

秋施肥がスギコンテナ苗の耐凍性に及ぼす影響

飛田博順¹・原山尚徳¹・上村 章¹・香山雅純¹・齋藤隆実¹・矢崎健一²・奥田史郎¹

¹ 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所

² 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所北海道支所

要旨：育苗時の追肥の時期の違いがスギコンテナ苗の耐凍性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として追肥実験を行った。8月から11月まで各月の追肥処理区および追肥しなかった対照区の300ccコンテナ苗に対して、翌1月の耐凍性を針葉の電解質漏出率により評価した。追肥の翌4月に光合成活性を測定し植栽後の成長を調べた。電解質漏出率は、対照区に比べて全追肥処理区で有意に低かったが、11月追肥区は8月、9月追肥区に比べて有意に高い値を示した。追肥翌春の光合成活性と植栽後の樹高成長は、11月追肥区で他の追肥処理区に比べて抑制されることはなかった。追肥により耐凍性が上昇することに加え、追肥処理間では時期が遅い場合に耐凍性に負の影響を及ぼす可能性が示唆されたが、秋施肥による翌年の成長への負の影響はないことが示された。

キーワード：クロロフィル蛍光、電解質漏出率、浸透ポテンシャル、光合成

Effect of fall fertilization on cold tolerance and growth of *Cryptomeria japonica* container seedlings in the following year

Hiroyuki TOBITA¹, Hisanori HARAYAMA¹, Akira UEMURA¹, Masazumi KAYAMA¹, Takami SAITO¹, Kenichi YAZAKI², Shiro OKUDA¹

¹ Forestry and Forest Products Research Institute; ² Hokkaido Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute

Abstract: A fertilization experiment was conducted to determine the effect of different fertilization times on the cold tolerance of *Cryptomeria japonica* container seedlings (300 cc) from the second growing season. Cold tolerance was assessed in January following fertilization in both control (no fertilizer) and treatment (fertilization treatment for each month between August and November) groups based on the rate of electrolyte leakage from the needles. Photosynthetic activity was measured in April after fertilization, followed by planting trials. Fertilization treatment in November increased the rate of electrolyte leakage at -15°C compared with that in August and September, whereas it decreased the rate compared with no fertilization treatment. Compared with other fertilization treatments, spring photosynthetic activity following fertilization and tree height growth up to September after planting were not suppressed by fertilization treatment in November. These results suggest that additional fertilization increases cold tolerance and that late fertilization treatments have a negative effect on cold tolerance; however, fall fertilization does not have a negative effect on growth in the following year.

Keywords: Chlorophyll fluorescence, Electrolyte leakage, Osmotic potential, Photosynthesis,

I はじめに

再造林の効率化のためにコンテナ苗の利用が促進されている(9)。再造林コストの大きな部分を占める下刈り回数を削減するために、植えてすぐ成長する苗が望まれ、そのための育苗方法が検討されている(10)。これまでに育苗時の9月上旬や10月上旬の追肥(秋施肥)により翌春に植栽した後の1年間の成長に促進効果があることを報告した(7,8)。ただし、秋施肥時期が耐凍性の獲得に負の影響を及ぼし、凍害を受けやすくなるのが危惧される場合がある(6)。針葉樹では9月ごろの秋施肥が耐凍性を高めることが多いが、秋施肥に対する耐凍性の反応は

種特異的であり、施用時期や施用量により異なる可能性がある(3)。本研究では、育苗時の追肥時期の違いがスギコンテナ苗の耐凍性の獲得に及ぼす影響と、耐凍性に見られた変化が追肥の翌春の光合成活性や植栽後の成長に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

II 材料と方法

1. 材料 森林総合研究所(茨城県つくば市)構内のビニールハウスで育苗した播種後2生育期間目のスギコンテナ苗を用いた。種子は苫田21号(滋賀県林業普及センター油日採種圃少花粉スギミニチュア採種圃で採取)を

用いた。2021年2月にセルトレイ(200穴)に播種し、同年6月にコンテナ(300ccリブ型)に移植した。元肥としてコンテナへの移植時に Osmocote Exact Mini (N-P-K 16-8-11, 肥効期間3-4ヶ月)を1.8g/本(6g/L相当)与えた。追肥として10月中旬に Osmocote Exact standard High K (N-P-K 11-11-18, 肥効期間5-6ヶ月)を1.8g/本与えた。また追肥までに液肥を週1回施用した。側面を開放したビニールハウス内で越冬させ、2年目の春の施肥をせず、追肥開始まで灌水のみで育苗を続けた。

