

論文 (Original article)

スギ、ヒノキコンテナ苗育苗培地への木質バイオマス燃焼灰混合が苗木の成長と養分状態におよぼす影響

長倉 淳子^{1)*}、小笠 真由美²⁾、山田 毅¹⁾、平井 敬三¹⁾

要旨

木質バイオマス発電所から産出される燃焼灰（以下、燃焼灰と略す）は、そのほとんどが産業廃棄物として処理されているが、燃焼灰は Ca や K 等の肥料元素を含有しているため土壌資材として有効利用できる可能性がある。本研究では、燃焼灰のコンテナ育苗培地としての利用可能性を探るため、燃焼灰の混合率（体積比）を変えた培地（0%（対照）区、5%区、10%区、25%区）でスギとヒノキを 8 - 9 カ月間育成し、苗木の成長と養分状態を調べた。スギ、ヒノキとも燃焼灰の混合が個体の成長を促進することはなかった。燃焼灰の混合率が成長に及ぼす影響は樹種によって異なり、スギでは 25%区、ヒノキでは 10%区と 25%区で、苗高、直径、乾重の成長が対照区に比べ著しく抑制された。掘り取り時の交換性 Mg、Na 含有量は燃焼灰の混合率が高い培地ほど低かった。燃焼灰の混合率が高い処理区ほどスギ葉の Ca 含有量は高くなったが、スギ、ヒノキ葉の Mg、K 含有量やヒノキ葉の Ca 含有量に有意な処理間差はみられなかった。以上の結果から、培地への燃焼灰混合によるスギ、ヒノキ苗の成長促進効果はみられないこと、苗の成長を大きく損なうことなくコンテナ育苗培地資材として培地に燃焼灰を混合できる割合の上限値は、スギでは 10%、ヒノキでは 5%であることが明らかとなった。今後は燃焼灰を培地に混合したコンテナ苗を林地に植栽した後の健全性に関する研究が必要である。

キーワード：燃焼灰、コンテナ苗、ヒノキ、スギ、養分吸収、施肥

1. はじめに

2012 年に再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT）が開始されて以降、木質バイオマス発電所の需要が高まっている（林野庁 2017）。大型の木質バイオマス発電所の稼働に伴い、燃料となる木質バイオマスが不足し、幹材部だけでなく枝葉も燃料として利用され始めている。同時に、木質バイオマス発電所から産出される燃焼灰（以下、燃焼灰と略す）も増加している。燃焼灰は、そのほとんどが産業廃棄物として処理されており、発電事業の採算性を低下させる一因となっている。しかし、平成 25 年 6 月に環境省から、木質ペレット又は木質チップを専焼ボイラーで燃焼させて生じた焼却灰のうち、有効活用が確実で、かつ不要物とは判断されない焼却灰は、産業廃棄物に該当しない、との通知が出された（環産産発第 1306282 号）。燃焼灰はカリウム（K）やカルシウム（Ca）等の肥料元素を含有しているため（Sano et al. 2013）、燃焼灰を肥料や土壌資材として有効利用できる可能性がある。その場合、産業廃棄物としての処理コストの削減が見込まれ、発電事業の採算性の向上が期待される。しかし、燃焼灰は肥料元素の他に重金属も含有するため、利用する前

に安全性を確認し、樹木の成長への影響を調べる必要がある。

現在、戦後の拡大造林期に造成された人工林が主伐期を迎えており、再造林の必要性が増している。再造林のコスト削減のため、伐採から植栽までの作業を一貫しておこなう「一貫作業システム」が提案されており（今富 2011）、植栽苗としてのコンテナ苗の普及に向けた実証試験が進んでいる（梶本・宇都木 2016）。コンテナ苗は根鉢が付いた状態で流通している点で、裸苗に比べて運搬や植栽作業の利便性が優れている。一方、露地栽培の裸苗と異なり、コンテナ苗の栽培には根鉢を形成するための培地（培土）や肥料が不可欠であるため、資材コストが高く、苗木単価も高い傾向がある（鹿又・上村 2011）。そこで、燃焼灰をコンテナ苗の培地に混合して、培地資材および肥料として利用することができれば、燃焼灰の有効利用とコンテナ育苗苗のコスト削減が可能となる。しかし、木質燃焼灰の施用が植物の成長に及ぼす影響に関する報告は少なく（折橋ら 2011, 和田・内山 2016）、培地への燃焼灰混合がコンテナ苗の成長・生残や培地の化学性に及ぼす影響についてはまだ明らかになっていない。

原稿受付：平成 29 年 10 月 5 日 原稿受理：平成 29 年 12 月 15 日

1) 森林総合研究所 立地環境研究領域

2) 森林総合研究所 植物生態研究領域

* 森林総合研究所 立地環境研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

本研究では、コンテナ育苗苗培地への混合資材としての燃焼灰の利用可能性を調べるため、培地への灰の混合率を変えてスギとヒノキの育成試験を行なった。具体的には、1) 燃焼灰の混合が樹体の成長に及ぼす影響、2) 燃焼灰が樹体や培地の化学性に及ぼす影響、3) 培地に燃焼灰を混合できる割合の3点について検討した。

