

循環型林業における人工光苗木育成技術の研究

下山 真人 溝田 陽子
 高橋 真一 赤松 伯英
 (技術本部)

Seedlings Cultivation Technology Using Artificial Light on Circular Forestry

Masato Shimoyama Yoko Mizota
 Shinichi Takahashi Norihide Akamatsu

Abstract

The demand for domestic timber has recovered in Japan owing to the shift from the use of external timber to domestic timber and the promotion of wooden buildings. Moreover, there is a shortage of seedlings to be planted after logging, which makes it difficult to use the forest permanently. In this study, we conducted research on the high-efficiency cultivation of seedlings using artificial light environment control, with the aim of developing a technology for the stable supply of seedlings, which is an issue for the recycling of forests. We determined the carbon emissions in the process of growing seedlings and the offsetting effect of the carbon fixation of trees after planting. This is a technology that significantly contributes to CO₂ absorption. As carbon zero is required worldwide, we will develop it for implementation.

概 要

我が国の林業については、外材から国産材利用への転換、木造建築への利用推進により、国産材需要が回復してきた。一方、伐採後に植林する苗木が不足しており森林の永続的な利用が困難になっている。そこで、森林を循環利用するための課題の一つである、苗木を安定的供給する技術を開発することを目的として、人工光環境制御による苗木の高効率育成についての研究を行った。併せて、苗木育成過程において炭素排出が認められるものの、植林後の樹木の炭素固定により相殺効果があることを明らかにした。本技術はCO₂吸収に大きく貢献する技術である。カーボンゼロが世界的に求められている中で、実施に向けて展開していく。

1. はじめに

CO₂削減は、人類共通の課題である。2021年、日本政府は温室効果ガスを2030年度までに2013年度比46%減らす新目標を発表した。このような動向からCO₂を積極的に固定する森林資源や木造建築は注目されている。森林資源は、循環利用が可能な材料である。森林づくりによりCO₂を吸収し、木材として利用した後は、燃料としてのエネルギー利用も可能である。木造建築は建築から解体までのCO₂排出量が、RC造より低く温暖化抑制に効果があると指摘されている¹⁾。

大林組は、2019年に「Obayashi Sustainability Vision 2050」を策定し、「脱炭素」、「価値ある空間・サービスの提供」、「サステナブル・サプライチェーンの共創」を目指し活動している。その一環として、木質大型建築および循環型森林サービスの構築に取り組んでいる。具体的には、従来からの木造建築に加えて、国産木材に関する素材生産～製材～利用～植林というサプライチェーンのサイクル全体を持続可能で最適なものにするため、中長期に亘る循環型林業による森林資源の持続的活用を図るというものである²⁾。

そのような背景から、本報告では森林の循環利用に向けた課題の一つである植林用苗木を安定的に供給する技

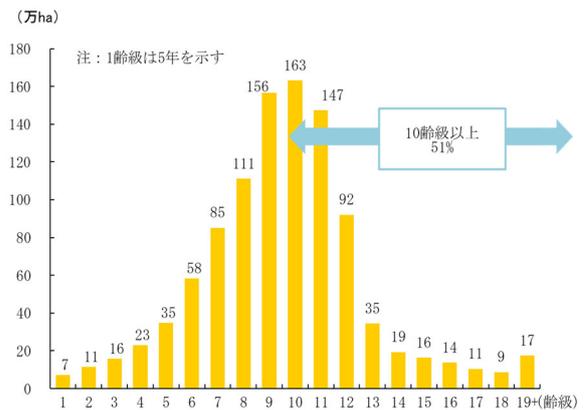


Fig. 1 齢級ごとの森林面積⁴⁾
 Forest Area by Age

術を開発することを目的として、大林組が保有する人工光型植物工場における高機能性野菜栽培技術³⁾の知見を適用した、人工光環境制御によるカラマツ苗木の高効率育成技術について述べる。なお、本技術のように播種から育苗までを人工光環境制御のもとに行う取り組みは、現時点では大林組だけである。

2. 木材需給の現状

2.1 木材需給の現状

現在、日本の森林には林齢構成の偏りや苗木の不足といった課題が発生している。なお、本報告は永続的な林業を実現するための一技術を検討するものであり、以下「森林」は「人工林」を指す。