2. 追肥処理 追肥前の苗高は 41.8 ± 1.0 cm(平均 ± 標準誤差, $n = 84$)であった。2022年8月から時期を変えて1回のみ追肥を行い、以下の4つの追肥処理区を設定した: 8月12日(AUG, $n = 17$), 9月6日(SEP, $n = 17$), 10月5日(OCT, $n = 20$), 11月2日(NOV, $n = 15$)。追肥を行わない対照区(CON, $n = 15$)も設定した。追肥として前述の Osmocote Exact standard High K (肥効期間5-6ヶ月)1.8g/本を根鉢表面に播いた。4.5g/本の追肥量(ハイコントロール085, N-P-K 10-18-15, 肥効期間100日)によりスギコンテナ苗の成長が促進された(5)ことから本研究の追肥量は比較的少ない量という位置付けとなる。育苗期間中の追肥後の成長を明らかにするために8月の追肥前と翌3月に苗高と地際直径を測定した。

3. 測定項目 各処理5個体の、根元から30から40cmの位置の二次枝および針葉を対象に、生理特性を測定した。年間で最も気温が低下する2023年1月(11日)に、耐凍性の評価を、一般的に用いられている電解質漏出率の測定により行った(2, 3)。早朝に1個体から二次枝を5本採取し、約 2°C の低温室で、1枝から針葉5mm片を10枚作成し、1mlのイオン交換水を入れた30mlバイアル瓶5本に1枝から2枚ずつ(5枝で合計10枚)分けた(3)。1個体から分けた5本の内、1本を低温室の 2°C に置き、残りの4本をプログラムフリーザー(ESPEC, MC-711)で -2°C に2時間入れた後、 $5^\circ\text{C}/\text{時間}$ の速度で冷却した(I)。冷却中、 $-5, -10, -15, -20^\circ\text{C}$ の各設定温度で30分置き、対象サンプル1本を取り出しイオン交換水10mlを加えて自然解凍後に攪拌した。 25°C の室内で20時間安置し、攪拌後に電気伝導度(EC-I)を測定した(Horiba LAQUA twin COND)。オートクレーブで処理し(121°C で20分)、 25°C の室内で20時間安置後に電気伝導度(EC-d)を測定した。以上の結果より各設定温度での電解質漏出率(REL)を以下の式から算出した。

$$\text{REL} = (\text{EC-I} - \text{EC-w}) / (\text{EC-d} - \text{EC-b}) \times 100$$

EC-w と EC-b はオートクレーブ前後のイオン交換水の電気伝導度である。 2°C のサンプルについて同様の測定を行った。耐凍性測定までの24日間のハウス内の気

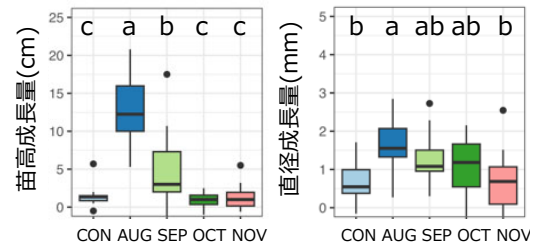


図-1. スギコンテナ苗の追肥直前の8月から翌3月までの苗高成長量(左図)と地際直径成長量(右図)。異なるアルファベットは処理区間で有意差があることを示す(Tukey, $p < 0.05$, $n = 15-20$)。

Fig. 1 Height growth (left) and diameter growth (right) from August to next March of containerized seedlings of *Cryptomeria japonica*. Different alphabets indicate significant differences among treatments (Tukey, $p < 0.05$, $n = 15-20$).