2. 材料と方法

2.1 コンテナ苗材料

スギとヒノキの種子をそれぞれ512穴のエクセルトレイ（エクセルソイル、イワタニアグリグリーン）2つに播種し、茨城県つくば市の森林総合研究所温暖化影響実験棟において昼28℃、夜23℃、毎日2回灌水の条件下で発芽させたスギおよびヒノキの実生苗を材料として用いた。スギとヒノキの種子は共に森林総合研究所千代田苗畑（茨城県かすみがうら市）で2011年10月に採取され、-5℃で保管されたものである。スギ、ヒノキともに2016年2月15日に播種したが、ヒノキの発芽率が良くなかったため、同年4月5日に再度播種を行った。両樹種とも発芽から約1カ月後、苗木をエクセルトレイの培地ごと300ccリブ型マルチキャビティコンテナ（JFA-300）に植え替えた。植え替えは、スギは2016年4月14日、ヒノキは同年5月17日に行った。JFA-300はキャビティ数が24個、コンテナのサイズは45cm×30cm×15cmである。

2.2 燃焼灰の混合率を変えたコンテナ苗の育成

本研究では、コンテナに充填する培地への燃焼灰の混合率を変えた4つの処理区を作った。基本培地はピートモス（カナダ産）とパーライトを9:1の体積比で混合したものを用いた。基本培地に加える燃焼灰の混合率は、体積比で0%（対照区）、5%（5%区）、10%（10%区）、25%（25%区）の4段階とした。使用したピートモス、パーライト、燃焼灰の仮比重は、それぞれ0.10、0.11、1.46（ g cm^{-3} ）である。ここに元肥として市販の固形肥料（オスモコートエグザクトミニ；N16-P8-K11, Scotts社）を培地1Lにつき2gの割合で混ぜ込んだ。成分は、N: 15%、P: 2.6%、K: 9.1%、Mg: 2%、Mn: 0.05%、B: 0.02%、Fe: 0.4%、Cu: 0.05%、Mo: 0.02%、Zn: 0.018%である。この固形肥料の肥効期間は3～4カ月とされている。燃焼灰にはNがほとんど含まれておらずPも少ないため、NやPの欠乏による成長阻害を抑制することを目的として、スギは2016年7月27日と11月15日に、ヒノキは同年9月6日に、この固形肥料をキャビティあたり約0.2g培地表面に追肥した。ヒノキはスギより播種・植え替え時期が約1カ月遅く、樹体も小さかったため、追肥の回数は一回とした。コンテナ苗の培地に混合する燃焼灰にはグリーン大分発電の木質バイオマス発電所から2015年9月に

産出された主灰を用いた。この主灰の材料はスギ未利用材である。この燃焼灰等について、平成15年3月環境省告示第18号による溶出試験、含有量を同第19号による含有試験を行い、土壤汚染対策法により規定された特定有害物質の溶出量および含有量を調べた。その結果、含有試験においてはすべての項目が基準値を下回り、溶出試験において六価クロム濃度（ 0.2 mg L^{-1} ）は基準値（ 0.05 mg L^{-1} ）を上回ったものの、揮発性有機化合物、農薬等および六価クロム以外の重金属等は土壤汚染対策法の基準値を下回った。使用した燃焼灰について、pH、EC、N、C、K、Ca、Mg、P含有量を測定した結果をTable 1に示す。本研究では、燃焼灰を実験系外に出さないという条件のもと、コンテナ苗の培地への混合資材として本燃焼灰を用いることとした。

燃焼灰混合率の異なる培地をコンテナごとに充填し、1キャビティにつき1本の苗木を移植した。各処理区につき2つのコンテナを作成した。コンテナに植え替えた後は、森林総合研究所内のビニルハウス内において毎日朝夕2回10分ずつスプリンクラーで灌水しながら育成した。

移植時の個体サイズを求めるため、スギは移植後12日後、ヒノキは3日後に、移植しなかった個体から各樹種10本の苗木を掘り取り、苗高、根長、根元直径を測定し、70℃で48時間以上乾燥して個体乾重を測定した（Table 2）。

2.3 成長測定

各処理区につき1つのコンテナの苗木（24本）を成長追跡個体として、スギは2016年6月から12月まで、ヒノキは2016年7月から12月まで、毎月1回苗高を測定し、あわせて生残を確認した。測定期間中に枯死した個体は解析から除外した。

Table 1. コンテナ苗培地に使用した燃焼灰のpH、ECおよび養分元素濃度

pH	EC mS m^{-1}	N	C	K	Ca	Mg	P
		g kg^{-1}					
11.9	326	<0.1	2.6	9.3	20.1	3.9	1.4

pH、ECは灰：脱イオン水=1:10（重量比）で測定

Table 2. スギおよびヒノキのコンテナへの移植時の個体サイズ（スギ、2016年4月26日；ヒノキ、2016年5月20日）

	根元直径 (mm)	苗高 (cm)	根長 (cm)	個体乾重 (mg)
スギ	0.64 ± 0.04	1.70 ± 0.12	4.46 ± 0.12	8.3 ± 1.1
ヒノキ	0.48 ± 0.02	1.61 ± 0.10	2.84 ± 0.28	2.9 ± 0.3