太平洋戦争の折、大量に木材が伐採され国土が荒廃したため、戦後にスギ、ヒノキ、カラマツによる大規模造林が進められた。しかし、高度成長期の旺盛な木材需要に応えるため外材輸入が解禁された結果、木造建築においても供給量が多い外材の利用が主流となった。そのため国産材の需要が低迷し、森林は生育不良の木を間引く除伐、適正な林分密度に調整する間伐といった手入れのみで維持される状態が長く続き、戦後大量に植林された森林が伐期を迎えても利用されずに放置された。その結果、現状では森林の林齢構成が大きく偏っている。Fig. 1に齢級ごとの森林面積を示す⁴⁾。1齢級は林齢5年である。戦後植林した9～11齢級すなわち林齢45～55年生の森林が多く、1～4齢級すなわち林齢5～20年生の若齢の森林が少ない。対策として、国は伐期を迎えた林齢45～55年生の森林の伐採と搬出、木造建築等への国産材利用促進、再植林を積極的に進める政策を取っている。

また近年、合板等の原料である南洋材やロシアカラマツなどの外材の輸入量が輸出国の森林資源保護から減少しており、合板原料の国産材への転換が進んでいる。同様に建築用材についても、環境問題、森林資源保護の見地からカナダや米国などからの原木輸入が制限されるようになり、国産材への転換が進んでいる。

このような背景のもと、我が国の国産材自給率は2004年の18%を底に上昇し、2019年時点で36%まで回復した。さらに2020年に入って、米国では自国の木材需要の増加に加え、コロナ禍が伐採や製材加工業などの労働力不足に拍車をかけ伐採量が低下し、日本への輸出量がますます減少している。その結果、我が国では国産材への代替が加速し、国産材価格の上昇が続いている。コロナ禍の影響は長期化すると考えられ、国産材シフトは今後も続くと推測される。以上のような木材の需給構造の変化は、国内林業回復の機会と捉えることができる。

一方、現在、我が国においては、伐採後に植林する苗木が不足している。苗木不足の原因は、上述したように戦後に大量植林した木が伐採されず、伐採跡地に植林する苗木のニーズがここ40年間少なくなっていたため、林業用の苗木生産者の多くが果樹、造園木の生産に転換したり、廃業したことによる。Fig. 2に苗木生産者数と苗木面積の推移⁵⁾を示す。

伐採後に伐採量に応じて植林することで林業を永続的に続けることができる。とりわけ斜面崩壊抑制のために、伐採後はすぐに植林する必要がある。苗木が安定供給されなければ、永続的な林業は成り立たないため、苗木不足は深刻な問題であるといえる。そのため、林野庁は苗

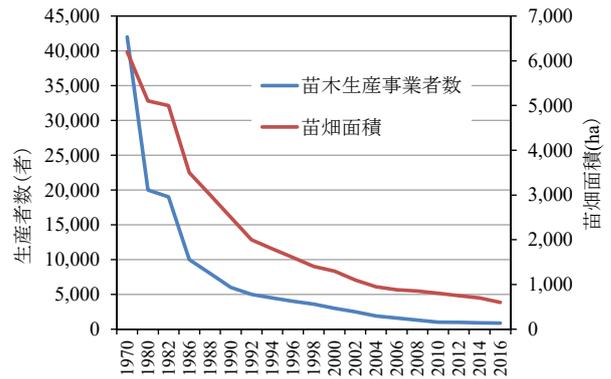


Fig. 2 苗木生産数の推移⁵⁾

Changes in the Number of Seedlings Produced

木生産の効率化と増産を目的に、コンテナ苗による苗木生産の技術開発と普及を推進している。また、専門家により温室併設型の大規模施設でのコンテナ苗大量生産が行われている。コンテナ苗については、3.2で後述する。

2.2 カラマツ苗の不足の現状

苗木不足は、特にカラマツにおいて深刻である。カラマツは合板用の原木となるだけでなく、強度が大きいため構造用集成材、建築用材、さらに土木用杭丸太まで幅広く利用でき⁶⁾、需要が拡大している。筆者がカラマツの苗木不足の現況を調査した結果、以下のことが判明した。

