

論文

林地斜面におけるスギ第二世代精英樹候補木の 初期成長と葉におけるクロロフィル濃度^{*1}

石川達也^{*2}・作田耕太郎^{*3}・永吉健作^{*4}・渡辺敦史^{*3}・倉本哲嗣^{*5}

石川達也・作田耕太郎・永吉健作・渡辺敦史・倉本哲嗣：林地斜面におけるスギ第二世代精英樹候補木の初期成長と葉におけるクロロフィル濃度 九州森林研究 70：21－25，2017 初期成長に優れた苗木の開発は、人工林における保育費用の削減に対して有効な手段であり、林業収益性の向上への貢献が期待される。林業低コスト化の実現に向けてスギ精英樹第二世代候補木の特性評価が行われつつある中、本研究では、スギ精英樹第一世代とスギ精英樹第二世代候補木（F1）の3年生林分での植栽木の初期成長とクロロフィル濃度との関係評価を行った。初期成長については、地際径と材積の成長速度には差が認められなかったが、樹高の成長速度はF1が斜面上部で大きかった。また、生育地点に関係なく、F1の葉中クロロフィル濃度は第一世代よりも高く、クロロフィル濃度が高いほど最大光合成速度も高くなる傾向があった。光合成能が高かったF1において地際径と材積の成長速度に第一世代との差が認められなかったことについては、F1では光合成産物を樹高成長や葉などへ多く分配していることが考えられた。

キーワード：スギ精英樹，光合成能，下刈り，樹高成長

I. はじめに

我が国では林業の採算性低下などによる森林所有者の経営意欲の減退が生じており、九州においては人工林伐採跡地の約4分の1が再造林放棄地となっている（村上ほか，2011）。木材価格の急速な上昇はあまり期待できないことから、林業の再生のために低コスト化が求められている。植栽から50年生までの造林および保育にかかる経費のうち、約7割という高い割合が植栽から10年間の育林初期段階によって占められている（林野庁，2014）。さらに初期育林コストの大半は下刈りとなっているため、下刈り費用の削減を目的として、下刈り回数の削減、無下刈り、大苗あるいはコンテナ苗生産等の試験・研究が行われつつある（中村ほか，2013）。下刈りの省略・簡素化は作業コストを削減できるだけでなく、各地で深刻化しているシカ被害への対策となりうることも示唆されている（渡邊ほか，2013）。獣害ネットの設置・維持には多額の費用が必要なため、それが不要となれば大幅なコスト削減につながる。以上のようなことから、初期成長の優れた苗木の開発は、下刈りの省略や期間の短縮を通じて低コスト林業に資すると考えられる。

我が国では、戦後からスギ（*Cryptomeria japonica*）の精英樹選抜育種事業が行われてきた（星ほか，2013）。選抜された精英樹（第一世代）の中で、特に成長の良い系統同士の交配によって作出されたものを、精英樹第二世代候補木と称する（星ほか，2013）。精英樹第二世代候補木は、精英樹第一世代と比較して同等の材質を有し、約2倍の材積成長が期待され、圃場や林地での生育試験がなされている段階にある（星ほか，2013）。また、ス

ギは系統ごとに異なる成長特性を持ち、その特性の発現は立地条件によって左右される（西村ほか，1982；中島ほか，1994）。そのため、精英樹第二世代候補木の初期成長については、圃場（星ほか，2013）と同様に林地においても検証する必要がある。

樹木においては、光合成や呼吸のような生理的な機能は成長を評価するうえで重要な因子である（種生物学会，2003）。たとえば、25年生時の成長量に差の認められるスギ精英樹クローン間では、成長量と幼木時（5年生）の葉の光合成速度の間に密接な関係があるとの報告もある（家入・玉泉，1997）。よって、苗木の光合成能など樹体の生理的機能を測定し、評価を行うことは樹木品種の成長特性を把握する上で大きな意義がある。これまでに圃場において確認されてきた、精英樹第一世代と精英樹第二世代候補木間での成長速度の差は、生理的機能の何らかの違いが反映されたものであると考えられる。