平均値±標準誤差（n=10）

2.4 掘り取り調査

一生育期間を経過した2017年2月24日に、スギ、ヒノキともに成長追跡個体以外のコンテナから各処理区10本ずつ掘り取り、根元直径と苗高を測定し、地上部と地下部に分けて、蒸留水で培地等を洗い落として70℃で48時間以上乾燥後、部位別に乾重を測定した。本研究では苗高を根元直径で除した値を形状比として算出した。掘り取った各処理区10本のうち5本を養分分析用に微粉碎した。掘り取り時にはスギ、ヒノキともに葉の大部分は赤褐色であり、茎との境界が不明瞭だったため、地上部は葉と茎に分けずに全体を粉碎したものを、葉試料として養分分析に供した。主要な養分元素であるN、P、K、Mg、Ca、必須元素のC、微量必須元素であり重金属でもあるCu、Mn、Mo、Zn、重金属のCd、Cr、Ni、一部の植物にとっての必須元素であるAl、およびKと同じアルカリ金属のNa、Rb、Csを測定対象とした。全炭素(C)・全窒素(N)含有量はNCアナライザ(Sumigraph NC-22F, 住化分析センター)により測定した。K、Ca、Mg、P、Al、B、Cd、Cr、Cs、Cu、Fe、Mn、Mo、Na、Ni、Rb、Zn含有量は、試料を硝酸と過酸化水素で湿式灰化した後、分解液中の各元素の濃度をICP質量分析計(Agilent7700, Agilent Technologies)を用いて定量した。

2.5 培地の化学性

4つの処理区について、苗木移植前の培地(n=1)、および苗木掘り取り時(2017年2月24日)の培地(n=5)を採取した。苗木移植前の培地は、風乾後に分析に供した。苗木掘り取り時の培地は、根や生育期間に表面に発生したコケ等を取り除き、風乾後に2mmの円孔篩を通過したものを分析に供した。これらの培地試料についてpH(H₂O)、pH(KCl)、全炭素(C)・全窒素(N)含有量、交換性Na、K、Ca、Mg含有量を測定した。pH(H₂O)、pH(KCl)は風乾した培地:水比(w:v)を1:15としてガラス電極法で測定した。C、N含有量はNCアナライザ(Sumigraph NC-22F, 住化分析センター)により測定した。交換性Na、K、Ca、Mgは、pH 7.0、1.0 mol L⁻¹の酢酸アンモニウム溶液を用いた振とう浸出法(村本ら1992)に準じて抽出した。苗木移植前の培地については、1試料につき4反復で抽出した。抽出液中のNa、K、Ca、Mg各イオンはICP発光分光分析装置(Optima8300, PerkinElmer)で定量した。

2.6 統計解析

スギ、ヒノキそれぞれについて充分活着した移植3カ月後の苗高、掘り取り時の個体サイズ、培地の化学性および葉の元素含有量における処理区間の違いを一元配置の分散分析(one-way ANOVA)により解析した。処理による差が有意であった場合($p < 0.05$) Tukey HSD 検定によって処理区間の差を多重比較した。ただ

し、ヒノキの10%区と25%区は個体が小さかったため、葉の元素含有量の分析を行う際に10個体をまとめて1サンプルとした。したがって、ヒノキの葉の元素含有量については、10%区と25%区に繰り返しがなかったため、対照区と5%区についてt検定を行った。これらの計算には統計ソフト(JMP8.0, SAS Institute)を使用した。

3. 結果

3.1 苗高と生残率の経時変化

スギの苗高は、5%区と10%区は対照区と同様に成長したが、25%区では成長が著しく小さかった(Fig. 1)。移植3カ月後(2016年7月)の25%区では他の処理区に比べて苗高が有意に小さかった($p < 0.05$)(Photo 1)。一方、ヒノキの苗高は、5%区で対照区と同様に成長したのに対し、10%区と25%区ではほとんど伸長成長が認められなかった(Fig. 2)。移植3カ月後(2016年8月)のヒノキでは、25%区と10%区の苗高が、対照区と5%区に比べて有意に小さかった($p < 0.05$)(Photo 2)。

スギ25%区の生残率は移植2カ月後(6月)には100%だったが、3カ月後(7月)には大きく低下して71%となり、一生育期間終了時(12月)には58%で、4つの処理の中で最も低かった。また、5%区および10%区の生残率も6カ月後(10月)には63%まで低下した。一方、対照区は3カ月後(7月)には4つの処理区の中で最も高く79%だったが、5カ月後(9月)に75%になって以降は変化しなかった。そのため、一生育期間終了時(12月)にはスギの生残率は対照区が最も高かった(Fig. 3)。

ヒノキの生残率は、移植3カ月後(8月)から、5%区 > 対照区 > 10%区 > 25%区で逆転しなかった(Fig. 4)。

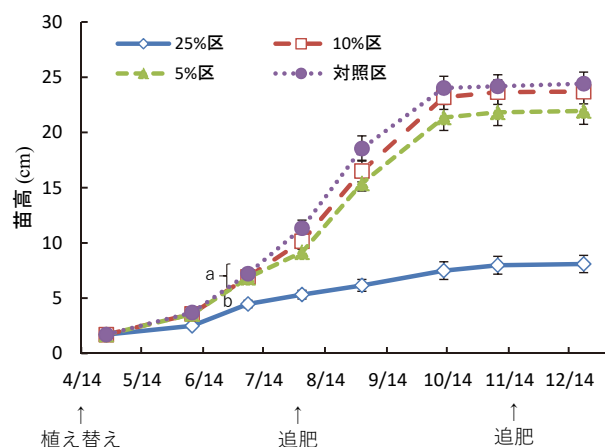


Fig. 1. 各処理区におけるスギコンテナ苗の苗高の経時変化

異なるアルファベットは移植3カ月後(7月)において処理区間で有意差があることを示す(Tukey HSD 検定、 $p < 0.05$)