- ①現在、外材の代替としてカラマツの需要が増加し、主な原産地の長野県では伐採搬出が盛んになっている。
- ②木材価格は上昇傾向にあり、スギ、ヒノキと同等程度までに上昇している。
- ③露地におけるカラマツ苗木生産は天候に左右される上、発芽率が低く不安定である。近年普及しているコンテナ苗で温室を利用した場合の発芽率は30%、圃場への直接播種では、天候などの影響を受けて10%まで低下する場合もある。
- ④カラマツ種子の安定確保が難しくなっている。カラマツ種子は豊作、凶作のばらつきが大きいこと、近年の異常気象による種子の結実不良、採種園の手入れ不足などの複合要因により種子の不足が深刻化している。このように、苗木不足を解消するためには、苗木生産の効率化、安定化が急務であることが明らかになった。

3. 人工光環境制御による苗木育成技術の検討

3.1 実験の目的

人工光環境制御による苗木育成には以下のような特長がある。

- ①露地では歩留りが低下しやすい幼苗期を安定的に育成できる。
- ②栽培環境を制御して生育調整することにより需要に応じた出荷の調整が可能である。
- ③季節を問わず育成できるため、露地栽培の出荷時期以

外でも伐採後の植林に苗木を供給できる。

このような特長を活かした高効率生産，生育調整により苗木の安定供給が可能になると考えられる。本研究では，苗木不足を解消すべく，人工光環境制御による苗木の効率的な育成および生育調整を目的として，伸長成長を促進する遠赤領域が多い白色LED³⁾を用いたカラマツ苗木の栽培条件を検討した。

3.2 実験装置と供試植物

実験は，大林組技術研究所内の人工光型栽培室内で実施した。人工光型栽培室は，温度・湿度を一定に保持できる恒温・恒湿室である。Table 1に人工光型栽培室の仕様を，Photo 1に外観を示す。人工光型栽培室の内部は2つに区切られ，一方に光源のない発芽用の棚（以下，発芽棚）を設け，もう一方には栽培用の棚（以下，栽培棚）を設けた。栽培棚の上部に光源として白色LEDを取り付け，その下に苗木を並べて栽培した。

Fig. 3に白色LEDの分光分布を示す。上述のように遠赤領域を多く含むものを使用した。

供試植物には，長野県産のカラマツ (*Larix kaempferi*) を使用した。種子を12時間水道水に浸漬して水比重選別し，沈んだ種子のみ冷蔵庫（約5℃）で3週間静置して低温湿層処理を行った後，セルトレイに充填した種まき培土に播種した。播種後は，発芽棚に温度22℃，湿度80%RH，暗所の条件下で静置した

発芽後の栽培には，栽培用コンテナを用いた。栽培用コンテナで育成した苗は「コンテナ苗」と呼ばれ，根鉢（根と根の周りの土）付きの状態で出荷されるため，従来の裸苗（畑から掘り上げて土を落とした苗）より活着率が高く近年普及が進んでいる。本研究では，発芽した個体を順次種まき培土を詰めた栽培用コンテナに移植し，栽培棚に移した。栽培棚では1棚当たり20～22本ずつ，播種後5ヵ月目まで栽培した。Photo2に栽培状況を示す。栽培条件は温度22℃，湿度50～70%RH，明期18時間／暗期6時間のサイクルとした。灌水は，液肥（EC 1.4 dSm⁻¹）を適時散水した。

3.3 環境制御条件下における発芽率

3.3.1 方法 3.2 で述べたように種子に前処理を施して播種し，暗所に静置した。播種数は110個であった。

Photo 3 に播種後の状況を示す。発芽が停止した播種後38日目まで1～2日毎に発芽数を調査し発芽率を算出した。

3.3.2 結果および考察 発芽は播種後10日目から開始した。Fig. 4に播種後日数と積算発芽率の関係を示す。発芽率は一般に播種後28日目までの値で評価するが，本研究では70%であった。露地のコンテナ苗栽培の発芽率は通常30%程度であることから⁷⁾，露地産に対して発芽率は2倍強向上した。これより，水比重選別，低温湿層処理といった前処理および温度，湿度環境制御が発芽率の向上に効果があることを確認した。

3.4 白色LEDの光強度と生育の関係

3.4.1 生育評価の方法 白色LEDの光強度と生育の関係を検討した。光強度は光量子束密度（PPFD）で110，170，220μmol・m⁻²・s⁻¹の3段階とし，サンプル数はn=15～18で，播種後5ヵ月目までの樹高と根元径を測定した。