本研究においては、同一林分に植栽された、スギ精英樹第二世代候補木について、①精英樹第一世代との成長様式の差異、②相対成長速度と光合成能との関係について明らかにすることを目的とし、その結果よりスギ精英樹第二世代候補木の低コスト育林への有効性について検討した。

II. 調査地と方法

1. 調査地

調査地は、鹿児島県森林総合技術センターの新世代系統苗低密度植栽試験地（鹿児島県始良市蒲生町，北緯31°45′，東経130°31′）である。調査地は南北に長く、斜面は北東～東向きであり、

*1 Ishikawa, T., Sakuta, K., Nagayoshi, K., Watanabe, A. and Kuramoto, N.: The primary growth and chlorophyll concentration in current shoots of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) selected as the candidate for second generation plus tree seedlings.

*2 九州大学大学院生物資源環境科学府 Grad. Sch. Biores. and Bioenvir. Sci., Kyushu Univ., Fukuoka, 812-8581, Japan.

*3 九州大学大学院農学研究院 Fac. of Agric., Kyushu Univ., Fukuoka, 812-8581, Japan.

*4 鹿児島県森林技術総合センター Kagoshima Pref. Forestry Technology Ctr., Kamo, Kagoshima 899-5302, Japan.

*5 森林総合研究所林木育種センター九州育種場 Kyushu Regional Breeding Office, For. Tree Breed. Center, For. & Forest Prod. Res. Inst., Koshi, Kumamoto 861-1102, Japan.

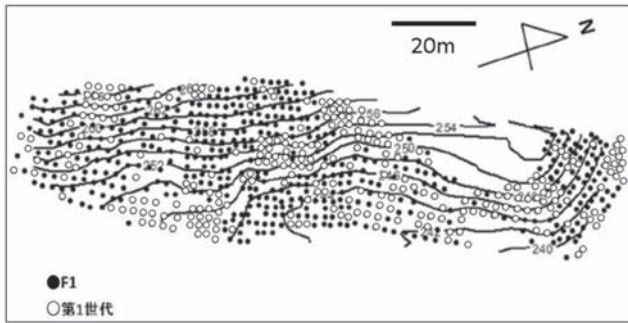


図-1. 調査地におけるスギ苗木の位置

南に向かうにつれて標高は少しずつ高くなっている。調査地の最下部には比較的平坦な部分があるが、ほとんどは30度ほどの斜面である。調査地最上部から最下部までの高低差は約25mで、上部では広葉樹林帯と隣接している。調査地にはカヤやイタドリなどの雑草や雑木が繁茂していたため、2013年2月から2015年7月のまでの間、下刈りが毎年6月に実施された。また、シカ等による苗木の食害を防ぐため、高さ2m程度の防獣ネットで囲まれている。

2013年2月中旬に、調査地全体に精英樹二世代候補木（以下、F1）30系統および第一世代精英樹（以下、第一世代）3系統（県始良4号、県鹿尾島1号、県指宿1号）の挿し木苗が混交的に植栽された。図-1に調査地における植栽木の位置を、表-1に調査地の概要を示した。

表-1. 調査地概要

植栽密度 (本/ha)	面積 (ha)	植栽本数	
		第一世代	F1
1866	0.42	278	506

2. 調査方法

2.1. 地際径と樹高の測定

2013年の5月、9月、12月と2014年の6月、9月、および2015年の1月に樹高と地際径が測定され、2015年6月と7月には樹高のみが測定された。また、2013年9月には、植栽苗の位置について測量が行われた。材積を(1)式で求めた上で、地際径、樹高、および材積の相対成長速度を(2)式で求めた。

$$\text{材積} = D^2 H \quad (1)$$

$$\text{RGR} = \{ \ln(A1) - \ln(A0) \} / t \quad (2)$$

ここで、D：地際径、H：樹高、RGR：期間内の相対成長速度、A0：期間始めの材積、樹高または地際径、A1：期間終わりの材積、樹高または地際径、そして、t：期間の日数である。なお、相対樹高成長速度は2013年5月と2015年7月、相対地際径成長速度は2013年5月と2015年1月、および材積については2013年5月と2015年1月について算出した。