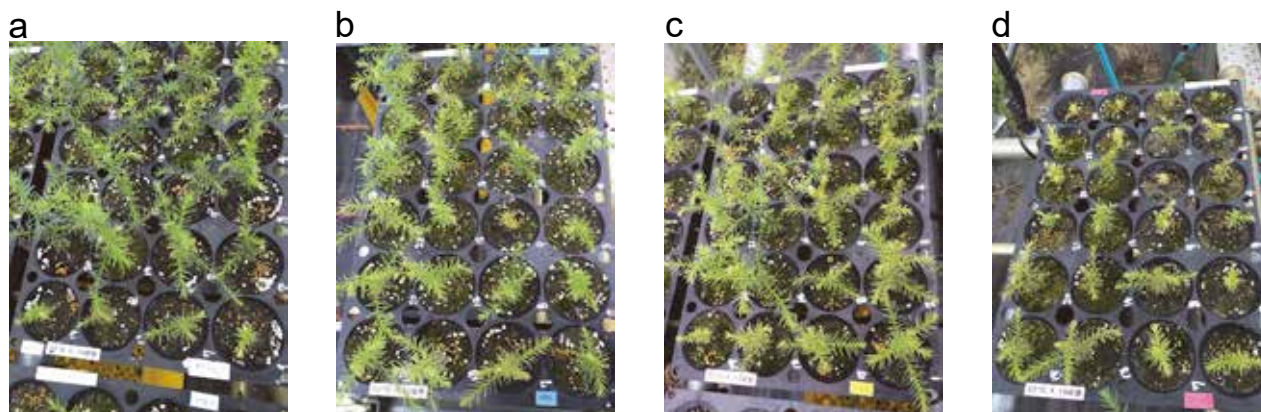


Photo 1. 移植3カ月後（2016年7月）のスギコンテナ苗の様子。

a. 対照区, b. 5%区, c. 10%区, d. 25%区

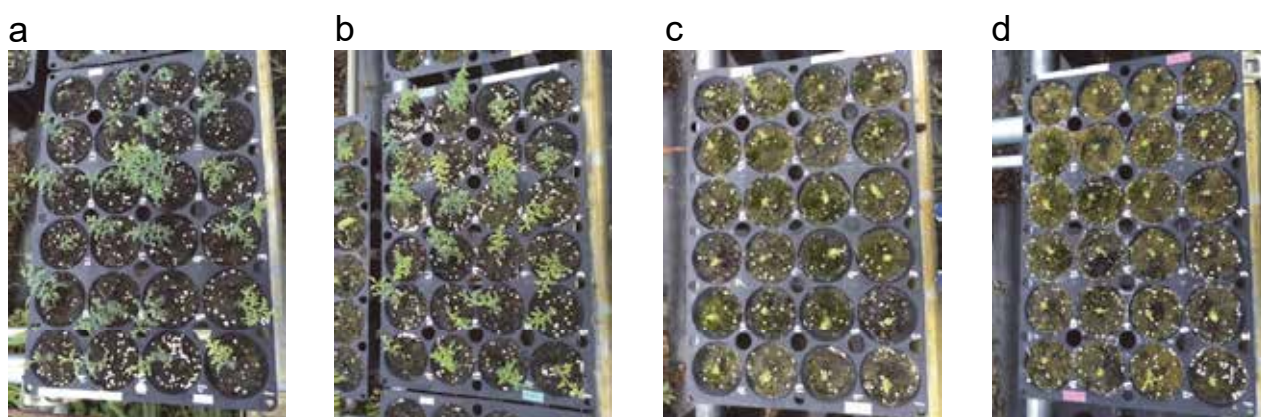


Photo 2. 移植3カ月後（2016年8月）のヒノキコンテナ苗の様子。

a. 対照区, b. 5%区, c. 10%区, d. 25%区

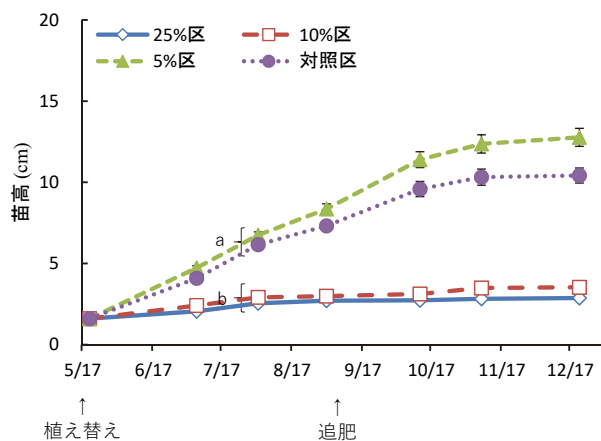


Fig. 2. 各処理区におけるヒノキコンテナ苗の苗高の経時変化

異なるアルファベットは移植3カ月後（8月）において処理区間で有意差があることを示す（Tukey HSD 検定、 $p < 0.05$ ）

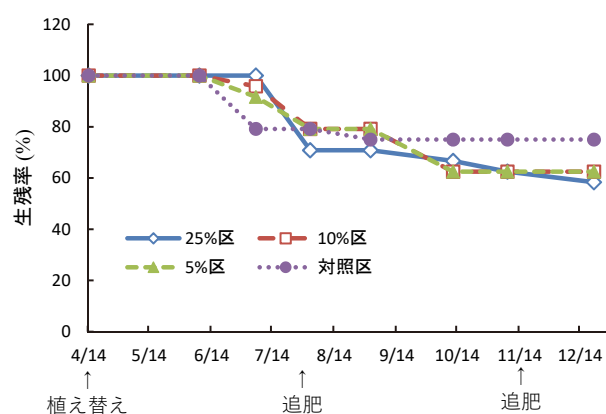


Fig. 3. 各処理区におけるスギコンテナ苗の生残率の経時変化

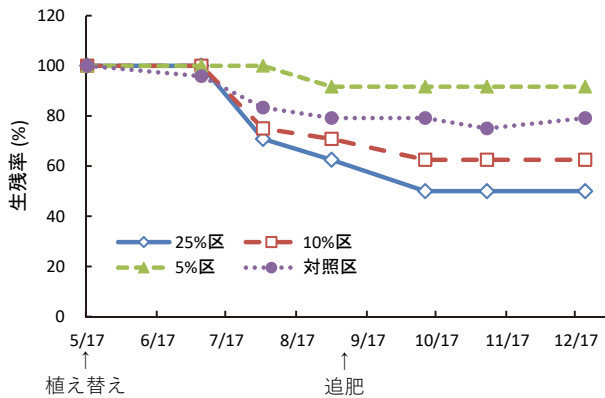


Fig. 4. 各処理区におけるヒノキコンテナ苗の生残率の経時変化

一生育期間終了時（12月）のヒノキの生残率は、5%区が92%、対照区が79%、10%区が63%、25%区が50%だった。ヒノキの5%区と対照区の生残率は、スギで最も生残率の高かった対照区（75%）よりも高かった。

3.2 個体サイズ

コンテナへの移植時の個体サイズは、スギよりもヒノキが小さかったが（Table 2）、苗高に処理間差はみられなかった（Fig. 1）。一生育期間終了後の掘り取り時（2017年2月）のスギ、ヒノキコンテナ苗の個体サイズをTable 3に示す。スギの25%区では他の処理区に比べて根元直径、苗高、地上部乾重、地下部乾重、

および個体乾重が有意に小さかった（ $p < 0.05$ ）（Table 3）。スギの形状比は培地への燃焼灰の混合率が高いほど小さかったが、TR比には燃焼灰の混合率の違いによる有意な差はみられなかった（ $p = 0.10$ ）。掘り取り時のヒノキでは、10%区と25%区の根元直径、苗高、地上部乾重、地下部乾重、および個体乾重が、対照区と5%区に比べて有意に小さかった（ $p < 0.05$ ）（Table 3）。ヒノキの形状比とTR比は、25%区が他の処理区よりも小さい傾向があった。

3.3 培地の化学性