3.4.2 結果および考察 Fig. 5に光強度と樹高の関係を示す。樹高の結果には，t-検定結果にボンフェローニ補正を行って有意差検定を実施した。その結果を図中にアルファベットで付記した。試験区間に5%水準で有意差がない場合は同じアルファベットで，有意差がある場合は異なるアルファベットで示した。図中のエラーバーは標準偏差を示す。

PPFD 110μmol・m⁻²・s⁻¹と170μmol・m⁻²・s⁻¹には有意差がなく，同様にPPFD 170μmol・m⁻²・s⁻¹と220μmol・m⁻²・s⁻¹にも有意差がなかった。PPFD 110μmol・m⁻²・s⁻¹と220μmol・m⁻²・s⁻¹には有意差があり，光強度を上げると樹高が小さくなる傾向が認められた。

Table 1 人工光型栽培室の仕様
Specifications of the Artificial Light Type House

項目	主な仕様
栽培室	幅 2,700 mm × 奥行 2,200mm × 高さ 3,500mm
構造	高断熱材パネルによる恒温・恒湿仕様
光源	白色LED
空調	温度・湿度調整用空調機，換気扇
温度・湿度制御	温度：10℃～35℃ 湿度：30%RH～85%RH



Photo 1 人工光型栽培室の外観

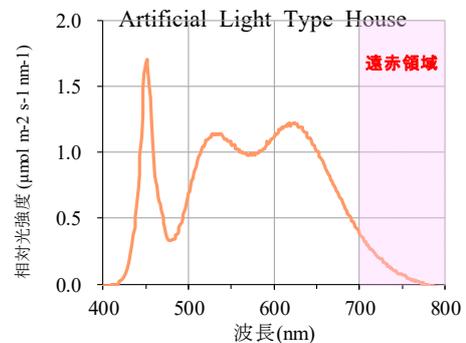


Fig. 3 白色LEDの分光分布³⁾

Spectral Distribution of the White Light LED

Fig. 6 に光強度と根元径の関係を示す。光強度の上昇により根元径が微増したように見えるが、検定の結果から有意差はなかった。Fig. 7 に光強度と形状比の関係を示す。形状比は樹高を根元径で除した値で、樹形のバランスを示す。形状比では光強度の違いにより有意差が生じた。光強度が上昇するほど形状比は小さくなり、PFD $110\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ は 61, $170\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ は 51, $220\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ は 41 であった。コンテナ苗の形状比と植林後の樹高成長の関係として、植林時の形状比が平均 60 程度であれば植林後の樹高成長は裸苗と同等以上であり、形状比が 100 程度では裸苗より劣ると言われている⁸⁾。

これより、人工光環境制御によるカラマツ苗の育成における光強度は、樹高が大きく、植林苗として望ましい形状比が得られるPFD $110\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ が適するといえる。

なお、カラマツには成長量がばらつく特性があり、野菜などの農産物のように同じ大きさのものを同時に出荷することは困難である。苗の生産現場では個別の成長量に応じて出荷時期（1年生、2年生）や出荷形態（コンテナ苗、裸苗）を変えるなどの工夫がなされている。人工光環境制御による苗育成においても、カラマツの特性を踏まえて同様な対応が必要となるが、周年栽培などの特徴を活かすことにより、出荷時期および形態の均一化を図ることができる可能性がある。

人工光育成苗の植林後の生育を調査するために、試験終了後の播種後5ヵ月目の苗を長野県林業総合センター（長野県塩尻市）の圃場および大林組技術研究所（東京都清瀬市）の圃場に植林した。いずれも2021年4月に10本ずつ植林した。Photo 4 に大林組技術研究所圃場に植林直後の状況を示す。今後、定期的に生育調査を実施し露地産コンテナ苗との比較をする予定である。

3.5 環境制御による冬芽形成条件の検討

3.5.1 冬芽形成の観察と評価方法 Photo 5にカラマツの冬芽、頂芽および側芽を示す。カラマツは、自然環境下では秋季に日長が短くなると成長を停止して冬芽を形成し冬季に備える。カラマツの産地である長野県では8月下旬から冬芽が形成される。冬芽がないと翌春に芽吹きしない。特に最も先端の頂芽が芽吹きをしない場合、側方から出る側芽により上向に伸長するため用材には不適ないびつな樹形となる。