各測定時での樹高、地際径および形状比の推移については、F1全体と第一世代全体のそれぞれで平均値を算出し、Welchのt検定を用いて差の検定を行った。また、樹高と地際径の相対成長速度についてはヒストグラムを作成し、F1と第一世代各苗木の相対成長速度の頻度分布について尖度分析と歪度分析を行った。

2.2. クロロフィル濃度評価個体の選定

第一世代の3系統と、F1系統内で相対成長速度の異なる5系統を選定し、各系統より6本ずつ、計48本の苗木を評価個体とした（以下、評価個体）。評価個体の選定にあたっては、2015年7月の測定において、樹高が高かったものと低かったものを、それぞれ3本ずつとし、葉中総クロロフィル濃度を測定した。なお、F1の3系統、第一世代の3系統の相対成長速度の高かった3個体ずつに関しては野外条件での葉の最大光合成速度についても測定した。また、F1の30系統の相対成長速度の序列において、評価個体として選定した系統は、9、14、18、24、27位であり序列内での大きな偏りはなかった。相対成長速度と葉中総クロロフィル濃度については、F1と第一世代のそれぞれの系統内で樹高が高かった3本と低かった3本それぞれで平均値を算出し、Tukey-Kramerの多重比較検定によって差の検定を行った。

2.3. 葉中総クロロフィル濃度の定量

2015年の12月に、光がよく当たっている当年葉をそれぞれ3サンプルずつ採取し、DMSO法（Tait & Hik, 2003）で抽出した後、分光光度計（Genesys 10S UV-Vis, Thermo Scientific, USA）を使用して、葉の生重量あたりの総クロロフィル濃度を定量した。総クロロフィル濃度の定量における、より具体的な手順は以下のとおりである。

まず、調査地で採取後、冷蔵状態で持ち帰ったスギの生葉を工作用のハサミで1mm程度の細片とした。この細片20mgをバイアル瓶に入れ、さらに5mlのDimethyl Sulfoxide（DMSO）をマイクロピペットで加えてパラフィルムでシールした。この操作の後、バイアル瓶を暗所（25℃）で振とうし、葉の組織が透明になった後、抽出液2mlを分光セルに採取して645nmと669nmでの吸光度（A665およびA649）を測定した。ここで、クロロフィル量は次式により求め、クロロフィルa、bの合計値を葉中総クロロフィル量（以下、クロロフィル量）とした（Wellbur, 1994）。

$$\text{クロロフィル a} = 12.19 \times A665 - 3.45 \times A649$$

$$\text{クロロフィル b} = 21.99 \times A649 - 5.32 \times A665$$

2.4. 葉の最大光合成速度の測定

2015年10月に携帯型光合成蒸散測定装置（LI-6400, LI-COR, USA）を用いて野外条件での葉の最大光合成速度を測定した。測定にあたっては、クロロフィル量を定量した個体のうち、成長の良かった3個体ずつのよく光の当たっている当年生シュートを用いた。各個体5回ずつの繰り返しとして、最大光合成速度はこれらの平均値として表した。なお測定した当年枝はすべて採取し、ドライオープンで75℃、48時間乾燥させて絶乾重量の測定を行い、光合成速度は単位葉乾重あたりの値として算出した。F1と第一世代の最大光合成速度の平均値については差の検定（Welchのt検定）を行った。

Ⅲ. 結果

1. スギ苗木の成長経過

F1と第一世代の平均樹高と地際径および形状比の推移を図-2に示した。樹高、地際径とも全ての測定時において第一世代の方が大きかった（ $P < 0.05$ ）。地際径はF1と第一世代で同程度

