は系統選抜地の年降雨量が少ないほど大きく（ $r = -0.69, p < 0.01$ ）、乾燥下の水利用効率は年降雨量が少ない選抜地の系統ほど優れることが考えられた。つまり、スギの水分生理特性には選抜地の気候が大きく影響を与えているものの、その応答は乾燥区と対照区で大きく変化する事を示した。すなわち年降雨量の少ない場所で選抜された系

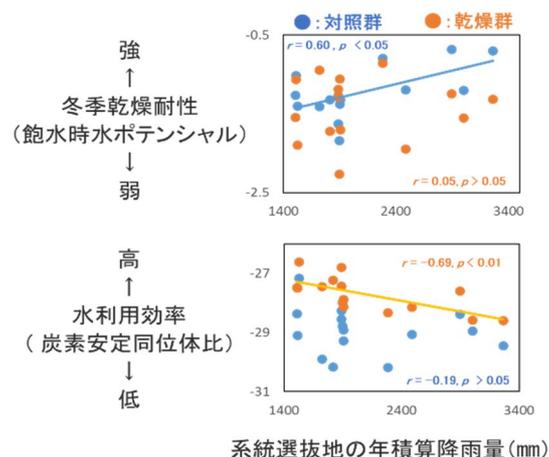


図 4. 系統選抜地の気候と水分生理特性の相関

統ほど湿潤条件下で浸透調節機能に優れ、乾燥条件下では気孔を閉じ気味にし水を使わない戦略を取る可能性が示唆された。

(3) スギ壮齢試験林における水分生理特性の幼老相関

三箇所の壮齢な産地試験林において浸透調節機能関連パラメータを測定し、苗木と成木との幼老相関を検証した。兵庫県産地試験林では乾燥区幼苗で評価した膨圧消失時点の水ポテンシャルについて有意な相関が認められたものの($r=0.57$, $p<0.05$)、愛媛県および和歌山県において幼老相関は認められなかった。同様に、兵庫県では乾燥区の飽水時浸透ポテンシャルについて弱い幼老相関が認められたものの($r=0.47$, $p<0.1$)、他の試験林では認められなかった。乾燥実験を行った温室内では寒風や霜が遮断され、野外よりも低い乾燥ストレスが相関を弱くしたと考えた。

その一方で炭素安定同位体比については、兵庫県の試験林では乾燥区で評価した苗木と幼老相関が示唆され($r=0.51$, $p<0.1$)、愛媛県では乾燥区($r=0.74$, $p<0.01$)と対照区($r=0.56$, $p<0.05$)の両区で幼老相関が認められた(図5)。以上の結果からスギにおいて水分生理特性は生育段階によらず共通することが明らかになるとともに、共通性は乾燥ストレス下で育成した苗木との間でより強いことが示された。

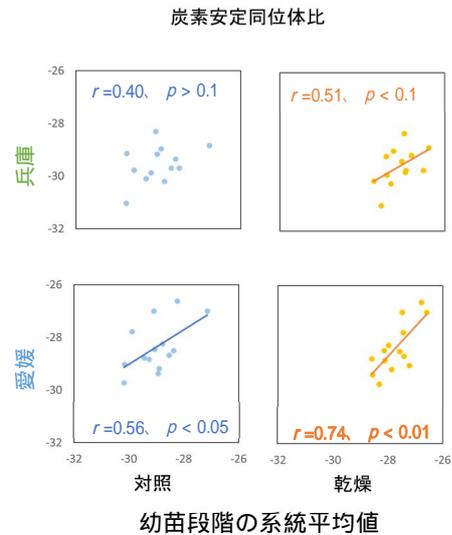


図5. スギ老齢産地試験林における炭素安定同位体比の幼老相関

(4) 水分生理・形態特性が成長・生存に与える影響

スギの水分生理・形態特性と適応との関連性を解明するため、苗木の乾燥ストレス実験によって得られた水分生理・形態特性と産地試験林での成長・生存との関連性を解析した(表1)。水分生理特性をみると、浸透調節機能関連パラメータである飽水時浸透ポテンシャルが低い、すなわち冬季の乾燥耐性が高いほど成長・生存に優れることが示された。スギは冬季でも光合成を続けることから、冬の厳しい乾燥に耐え光合成を維持することが成長・生存に貢献すると考えられる。いっぽう炭素安定同位体比が低いほど(水利用率が低いほど)成長に優れ、同位体比が高いほど生存に優れた。光合成速度が大きいほど成長に優れたことから、気孔を開いて活発に光合成する性質は成長を促進することを示唆すると考えられた。形態的特性をみると、秋伸び型の成長パターンを持つほどよく成長し、初夏伸び型ほど生存に優れた。またT/R比が小さいほど生存に優れており、地下部の相対的割合が高く、成長休止期が早いほど生存に有利であると考えられた。