人為的な日長制御によっても冬芽は形成される。人工光育成苗を秋季に植林する場合、日長制御によりあらかじめ頂芽に冬芽を形成させておく必要がある。また、冬芽を形成した苗は成長を停止するため生育調整にも利用できる。そこで、インキュベータを使用し、人為的に日長および温度を制御した環境下で効率的な冬芽形成条件を検討した。

供試植物には日長18時間、温度 22°C で育成した播種後5ヵ月目の苗を使用した。カラマツは日長8時間で冬芽が形成されることから⁹⁾、日長は試験開始から16日目までは8時間で、17日目以降は6時間とした（以下、日長処理）。



Photo 2 栽培棚における栽培状況
Cultivation Situation of the Larch



Photo 3 発芽棚内の播種後のセルトレイ
Cell Tray after Sowing in Germination Shelf

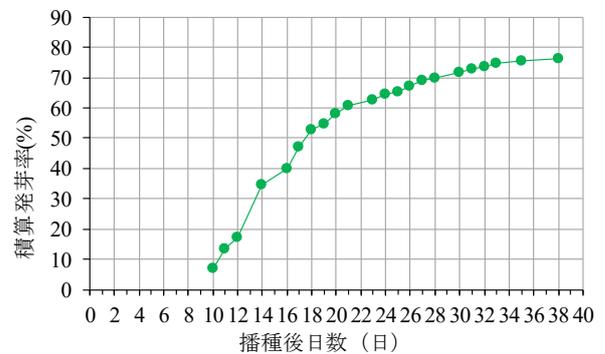


Fig. 4 播種後日数と積算発芽率の関係
Relationship between the Number of Days after Sowing and the Cumulative Germination Rate

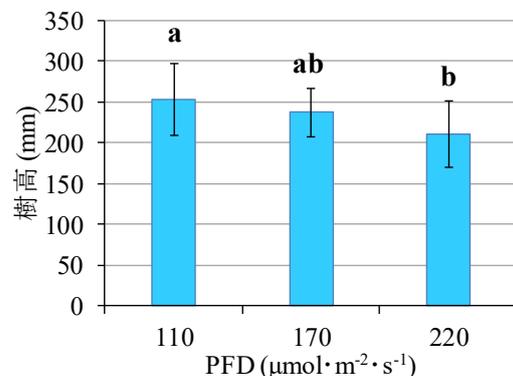


Fig. 5 光強度と樹高の関係
Relationship between Light Intensity and Tree Height

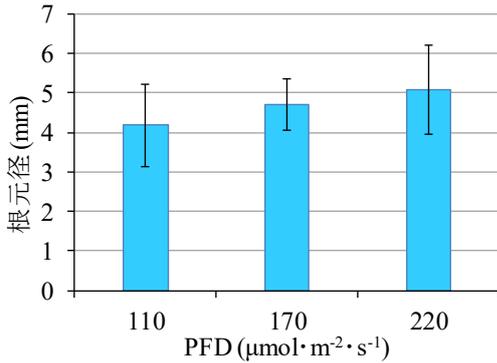


Fig. 6 光強度と根元径の関係

Relationship between Light Intensity and Root Diameter

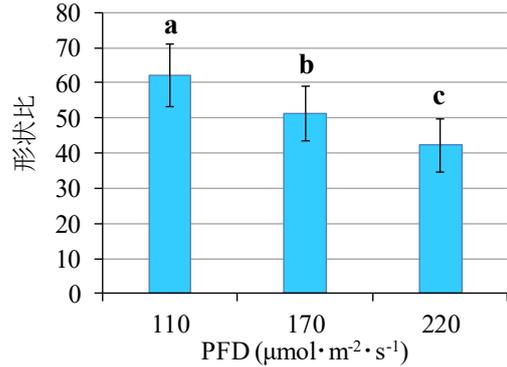


Fig. 7 光強度と形状比の関係

Shape Ratio between Artificial Light-Grown Seedlings



Photo 4 植林後の人工光育成苗
Artificial Light Growing Seedlings After Plantin



Photo 5 カラマツの冬芽, 頂芽, 側芽
Larch Winter Buds, apical Buds, Lateral Buds

温度は22°Cと8°Cの2種類で、サンプル数はn=7で、樹高の変化、頂芽に冬芽が形成されるまでの日数を調査した。

冬芽の形成日は、新葉の発生が停止し成長点に芽鱗(冬芽の外側を覆う鱗状の小片)が認められた日とした。試験期間は44日間であった。

3.5.2 結果および考察 Fig. 8に温度22°C区の樹高の変化と頂芽の冬芽形成時期を示す。樹高は、試験開始から16日目までは伸長したが、それ以降は伸長を停止した。頂芽の冬芽は試験開始後23~28日目に形成された。