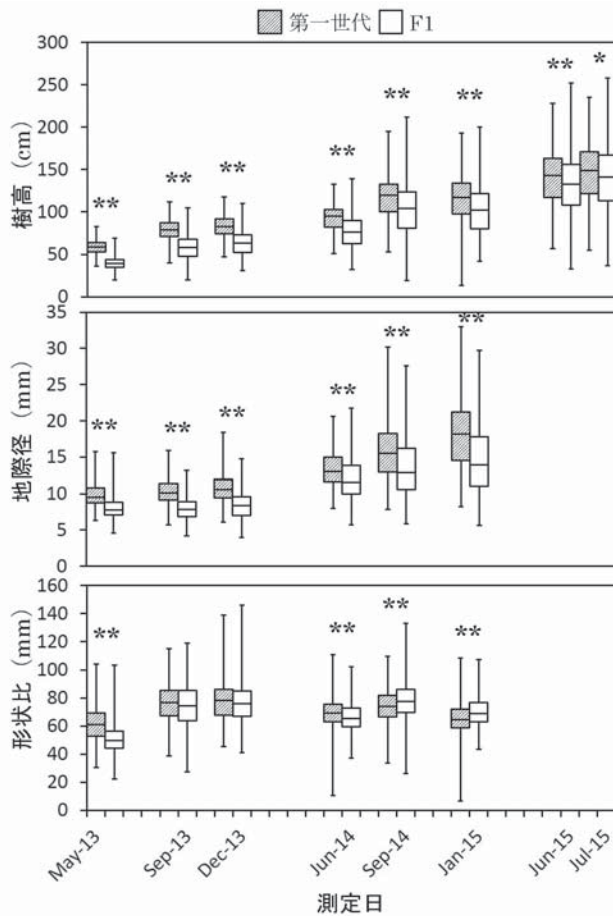


図-2. F1と第一世代の全苗木の樹高と地際径および形状比の推移

箱ひげ図は、箱中央の横線が中央値、箱の下端が第一四分位、箱の上端が第三四分位、ひげの両端が最大値および最小値を示す。図中のアスタリスクは、F1と第一世代間で統計的に有意な差が認められたことを示す (* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$)

の差のままであったのに対し、樹高の差は徐々に縮まり、増加量はF1の方が第一世代よりも大きかった。形状比については、F1、第一世代とも植栽直後から上昇し、植栽1年目の12月以降は70前後で推移して、2015年1月ではF1が 70 ± 11 、第一世代が 66 ± 11 とF1の方が高く ($P < 0.01$)、肥大成長よりも樹