表1. 幼苗の系統特性と試験林植栽後の成長・生存との関連性

対照区	10年次生存		20年次生存		10年次樹高		20年次樹高	
	係数	ΔAICc	係数	ΔAICc	係数	ΔAICc	係数	ΔAICc
説明変数								
飽水時水ポテンシャル					***	80.8	***	44.4
炭素安定同位体比	+	3.5	**	5.6	***	44.0	***	13.2
成長フェノロジー	**	5.2	***	13.5	-	3.9	-	2.9
光合成速度					***	13.5		
T/R	***	14.1	***	19.4	-	1.1		
AICc_最適モデル	2441		1425		2429		2078	

乾燥区	10年次生存		20年次生存		10年次樹高		20年次樹高	
	係数	ΔAICc	係数	ΔAICc	係数	ΔAICc	係数	ΔAICc
説明変数								
飽水時水ポテンシャル	***	50.6	***	48.8	-	3.4		
炭素安定同位体比			+	2.5				
成長フェノロジー								
光合成速度	-	0.1	**	6.0	***	48.6	***	32.8
T/R	-	2.2	**	5.0	+	0.3	***	17.8
AICc_最適モデル	2404		1402		2508		2086	
AICc_切片モデル	2460		1456		2572		2125	

AICc: 最適モデルから説明変数を除去した場合の AICc 差分
 AICc_切片モデル: 全説明変数を除去したモデルで算出された AICc

対照区、乾燥区の幼苗で評価した系統特性との関連性を示す
 最適モデルに採用された説明変数のみ係数の正負と有意性を示す
 ; $p<0.05$, **; $p<0.01$, ***; $p<0.001$

以上の結果から、スギにおける水分生理特性は生育段階によらず共通する事が示された。さらに幼苗段階で評価した系統の水分生理・形態特性は、造林地植栽後の成長・生存との関連を示した。これら特性のなかでも特に、浸透調節機能関連パラメータである飽水時浸透ポテンシャルは造林地植栽後の成長・生存両面の向上に貢献する唯一の特性であり、優良個体の早期選抜指標としての期待は大きいと考える。しかし冬季の乾燥耐性の指標となる浸透調節機能関連パラメータにおける幼老相関は弱く、これらのパラメータについては幼苗を用いた評価方法の改良が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 河合 慶恵, 岩泉 正和, 三浦 真弘, 久保田 正裕	4. 巻 106
2. 論文標題 関西育種基本区の地域差検定林におけるスギ精英樹の成長と生存率から評価したクローンと検定林の交互作用	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本森林学会誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 河合 慶恵, 岩泉 正和, 笹島 芳信, 三浦 真弘, 高島 有哉, 久保田 正裕, 五十嵐 秀一, 市栄 智明, 池田 武文
2. 発表標題 スギの幼苗段階における水分生理特性および形態的特性と成長・生存との関連性を経時的に評価する試み
3. 学会等名 森林遺伝育種学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河合 慶恵, 岩泉 正和, 久保田 正裕, 笹島 芳信, 大谷 美穂, 斉藤 雅一, 五十嵐 秀一, 市栄 智明, 池田 武文
2. 発表標題 三箇所のスギ壮齢検定林における冬季水分生理特性の幼老相関
3. 学会等名 日本森林学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河合 慶恵, 三浦 真弘, 山田 浩雄, 岩泉 正和, 久保田 正裕
2. 発表標題 関西育種基本区におけるスギ精英樹の生存率に基づく検定林区分の試み
3. 学会等名 森林遺伝育種学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河合 慶恵, 岩泉 正和, 久保田 正裕, 笹島 芳信, 五十嵐 秀一, 市栄 智明, 池田 武文
2. 発表標題 スギ精英樹さし木苗の水分生理特性と選抜地気候との関連性
3. 学会等名 応用森林学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河合 慶恵, 岩泉 正和, 久保田 正裕, 大城 浩司, 林 勝洋, 三浦 真弘, 笹島 芳信, 上谷 浩, 五十嵐 秀一, 市栄 智明, 池田 武文
2. 発表標題 スギ精英樹の冬季における水分生理特性の幼老相関
3. 学会等名 日本森林学会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	池田 武文 (Ikeda Takefumi) (50183158)	京都府立大学・生命環境科学研究科・特任教授 (24302)	
研究分担者	市栄 智明 (Ichie Tomoaki) (80403872)	高知大学・教育研究部自然科学系農学部門・教授 (16401)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	岩泉 正和 (Iwaizumi Masakazu) (50391701)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------