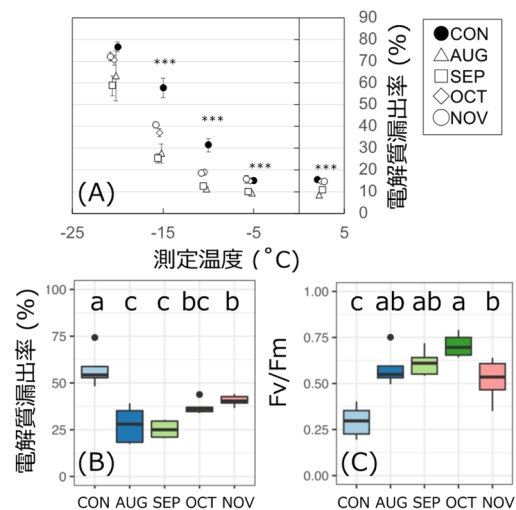


図-2. 1月のスギコンテナ苗の針葉の測定温度ごと(A)と -15°C での電解質漏出率(B)と生育環境での夜明け前の F_v/F_m (C)。***は尤度比検定で有意差があること($p < 0.001$)を示す。異なるアルファベットは処理区間の有意差を示す(Tukey, $p < 0.05$, $n = 5$)。

Fig. 2 Electrolyte leakage from *Cryptomeria japonica* shoots frozen at each temperature (A) and -15°C (B), and predawn F_v/F_m of other shoots under growing condition (C). *** $p < 0.001$ Different alphabets indicate significant differences among treatments (Tukey, $p < 0.05$, $n = 5$).

温は外気温より高く、日最高気温で $3.1 \pm 1.1^\circ\text{C}$ (平均 ± 標準偏差)、日最低気温で $0.35 \pm 0.49^\circ\text{C}$ の違いがあった。

耐凍性測定の前週に、ストレスの指標として夜明け前

の光合成の最大光量子収率 (F_v/F_m) を測定した (Mini-PAM II, Walz)。また、浸透調整の状況把握のために二次枝を採取し浸透ポテンシャルを測定した (VAPRO 5520 型, Wescor)。追肥の翌春の 2023 年 4 月下旬に、二次枝を対象とし、光飽和時 ($1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) の純光合成速度とクロロフィル蛍光 (ETR, $Y(\text{NPQ})$, $Y(\text{NO})$, F_v/F_m) を測定した (CO_2 ; $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$, LI-6800, Licor)。ETR は電子伝達速度, $Y(\text{NPQ})$ は制御された熱放散, $Y(\text{NO})$ は制御されていない熱放散を意味する(4)。追肥の翌春の 5 月中旬にスギコンテナ苗を森林総合研究所実験林苗畑の 9 区画に植栽し植栽時と 9 月 (樹高のみ) に毎木調査を行った。

4. 解析 各測定パラメータを目的変数, 追肥処理を固定効果, 個体位置 (育苗時のコンテナの違いと, 植栽時の場所の違い) をランダム効果とした一般化線形混合モデル (GLMM) を作成し, 固定効果について尤度比検定を行った (Rver. 4.3.1)。追肥処理の効果が有意な場合は, 多重比較を行った。

III 結果と考察

1. 追肥後の育苗中のコンテナ苗の成長 処理開始時の苗高と地際直径は処理間で有意な差がなかった (それぞれ $p = 0.22$, $p = 0.11$)。追肥処理開始前の 8 月から翌 3 月までの伸長成長量は, 8 月追肥区, 9 月追肥区の順に大きく, 10 月と 11 月追肥区は対照区と有意な差がなかった (図-1 左)。地際直径の成長量は, 8 月追肥区が 11 月追肥区と対照区より大きかったが, 他の処理区間の差は不明瞭であった (図-1 右)。以上の結果より, 10 月以降の追肥では徒長が生じないことが示唆された。一方, 10 月追肥区でも翌 3 月までに肥大成長が生じていた。以上の 10 月追肥区の応答はこれまでの報告(8)と同様の傾向であった。

2. コンテナ苗の耐凍性 針葉の -15°C での電解質漏出率は, 対照区で最も高かった ($57.7 \pm 4.5\%$, 平均 \pm 標準誤差) (図-2A, B)。11 月追肥区の電解質漏出率 ($40.6 \pm 1.3\%$) は対照区より低かったが, 8 月と 9 月追肥区より高かった。10 月追肥区は 8 月と 9 月追肥区と 11 月追肥区間の値を示した ($37.1 \pm 1.8\%$)。 -20°C では特に 8 月追肥区の値のばらつきが大きく, 有意な処理区間差が見られなかった (図-2A)。以上の結果より, 8 月と 9 月追肥区に比べて 11 月追肥区では耐凍性が低下する可能性が示唆された。また, 対照区で明らかに耐凍性が低い値を示しており, 窒素肥料不足による耐凍性低下(6)を支持する結果であった。