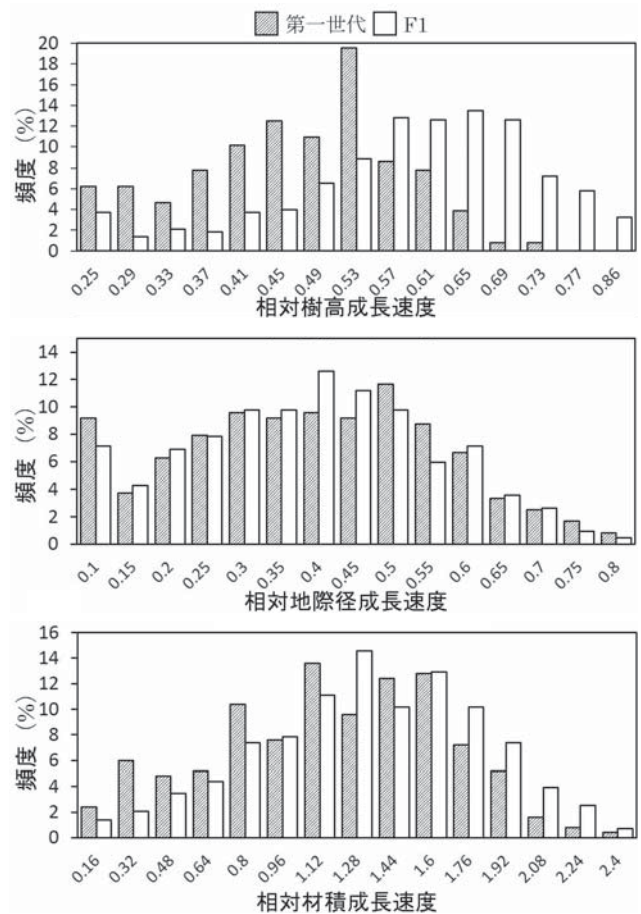


図-3. F1と第一世代の相対樹高成長速度および相対地際径成長速度の頻度分布

高成長が優先された成長特性を示した。F1と第一世代それぞれの、全苗木の樹高および地際径の相対成長速度の頻度分布を図-3に示した。F1と第一世代それぞれの相対樹高成長速度の歪度は、 -1.13 と -0.47 となり、F1の方がより大きな値に偏った分布だった。F1と第一世代の相対樹高成長速度の最大値はそれぞれ 0.85 、 0.71 とF1の方が大きく、また相対樹高成長速度 0.55 から 0.8 以上では全てF1の方が第一世代より高い頻度だった。一方で、F1と第一世代それぞれの相対地際径成長速度の歪度は、 -0.54 と -0.55 、そして歪度は 0.01 と -0.05 で

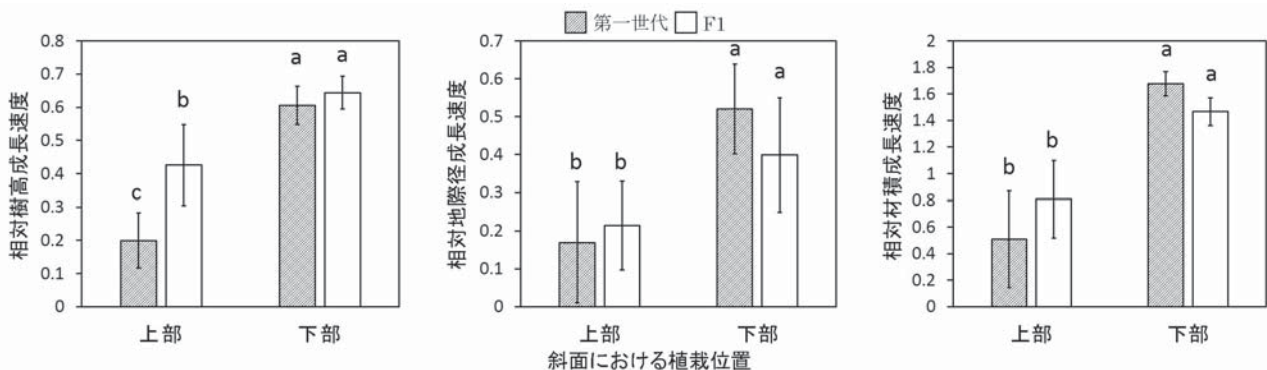


図-4. 評価個体における樹高と地際径および材積の相対成長速度

図中の縦線は標準偏差を、異なるアルファベットは平均値に統計的に有意な差が認められたことをそれぞれ示す ($P < 0.05$)。

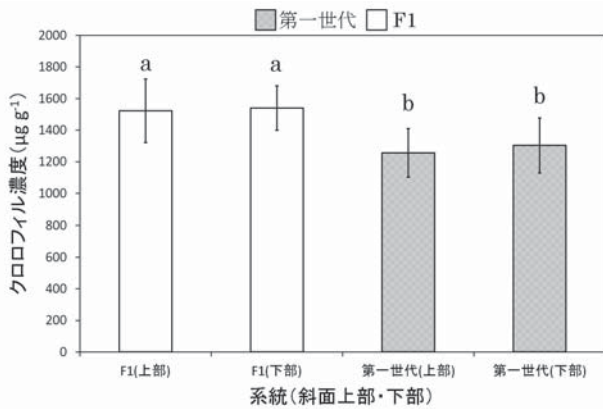


図-5. 斜面上部と下部におけるクロロフィル濃度

図中の縦線は標準偏差を、異なるアルファベットは平均値に統計的有意差が認められたことをそれぞれ示す。(P<0.05)