Photo 6 に試験開始時の頂芽と試験終了時の冬芽が形成された頂芽を示す。葉色は、試験終了まで緑色を維持した。なお、試験終了後、冬芽形成苗を5°Cの低温下に移して黄葉、落葉させた後、春季に大林組技術研究所の圃場に植林したところ、頂芽の芽吹きが確認された。Photo 7に芽吹きの状態を示す。

8°C区は、樹高は22°C区と同様に試験開始から16日目までは伸長し、それ以降は停止した。頂芽に冬芽は形成されず、23~36日目に下位の葉から黄葉が始まり、その後、落葉した。Fig. 9に8°C区の樹高の変化と黄葉開始時期を、Photo 8に黄葉の状況を示す。Photo 9に8°C区の試験開始時と終了後の頂芽の状況を示す。試験終了時、頂芽は損傷せず緑葉が残存していた。試験終了後に22°C、日長18時間の環境下に移したところ、約1週間で頂芽に新葉の発生が確認され、さらに春季に大林組技術研究所内の圃場に植林後には、新葉のさらなる増加が観察された。

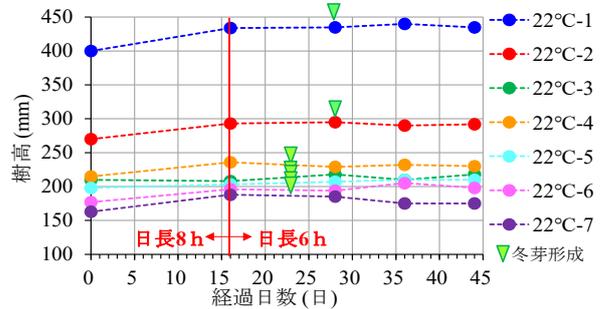
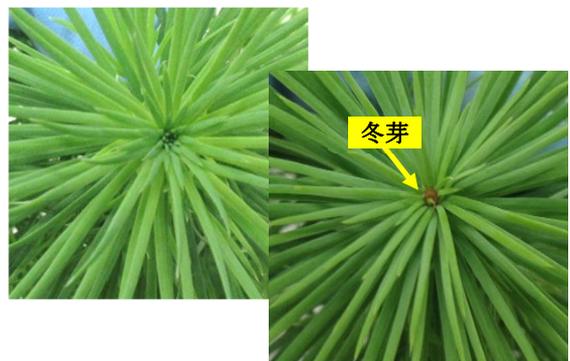


Fig. 8 22°C区の樹高の変化と冬芽形成時期
Changes in Tree Height and Winter Bud Formation
Time in 22°C



(1) 試験開始時 (2) 試験終了時

Photo 6 22°C区における試験開始時と終了時の頂芽
Apical Buds at the Start and End of the Test at 22°C



Photo 7 日長処理により形成した冬芽の植林後の芽吹き

Sprouting after Planting of Winter Buds Formed

Photo 10に試験開始時、終了時、植林後の苗の状況を示す。これより、日長処理による冬芽形成の温度条件は、低温より生育適温が適しているといえる。形成された冬芽は、低温で維持した後の春季植林後に芽吹きが確認されたことより、日長処理による冬芽形成は人工光育成苗の秋季植林の前処理として有効であると考えられる。また、低温で日長処理を行った場合、冬芽は形成されず黄葉、落葉したが、頂芽は成長能力を維持していたことより、苗を約1.5ヵ月間冷蔵保存できる可能性が示唆された。さらに、日長処理では樹高伸長が停止するため、生育調整に利用できるといえる。

4. 人工光育成苗木のCO₂排出量の試算

森林を伐採して木造建築に利用することで、建築物でCO₂固定することができるといえる。さらに伐採した量だけ植林することで、建築用材として適する林齢50年生になるまで森林によるCO₂固定効果が維持できる。1章で述べた通り、日本で最も森林面積が大きい林齢45~55年の森林が伐期を迎えており、伐採後に植林する苗木の安定供給が求められている。