苗木移植前の培地は、燃焼灰の混合率が高いほどpH（ H_2O ）およびpH（KCl）が高く、CおよびNの含有量が低く、交換性CaおよびK含有量が高かった（Table 4）。一生育期間終了後の苗木掘り取り時におけるスギとヒノキの培地の化学性をTable 5に示す。スギ、ヒノキともに培地への灰の混合率が高いほどpH値が高く、C、N含有量および交換性Mg、Na含有量が低い傾向を示した。交換性CaおよびK含有量に灰の混合率による明瞭な違いは認められなかったが、スギの対照区の交換性Ca含有量は他の処理区に比べ高く、ヒノキの対照区および5%区の交換性K含有量は他の処理区より低かった。

3.4 葉の養分状態

一生育期間終了後の苗木掘り取り時のスギとヒノキの葉試料のC、N、K、Ca、Mg、P、Na、Fe、Al、B、Cd、Cr、Cs、Cu、Mn、Mo、Ni、RbおよびZnの含

Table 3. スギおよびヒノキコンテナ苗の一生育期間終了時における個体サイズ

		根元直径 (mm)	苗高 (cm)	地上部乾重 (g)	地下部乾重 (g)	個体乾重 (g)	T/R	形状比
スギ	対照区	3.4 ± 0.1 ^a	25.8 ± 1.4 ^a	3.19 ± 0.25 ^a	1.60 ± 0.12 ^a	4.79 ± 0.35 ^a	2.0 ± 0.1 ^a	76 ± 3 ^a
	5%区	2.9 ± 0.1 ^a	21.5 ± 1.3 ^{ab}	2.38 ± 0.23 ^a	1.17 ± 0.08 ^a	3.55 ± 0.30 ^a	2.0 ± 0.1 ^a	73 ± 4 ^{ab}
	10%区	3.3 ± 0.1 ^a	20.8 ± 1.2 ^b	2.56 ± 0.36 ^a	1.16 ± 0.16 ^a	3.72 ± 0.52 ^a	2.2 ± 0.1 ^a	64 ± 3 ^b
	25%区	1.9 ± 0.1 ^b	8.1 ± 0.9 ^c	0.63 ± 0.10 ^b	0.35 ± 0.06 ^b	0.98 ± 0.16 ^b	1.8 ± 0.1 ^a	41 ± 3 ^c
ヒノキ	対照区	1.8 ± 0.15 ^a	12.3 ± 1.4 ^a	1.03 ± 0.18 ^a	0.49 ± 0.07 ^a	1.52 ± 0.26 ^a	2.0 ± 0.1 ^a	66 ± 3 ^a
	5%区	1.6 ± 0.11 ^a	11.3 ± 0.8 ^a	0.71 ± 0.11 ^a	0.34 ± 0.05 ^a	1.06 ± 0.15 ^a	2.1 ± 0.1 ^a	72 ± 3 ^a
	10%区	0.7 ± 0.04 ^b	4.2 ± 0.4 ^b	0.08 ± 0.01 ^b	0.05 ± 0.01 ^b	0.13 ± 0.01 ^b	1.7 ± 0.2 ^{ab}	59 ± 4 ^a
	25%区	0.7 ± 0.06 ^b	2.7 ± 0.3 ^b	0.05 ± 0.01 ^b	0.03 ± 0.01 ^b	0.08 ± 0.01 ^b	1.3 ± 0.1 ^b	37 ± 3 ^b