あり、いずれも大きな差はなかった。F1と第一世代それぞれの相対材積成長速度の歪度は-0.18と-0.19と分布に差は小さかったが、0.57以上の大きな値での頻度はF1の方が高かった。

評価個体のうち樹体サイズの小さかった個体は斜面上部に、大きかった個体は斜面下部に集中していた。そこで、斜面上下それぞれで樹高と地際径および材積の相対成長速度を比較した(図-4)。斜面下部での相対樹高成長速度についてはF1と第一世代間で差は認められなかったが、上部では統計的に有意な差が認められた(P<0.01)。また、相対地際径成長速度と相対材積成長速度については、F1と第一世代間での差は認められなかった。

2. スギ苗木の成長とクロロフィル濃度および光合成の関係

図-5に斜面上部と下部におけるクロロフィル濃度を示した。F1、第一世代それぞれ1530 µg g⁻¹と1281 µg g⁻¹でF1が有意に高かった(P<0.01)が、斜面上下部で差がなかった。図-6にクロロフィル濃度と最大光合成速度の関係を、さらに図-7に最大光合成速度と相対成長速度の関係を示した。クロロフィル濃度と最大光合成速度には2次曲線で近似される関係があり、クロロフィル濃度が高くなると最大光合成速度も高くなったが、統計的に有意ではなかった(P=0.14)。

最大光合成速度に対して、相対樹高成長速度は徐々に高くなり、一定以上の最大光合成速度では頭打ちとなる、べき乗式で近似されるような関係性があったが、統計的有意性は認められなかった(P=0.08)。相対地際径成長速度は全体的にばらついていて、

図-8にクロロフィル濃度に対する相対樹高成長速度を示した。斜面上下部のクロロフィル濃度差はF1、第一世代のいずれにおいても小さかったが、相対樹高成長速度の差は第一世代で大きかった。

IV. 考察

1. スギ苗木の成長

全ての測定時において樹高と地際径のF1の平均値は第一世代よりも小さかった(図-2)。これは、F1植栽苗が植栽時に第一世代よりも小さかったためである。しかしながら樹高に関しては、F1と第一世代の差は植栽後徐々に縮まっており、更に植栽3年