しかし、人工光環境制御による苗木育成では、LED照明の点灯や温度・湿度調節等のため電力を消費し、CO₂排出を伴う。そこで、人工光苗木育成に伴うCO₂排出量を栽培施設の消費電力から試算した。前提条件は以下の通りである。

- ①人工光型栽培室で苗木220本を5ヵ月間育成するのに必要な消費電力量を求めた。
- ②消費電力あたりのCO₂排出量は0.12kg-C/kWhとした¹⁾。
- ③1ha植林するために必要な苗木を育成する場合の炭素排出量に換算した。1haあたりの植林本数は、一般的な植栽密度である3280本/haを用いた

試算結果をTable 2に示す。1haに植林する苗木を人工光で育成する過程で排出される炭素量は8.95t-Cとなった。この炭素排出量をFig. 10に示したカラマツ林1haあたりの林齢ごとの累積炭素固定量¹⁰⁾と比較した。その結果、人工光で育成する過程で排出された炭素量は、植林後の概ね林齢4年で相殺することができるといえる。相殺後は伐採するまで炭素を固定し続けることが可能である。

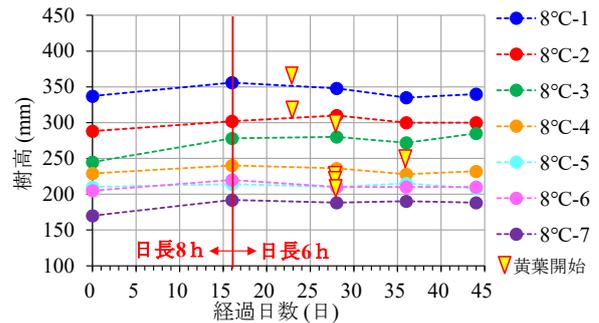


Fig. 9 8°C区の樹高の変化と黄葉開始時期
Change in Tree Height in 8°C Area and Start Time of Yellow Leaves



(1) 8°C-1 (2) 8°C-2

Photo 8 8°C区における黄葉
8°C Area at Yellow Leaves



(1) 試験開始時 (2) 試験終了時

Photo 9 8°C区における試験開始時と終了時の頂芽
Apical buds at the Start and End of the Test in the 8°C Group



(1) 試験開始時 (2) 試験終了時 (3) 植林後

Photo 10 8°C区における試験開始時と終了時および植林後の状況

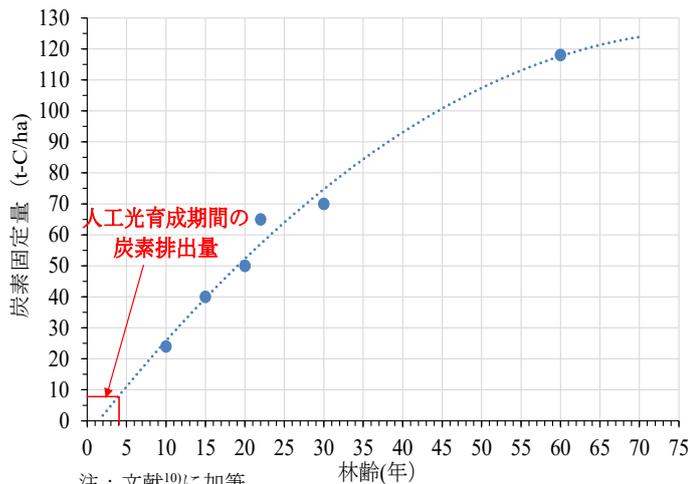
Situation at the Start and End of the Test and After Planting in the 8°C Plot

Table 2 人工光苗木育成における炭素排出量
Carbon Emissions in Growing Artificial Light Seedlings

1 ヶ月あたりの消費電力* (kWh)	消費電力量あたりの炭素排出量 (kg-C/kWh)	5 ヶ月あたりの炭素排出量 (kg-C)	苗木 1 本あたりの炭素排出量 (kg-C/本)	1ha 植林分の炭素排出量** (T-C/ha)
1,000	0.12	600	2.72	8.95

*220 本育成

**1ha あたり 3280 本植林



注：文献¹⁰に加筆

Fig.10 カラマツ林の林齢別の累積炭素固定量¹⁰

Cumulative Carbon Fixation by Age in Larch Forest

人工光環境制御による苗木育成は、歩留まりが高く生産効率が高い上、伐採後の植林に苗の出荷時期以外でも対応でき、植林面積の増加に寄与できるため、総合的にもCO₂吸収効果が高いと考えられる。