耐凍性測定の翌週に測定したシュートの浸透ポテンシャルは処理間で有意な差がなかった ($p = 0.85$)。追肥時期

によらず低い浸透ポテンシャルを示し ($-2.71 \pm 0.11 \text{ MPa}$ ~ $-2.56 \pm 0.05 \text{ MPa}$, 平均 \pm 標準誤差), 浸透調節がされていたことが明らかになった。また, 11 月追肥区の夜明け前の F_v/F_m は, 10 月追肥区より低下したが, 8 月と 9 月追肥区とは有意な差がなかった (図-2C)。対照区が他の追肥処理区に比べて大幅に低く (0.29 ± 0.04 , 平均 \pm 標準誤差), 窒素不足で低温と強光のストレスを受けていることが示唆された。

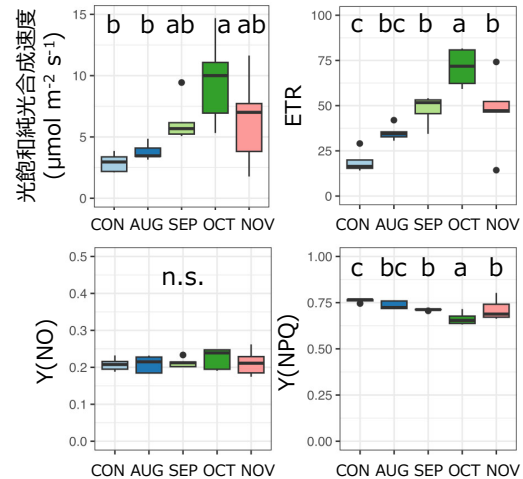


図-3. 追肥の翌 4 月のスギコンテナ苗シュートの光合成活性のパラメータ。異なるアルファベットは処理区間の有意差を示す (Tukey, $p < 0.05$, $n = 5$)。

Fig. 3 Photosynthetic parameter at April following fertilization of *Cryptomeria japonica* container seedlings. Different alphabets indicate significant differences among treatments (Tukey, $p < 0.05$, $n = 5$).

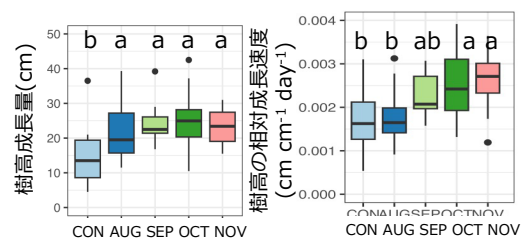


図-4. 追肥の翌年 4 月から 9 月のスギコンテナ苗樹高の成長量 (左図) と相対成長速度 (右図)。異なるアルファベットは処理区間で有意差があることを示す (Tukey, $p < 0.05$, $n = 14-20$)。

Fig. 4 Height growth and relative height growth rate of *Cryptomeria japonica* from April to September in the following year of fertilization. Different alphabets indicate significant differences among treatments (Tukey, $p < 0.05$, $n = 14-20$).

3. 追肥の翌春の光合成活性 追肥処理の翌春のシート投影面積あたりの光飽和純光合成速度では、10月追肥区が対照区と8月追肥区に比べて高い値を示し、11月追肥区は他処理区と有意な差がなかった(図-3)。ETRも光合成速度と同様の傾向を示し、10月追肥区が他の処理区より高く、9月と11月追肥区は対照区に比べて高い値を示した。Y(NPQ)は10月追肥区が最も低く、対照区が最も高い値を示した。11月追肥区のY(NPQ)は8月と9月追肥区と有意な差がなかった。Y(NO)は処理区間で有意な差がなかった($p = 0.57$)。以上より、11月追肥区では他の追肥処理区に比べて光合成活性が低い訳ではないことが明らかになった。対照区では他の追肥処理区に比べて4月の F_v/F_m が低く(0.705 ± 0.023 , 平均 \pm 標準誤差) (結果を示していない), 光合成活性の低下を、制御された熱放散であるY(NPQ)により補償する形でエネルギー分配の調整を行っていることがわかった。8月追肥区でも対照区と同様に光合成活性が低い理由は、追肥後の育苗中の伸長成長による希釈効果が考えられる(II)。