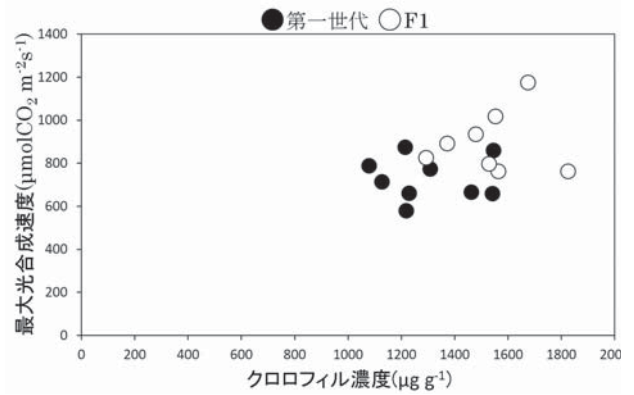


図-6. クロロフィル濃度と最大光合成速度の関係

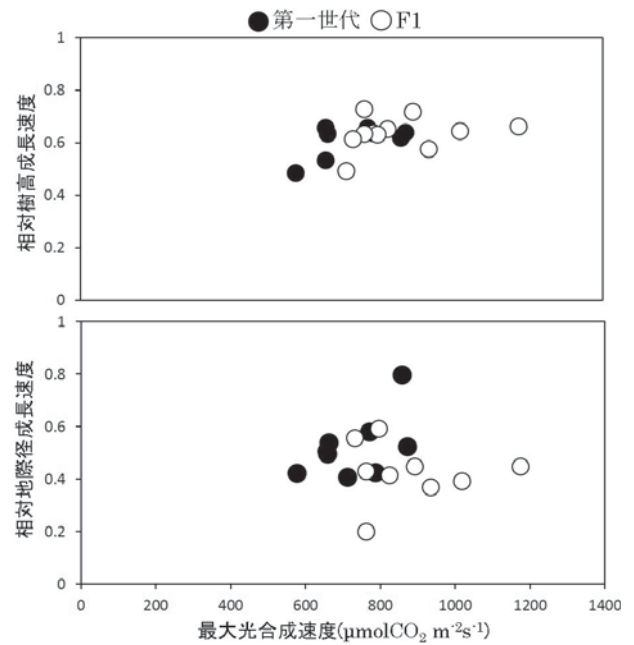


図-7. 最大光合成速度と相対成長速度の関係

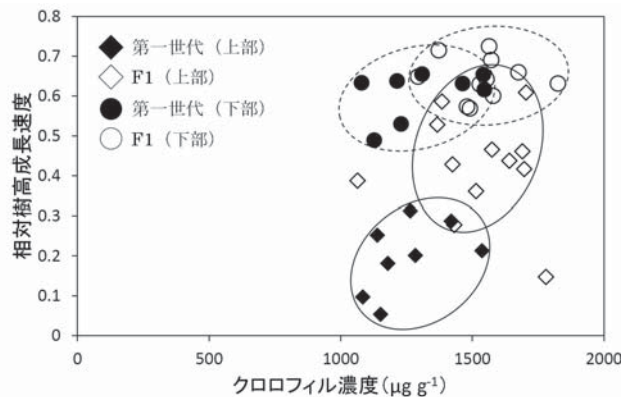


図-8. クロロフィル濃度と相対樹高成長速度の関係

目までの相対樹高成長速度のヒストグラムからも成長速度の高かった個体の頻度も高く、F1の初期成長の良好さが示された(図-3)。F1の初期成長が良好であることは、星ほか(2013)によって圃場では報告されており、下刈り終了時の一般的な平均樹高を3mと仮定した場合、F1の成績上位のものは在来品種に

比べて2回下刈りを削減できると試算されている。本研究の全苗木での結果からは、樹高成長のみがF1では第一世代よりも良好だった。林業の低コスト化においては、雑草木との競争状態を早期に脱することが植栽苗に求められる。そのため、植栽3年目までで肥大成長よりも樹高成長が優先されていたF1の、下刈り軽減に対する有効性が示唆される。

生理的特性の測定に供した評価個体に関しては、樹体サイズの小さかった個体は斜面上部に、樹体サイズの大きかった個体は斜面下部に集中して分布していた。このことから、斜面下部は斜面上部よりも苗木の成長に適した環境であったと考えられる。斜面上部の位置によって造林木の成長に差が発生することは古くから知られている。佐藤・森川(1976)は、スギの木部圧ポテンシャルの日経過と生育する斜面上部の位置との関係を検討しており、一日の水ストレスは斜面下部でもっとも小さいとしている。このような植栽位置や苗木の水分状態の違いが斜面上部、下部における樹体サイズの差の要因のひとつとして考えられる。

樹高成長に関しては、F1は斜面下部では第一世代と同等で、斜面上部では第一世代よりも良好だった。このようにF1は、生育条件の良い場所よりも悪い場所において第一世代よりも優れた成長を示し、高い立地順応性を有する可能性がある。