が高いこと、周年生産により露地栽培の出荷時期以外でも伐採後の植林に苗木を供給できることから、植林面積の増加に寄与できる。したがって、総合的にCO₂吸収効果が高いといえる。

5. まとめ

苗木不足を解消する技術として、人工光環境制御によるカラマツ苗木の高効率育成技術の検討を行った。その結果、人工光環境制御による苗木育成には以下の効果があることがわかった。

- 1) 前処理を施し、環境制御下で播種したカラマツの発芽率は70%であり、露地栽培に対して2倍以上向上した。
- 2) 人工光環境制御による苗木育成では、PF₆ 110 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で形状比が良好な苗を得られた。
- 3) 人工光環境条件における日長制御では、低温より生育適温条件下で冬芽が形成された。秋季植林および生育調整に適用できる。
- 4) 人工光で苗木を5カ月間育成する過程で排出される炭素量を試算した結果、植林後、概ね林齢4年で相殺される。以後は伐採まで炭素を固定する。さらに、人工光環境制御による苗木育成は生産効率

カラマツは、強度が高く建築構造材として非常に有望である一方、苗木の育成はスギ、ヒノキに比べて難易度が高いとされている。人工光育成苗においても、人工的に制御された環境下での挙動についてはまだ不明な点が多く、今後、安定的に栽培できる条件を検討する必要がある。さらに、植林後の長期的生育評価や、強度や弾性など用材としての適性評価を行う予定である。

また、苗木の生育状況を画像解析により判別する方法を試行中である。将来的に栽培管理の省力化、自動化につながると考えられ、さらなる検討を進めていくところである。

大林組が目指すサステナブル・サプライチェーンの共創では、伐採～苗木植林～育林という一連のプロセス全体の最適化・効率化が求められている。本技術の実用化にあたっては、人工光苗木育成の特長を最大限に活かしてサプライチェーンへの技術展開ができるよう、効果的な適用方法を継続的に検討していきたい。

謝辞

本研究を進めるにあたっては、共同研究を行った信州大学野末雅之名誉教授、野末はつみ特任准教授、白井花菜氏より苗木の光環境に対する応答性に関して多くの助言を頂きました。長野県山林種苗組合には、カラマツ種子の提供を頂きました。長野県林業総合センター、(株)丸八種苗園には、カラマツ苗木育成方法について助言を頂きました。ここに御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 酒井寛二, 漆崎昇, 相賀洋, 下山真人: 建物のライフサイクル二酸化炭素排出量とその抑制方策に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 484 号, pp.105-112, 1996
- 2) https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20201005_1.html (参照 2020-10-13)
- 3) 下山真人, 溝田陽子, 高橋真一: 植物工場における光環境および養液制御によるハウレンソウの高ルテイン・低硝酸塩化水耕栽培技術, 大林組技術研究所報, No.84, 2020
- 4) 林野庁: 人工林の齢級構成, 森林資源の現況, 2017
- 5) 林野庁: 林業種苗の概要, pp6, 2019
- 6) 菅原聡: カラマツ林の有効利用の関する研究, 平成5年度科学研究補助金(一般研究C)研究成果報告書, pp5-39, 1994
- 7) 来田和人, 今博計: カラマツ種子を発芽促進処理せずにコンテナに播くとどうなるか, 地方独立行政法人北海道立総合研究機構, 森林研究本部, 光珠内季報№178, pp.1-5, 2016
- 8) 八木橋勉, 中谷友樹, 中原健一, 那須野俊, 櫃間岳, 野麻穂子, 八木貴信, 齋藤智之, 松本和馬, 山田健, 落合幸仁: スギコンテナ苗と裸苗の成長と形状比の関係, 日本森林学会誌, 98巻4号, pp.139-145, 2016
- 9) 花房尚: 材木の成長に与える日長の影響 -とくにカラマツ属を中心として-, 地方独立行政法人北海道立総合研究機構, 森林研究本部, 光珠内季報№12, pp. 20-24, 1972
- 10) 片倉正行, 山内仁人, 小山泰弘: カラマツ林, アカマツ林, コナラ林の現存量と炭素貯留量, ならびにアカマツ林伐採後の土壌炭素量の変化, 長野県林業総合センター研究報告 22 号, pp.33-55, 2007