注：平均値±標準誤差（n=10）

異なるアルファベットは各樹種について処理区間で有意差があることを示す（Tukey HSD 検定、 $p < 0.05$ ）。

Table 4. 苗木移植前における各処理区の培地の化学性

	pH(H_2O)	pH(KCl)	C g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	C/N	交換性 Ca cmolc kg ⁻¹	交換性 Mg cmolc kg ⁻¹	交換性 K cmolc kg ⁻¹	交換性 Na cmolc kg ⁻¹
0%区	3.4	2.8	447	10.3	43.5	3.2 ± 0.0 ^d	8.3 ± 0.1 ^c	2.12 ± 0.07 ^d	1.75 ± 0.05 ^b
5%区	6.5	6.4	235	5.3	44.2	62.2 ± 2.3 ^c	18.5 ± 0.6 ^b	7.26 ± 0.21 ^c	2.15 ± 0.06 ^a
10%区	7.7	7.9	136	3.3	41.6	75.1 ± 3.5 ^b	21.8 ± 0.6 ^a	9.86 ± 0.31 ^b	2.25 ± 0.08 ^a
25%区	8.8	9.0	73	1.5	48.1	98.2 ± 2.0 ^a	18.8 ± 0.7 ^b	12.99 ± 0.89 ^a	1.92 ± 0.13 ^{ab}

C、N、C/Nについては2反復で測定した平均値

交換性Ca、Mg、K、Naについては4反復で抽出した平均値±標準誤差

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 HSD 検定、 $p < 0.05$ ）。

Table 5. スギおよびヒノキコンテナ苗の一生育期間終了時における各処理区の培地の化学性

		pH(H ₂ O)	pH(KCl)	C g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	C/N	交換性 Ca cmolc kg ⁻¹	交換性 Mg cmolc kg ⁻¹	交換性 K cmolc kg ⁻¹	交換性 Na cmolc kg ⁻¹
スギ	対照区	6.3 ± 0.1 ^d	5.7 ± 0.1 ^d	473 ± 3 ^a	7.5 ± 0.1 ^a	63.1 ± 0.9 ^a	74.4 ± 3.4 ^a	28.8 ± 0.3 ^a	1.23 ± 0.08 ^b	2.66 ± 0.02 ^a
	5%区	7.1 ± 0.1 ^c	6.4 ± 0.1 ^c	167 ± 7 ^b	3.0 ± 0.1 ^b	55.5 ± 0.5 ^b	39.6 ± 0.7 ^b	9.1 ± 0.2 ^b	1.02 ± 0.05 ^c	1.04 ± 0.02 ^b
	10%区	7.6 ± 0.1 ^b	7.0 ± 0.1 ^b	107 ± 4 ^c	2.0 ± 0.1 ^c	52.4 ± 1.0 ^c	39.5 ± 1.4 ^b	7.4 ± 0.3 ^c	1.36 ± 0.03 ^{ab}	0.96 ± 0.02 ^c
	25%区	9.2 ± 0.0 ^a	8.7 ± 0.1 ^a	42 ± 1 ^d	0.8 ± 0.0 ^d	50.7 ± 0.5 ^c	46.2 ± 1.7 ^b	4.8 ± 0.2 ^d	1.52 ± 0.02 ^a	0.58 ± 0.01 ^d
ヒノキ	対照区	5.0 ± 0.1 ^d	4.2 ± 0.1 ^d	486 ± 6 ^a	7.3 ± 0.1 ^a	66.9 ± 0.8 ^a	39.3 ± 2.8 ^a	25.3 ± 0.9 ^a	0.91 ± 0.02 ^b	3.14 ± 0.06 ^a
	5%区	7.2 ± 0.1 ^c	6.5 ± 0.1 ^c	160 ± 2 ^b	2.7 ± 0.1 ^b	59.5 ± 1.0 ^b	42.4 ± 0.9 ^a	10.9 ± 0.4 ^b	0.99 ± 0.02 ^b	1.19 ± 0.04 ^b
	10%区	8.1 ± 0.1 ^b	7.6 ± 0.2 ^b	88 ± 7 ^c	1.6 ± 0.1 ^c	54.5 ± 1.0 ^c	37.4 ± 2.9 ^a	5.6 ± 0.4 ^c	1.19 ± 0.05 ^a	0.72 ± 0.05 ^c
	25%区	9.4 ± 0.0 ^a	9.0 ± 0.1 ^a	36 ± 1 ^d	0.7 ± 0.0 ^d	53.6 ± 0.2 ^c	44.8 ± 2.0 ^a	6.0 ± 0.3 ^c	1.23 ± 0.01 ^a	0.48 ± 0.02 ^d