2. スギ苗木の樹高成長と光合成能との関係

クロロフィル濃度は斜面上部下部ともにF1が高い値を示し、またF1と第一世代ともに植栽位置による違いはなかった。クロロフィル濃度が高くなると最大光合成速度も高くなる傾向にあったが(図-6)、統計的有意性は認められなかった。菅原・藤原(1968)によると、葉のクロロフィル含量と光合成能の間には必ずしも正の相関が成り立たず、生重量あたり $1500 \mu\text{g g}^{-1}$ 程度のクロロフィルが存在すれば、スギ葉では最大光合成速度を示し得るとしている。同時に、当年葉の中でも秋に出葉した葉は夏に出葉した葉に比べて同等のクロロフィル含量であっても、著しく光合成能が劣るという結果も示している。本研究においても、図-6に示したF1の中で最もクロロフィル濃度の高かった個体($1825 \mu\text{g g}^{-1}$)がF1の中で一番低い最大光合成速度を示しており、クロロフィル含量の高さが必ずしも高い光合成速度につながるとは言えないと考えられる。

F1は、第一世代よりも斜面上部と下部間での樹高成長差が小さかった(図-8)。F1の高いクロロフィル濃度は、生育条件が良好でない斜面上部においてより有利に働き、不適な生育条件での樹高成長の低下が第一世代ほどは起こらなかったものと推測される。光合成能が高かったF1において、直径成長速度と材積成長速度に第一世代との差がなかったことについては、F1と第一世代では光合成産物の分配様式にも相違があり、F1では樹高成長や葉などへの分配の割合が高かった可能性が示唆された。

V. まとめ

本研究では、低コスト育林に資することを目標に開発された、精英樹第二世代候補木(F1)苗木の林地での成長評価および成長とクロロフィル濃度との関係評価を試みた。調査地の全苗木について比較した場合、F1は植栽3年目時点では第一世代よりも優れた樹高成長を示していた。クロロフィル濃度の測定木は、成長の良い個体は斜面下部に、成長の悪い個体は斜面上部に集中していた。斜面下部においては、F1と第一世代との成長の差はなかったが、斜面上部の樹高成長は第一世代より良好だった。生育場所に関係なく、F1のクロロフィル濃度は第一世代よりも高かった。クロロフィル濃度の高さがF1の光合成能の高さに繋がり、樹高成長の良さとして表れたものと考えられた。このように、F1は樹高成長において立地の影響を第一世代よりも受けにくい可能性が示唆され、この特性は雑草木との競合に有利であることから、下刈り軽減を通して低コスト林業に資すると考えられる。

VI. 謝辞

本研究を行うにあたり、調査地および成長量データを提供いただきました鹿児島県森林総合技術センター、ならびに森林総合研究所林木育種センターの方々に深く感謝の意を表します。

引用文献

- 星 比呂志ほか(2013) 森林遺伝育種 2: 132-135.
 家入龍二・玉泉幸一郎(1997) 日林九支研論 50: 95-96.
 村上拓彦ほか(2011) 日林誌 93: 280-287.
 中村松三ほか(2013) 低コスト再造林の実用化に向けた研究成果集. URL: <https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/documents/3rd-chukiseika7.pdf> (2016年11月11日利用).
 中島嘉彦ほか(1994) 岡山県林業試験場報告 11: 1-19.
 西村慶二ほか(1982) 日林九支研論 35: 49-50.
 林野庁(2014) 森林・林業白書平成26年版, 全国林業改良普及協会, 東京, 104.
 佐藤 明・森川 靖(1976) 日林誌 58: 321-327.
 菅原和夫・藤原彰夫(1968) 日林誌 50: 359-364.
 種生物学会(2003) 光と水と植物のかたち植物生理生態学入門, 文一総合出版, 東京, 15-16.
 Tait MA and Hik DS (2003) Photosynthesis Research 78: 87-91.
 渡邊仁志ほか(2013) 日本緑化工学会誌 39: 264-267.
 Wellbur AR (1994) J. Plant Physiol 144: 307-313.
 (2016年11月18日受付; 2017年1月20日受理)