4. 追肥の翌年の植栽後の成長 追肥の翌年の9月までの樹高成長量は、対照区より追肥処理区で大きかった(図-4左)。樹高の相対成長速度は、10月と11月追肥区が8月追肥区より高かった(図-4右)。以上の結果より、秋施肥により追肥翌年の樹高成長が促進されることはあっても、抑制されることはないことが明らかになった。

追肥に肥効期間5-6ヶ月の緩効性肥料を用いた場合、8月の追肥では育苗中の伸長成長を促進するが、植栽後の翌春から9月までの樹高の相対成長速度が、秋施肥、特に10月や11月の追肥よりも低下することが明らかになった。針葉中の窒素の貯蔵が、植栽後の速やかな成長に寄与する(II)。8月追肥区では冬季に肥料切れになり、針葉中の窒素濃度を高められないことが成長抑制の原因の一つと考えられた。なお、本研究では追肥を根鉢表面に施したため、飛田ら(7)の結果と同様、植栽後の成長に対する根鉢内に残った肥料の影響は考えにくい。

今回の追肥量は6g/L相当であり、過剰な施肥ではなく比較的少ない追肥量であった。樹種によっては過剰な追肥により耐凍性が低下する場合は報告されている(3, 6)。秋施肥がスギコンテナ苗の耐凍性へ及ぼす影響について、施肥量の違いの考慮も必要と考える。

5. まとめ 肥料が切れた状態の苗に対して、8月から11月の追肥により追肥をしない場合に比べてスギコンテナ苗の1月の耐凍性が高くなった。追肥処理区間では、追肥時期が遅い場合、スギコンテナ苗の耐凍性に負の影響を及ぼす可能性が示唆されたが、6g/L相当量の秋施肥による翌年の成長への負の影響はないことがわかった。

謝辞: 本研究は(国研)森林研究・整備機構森林保険センターによる所内委託プロジェクト「気象害の発生プロセス解明に基づく気象害リスク評価手法の高度化」の支援を受けて行われた。

引用文献

- (1) Burr KE, Hawkings CDB, L'Hirondelle SJ, Binder WD, George MF, Repo T (2001) Methods for measuring cold hardiness of conifers. In: Bigras FJ, Colombo SJ (eds) Conifer cold hardiness. Kluwer Academic, Dordrecht, pp 369-401
- (2) Fiorino P, Mancuso S (2000) Differential thermal analysis, deep supercooling and cell viability in organs of *Olea europaea* L. at subzero temperatures. Adv Horticult Sci 14: 23-27
- (3) Islam MA, Apostol KG, Jacobs DF, Dumroese RK (2008) Effects of fall fertilization on morphology and cold hardiness of red pine (*Pinus resinosa* Ait.) seedlings. In: Dumroese RK, Riley LE, Technical coordinators. National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations-2007. Fort Collins (CO): USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Proceedings RMRS-P-57: 72-80
- (4) Klughammer C, Schreiber U (2008) Complementary PS II quantum yields calculated from simple fluorescence parameters measured by PAM fluorometry and the saturation pulse method. PAM Application Notes 1: 27-35.
- (5) 大平峰子・松下通也 (2019) 施肥量がスギ実生コンテナ苗の成長に及ぼす影響. 日林誌 101: 109-114
- (6) Smiley ET, Shirazi AM (2003) Fall fertilization and cold hardiness in landscape trees. J Arboriculture 29(6): 342-346
- (7) 飛田博順・齋藤隆実・矢崎健一・香山雅純・才木真太郎・上村章 (2020) スギコンテナ苗の植栽後2年間の成長に及ぼす育苗時の追肥の影響. 関東森林研究 71(1): 37-40
- (8) 飛田博順・上村章・大平峰子・山野邊太郎・才木真太郎・香山雅純・原山尚徳 (2021) スギコンテナ苗の成長に及ぼす育苗時の追肥の影響. 関東森林研究 72(1): 53-56
- (9) 林野庁: 令和4年度森林・林業白書. <https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r4hakusyo/> (2023.11.13 参照)
- (10) 山中豪 (2019) ガラス室の使用と追肥および育苗密度の違いがスギコンテナ苗の成長に与える影響. 三重県林業研究所研究報告 9: 21-26
- (11) Zhu Y, Li S, Wang C, Dumroese RK, Li G, Li Q (2020) The effects of fall fertilization on the growth of Chinese pine and Prince Rupprecht's larch seedlings. J For Res 31: 2163-2169