平均値±標準誤差 (n = 5)

異なるアルファベットは各樹種について処理区間で有意差があることを示す (Tukey HSD 検定、 $p < 0.05$)。

有量を Table 6 に示す。スギでは、培地への燃焼灰の混合率が高いほど葉の Ca、B、Cs、Zn、および Rb の含有量が高かった。しかし、N、K、Mg、P、Na、Cr、Cu、Mo および Ni の含有量に処理の有意な影響は認められなかった。スギ 25%区は、他の処理区よりも葉の Al および Mn の含有量が有意に高く ($p < 0.05$)、Fe 含有量も高い傾向がみられた。また、スギでは燃焼灰を混合したすべての処理区で葉の Cd 含有量が対照区よりも有意に高かった ($p < 0.05$)。スギの葉の C 含有量は他の 3 処理区に比べ、25%区で有意に低かったが ($p < 0.05$)、N には処理区間で違いが認められなかった。ヒノキでは、培地への燃焼灰の混合率が高いほど Ca、Na および B の含有量が高い傾向がみられた。しかし、K、Mg、P、Mn および Zn の含有量に処理の有意な影響は認められなかった。ヒノキの Fe、Al、Cr、Cu および Ni の含有量は他の 3 処理区に比べ、25%区で高かった。ヒノキの葉試料のうち、繰り返しのある対照区と 5%区を比較した場合、P、B、Cs、Mo および Rb の含有量が対照区より 5%区で有意に高かった ($p < 0.05$)。ヒノキの C 含有量に処理区間で明瞭な違いは認められなかったが、N は 10%区と 25%区で高い傾向があった。スギとヒノキを比較すると、ヒノキはスギに比べて、数倍葉の Mn 含有量が高かった。

4. 考 察

培地の pH (H₂O) は、苗木掘り取り時には 5%区で 7.0 以上、25%区では 9.0 以上であり、対照区の培地 (6.3 : スギ, 5.0 : ヒノキ) と比較して著しく高かった (Table 4, 5)。培地に混合した燃焼灰の pH は 11.9 であり (Table 1)、培地は燃焼灰の混合率を反映して高 pH 化したと考えられ、これがスギ、ヒノキコンテナ苗の主な成長抑制要因であると推察された。燃焼灰には Ca と K が多く含まれており (Table 1)、苗木移植前の培地の交換性 Ca および K 含有量は燃焼灰の混合率の増加と同調して高まった (Table 4)。しかし、苗木掘り取り時の培地の交換性 K 含有量は両樹種ともに燃焼灰の混合率の増加と同調しておらず (Table 5)、葉の K

含有量にも有意な処理区間差はみられなかった (Table 6)。交換性 K は流亡しやすいため、一生育期間後にはその多くが流亡したためと考えられる。苗木掘り取り時の対照区の交換性 Ca および Mg 含有量は、苗木移植前より増加していた (Table 4, 5)。対照区は基本培地であるピートモスとパーライトおよび元肥のみで構成されているため、有機質で軽いのに対し、他の処理区は培地に燃焼灰が混入しているために相対的に重く、対照区は単位重量あたりの体積が大きいいため、培地中のわずかな養分量の変化で乾重あたりの養分量の変動が大きくなっていると考えられる。また、対照区は苗木の成長が良いため細根量も多く、Ca や Mg を含む根リターが多く培地に供給されたが、培地自体が有機質のため、培地から根リターを充分除去できなかったために、交換性 Ca および Mg 含有量が高かったのかもしれない。培地の C および N の含有量は培地への燃焼灰の混合率が低い処理区ほど高かった (Table 4, 5)。これは、燃焼灰には C と N はほとんど含まれないが、基本培地であるピートモスは有機物であり C と N を含むため、燃焼灰の混合割合がこれら元素の含有量の違いとして反映された結果であると考えられた。この N 含有量は全 N 量であり植物が利用しやすい無機態 N の量ではないが、培地への燃焼灰の混合率が高い処理区ほど培地の N 含有量が低いことが、燃焼灰の混合率が高い処理区での苗木の成長抑制に影響している可能性がある。また、培地への燃焼灰の混合率が高いほど交換性 Mg、Na 含有量が低い傾向がみられたが (Table 5)、培地への燃焼灰の混合率が高いほど保肥力の高いピートモス (加藤 1998) の割合が低くなるため、塩基が保持されにくかったと考えられる。

コンテナ苗培地への燃焼灰の混合が、スギ、ヒノキコンテナ苗の成長に及ぼす影響は、樹種により異なった。一生育期間終了時の掘り取り個体について対照区と同程度の根元直径および個体乾重がみられたのは、スギでは 5%区と 10%区であったのに対し、ヒノキでは 5%区のみであった (Table 3)。スギの苗高は、経時変化を測定していた個体では 5%区と 10%区は対照区

Table 6. スギおよびヒノキコンテナ苗の一生育期間終了時における葉の元素含有量

	C	N	K	Ca	Mg	P	Na	Fe
スギ	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹
対照区	474.6 ± 1.8 ^a	13.8 ± 1.5	13.0 ± 1.2	10.0 ± 0.4 ^b	2.76 ± 0.12	1.26 ± 0.12	0.90 ± 0.08	0.45 ± 0.22 ^{ab}
5%区	476.4 ± 1.7 ^a	12.9 ± 1.2	12.1 ± 0.7	11.7 ± 0.8 ^b	2.15 ± 0.16	1.51 ± 0.10	0.90 ± 0.10	0.52 ± 0.15 ^{ab}
10%区	473.2 ± 1.2 ^a	12.2 ± 1.2	13.7 ± 1.0	14.7 ± 1.3 ^{ab}	2.10 ± 0.16	1.34 ± 0.13	1.19 ± 0.12	0.31 ± 0.10 ^b
25%区	456.2 ± 4.6 ^b	14.6 ± 1.5	14.7 ± 1.5	17.9 ± 1.8 ^a	2.52 ± 0.32	1.23 ± 0.15	1.18 ± 0.18	1.29 ± 0.35 ^a
ヒノキ								
対照区	484.3 ± 3.3	11.4 ± 1.2	9.3 ± 0.5	8.1 ± 0.3	1.51 ± 0.14	1.35 ± 0.15 ^B	0.45 ± 0.15	0.33 ± 0.04
5%区	479.1 ± 3.1	10.9 ± 0.4	11.7 ± 0.9	11.2 ± 1.5	1.79 ± 0.18	3.36 ± 0.24 ^A	0.58 ± 0.20	0.40 ± 0.13
10%区	475.3	19.1	8.9	11.0	1.58	4.18	1.05	0.21
25%区	478.0	18.5	7.1	14.1	2.44	2.44	3.11	0.64

	Al	B	Cd	Cr	Cs	Cu	Mn	Mo	Ni	Zn	Rb
スギ	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
対照区	69.4 ± 25.6 ^b	24.0 ± 1.1 ^b	0.032 ± 0.007 ^b	61.0 ± 43.1	0.006 ± 0.003 ^c	3.45 ± 1.08	22.7 ± 6.7 ^b	1.32 ± 0.57	19.9 ± 18.9	10.5 ± 1.7 ^b	2.20 ± 0.42 ^b
5%区	67.3 ± 18.5 ^b	26.6 ± 1.3 ^{ab}	0.093 ± 0.012 ^a	71.0 ± 32.9	0.019 ± 0.003 ^b	3.93 ± 0.95	32.5 ± 3.0 ^b	2.14 ± 0.43	18.5 ± 15.7	14.3 ± 0.7 ^{ab}	4.01 ± 0.51 ^{ab}
10%区	54.2 ± 4.2 ^b	27.3 ± 1.4 ^{ab}	0.132 ± 0.021 ^a	40.0 ± 21.5	0.034 ± 0.003 ^a	2.98 ± 0.46	28.6 ± 2.5 ^b	1.48 ± 0.25	11.2 ± 9.6	14.5 ± 1.4 ^{ab}	4.71 ± 0.79 ^{ab}
25%区	148.8 ± 21.1 ^a	30.2 ± 0.4 ^a	0.096 ± 0.008 ^a	143.4 ± 78.6	0.035 ± 0.003 ^a	5.87 ± 1.89	58.4 ± 6.1 ^a	2.67 ± 1.08	55.4 ± 32.0	16.3 ± 1.5 ^a	6.20 ± 0.84 ^a
ヒノキ											
対照区	77.1 ± 11.9	20.2 ± 1.0 ^B	0.070 ± 0.022	26.0 ± 4.8	0.015 ± 0.002 ^B	1.66 ± 0.17	184.8 ± 50.1	0.85 ± 0.05 ^B	0.5 ± 0.1	20.5 ± 2.4	2.65 ± 0.13 ^B
5%区	63.8 ± 9.3	29.5 ± 2.3 ^A	0.113 ± 0.012	35.9 ± 10.4	0.033 ± 0.003 ^A	1.62 ± 0.26	184.0 ± 36.4	1.64 ± 0.25 ^A	0.8 ± 0.1	17.3 ± 1.1	6.63 ± 0.41 ^A
10%区	88.3	35.5	0.109	20.8	0.026	2.81	155.3	1.66	0.6	28.0	4.81
25%区	174.4	43.9	0.075	62.5	0.040	4.42	101.6	2.04	1.5	22.7	4.52

ヒノキの10%区、25%区は個体が小さく、10個体をまとめて1サンプルとしたため、繰り返しがない。その他は平均値±標準誤差 (n = 5)。

スギについて、異なるアルファベットは各元素含有量に処理区間で有意差があることを示す (Tukey HSD 検定, $p < 0.05$)。

ヒノキについて、異なるアルファベットは各元素含有量に対照区と5%区で有意差があることを示す (t 検定, $p < 0.05$)。

アルファベットのついていない元素は処理間に有意差がなかった。

と同程度の成長がみられたが (Fig. 1, 2)、一生育期間終了時の掘り取り個体では 10% 区の苗高は対照区より低かった (Table 3)。ヒノキの苗高は 5% 区でのみ、対照区と同程度であった。両樹種ともに、燃焼灰の混合によって個体の成長が対照区よりも促進されることはなく、むしろ抑制された。このことから、少なくとも本試験のように固形肥料も与える条件では、培地への燃焼灰混合によるスギ、ヒノキ苗の成長促進効果はみられないことが明らかとなった。苗木移植前の培地では燃焼灰の混合率が高いほど培地の交換性 Ca および K 含有量が高かったが (Table 4)、苗木掘り取り時 (移植から約 10 カ月後) には培地の交換性 Ca および K 含有量に灰の混合率による明瞭な違いは認められなかった (Table 5)。

燃焼灰の混合率が高い処理区ほど、スギ葉の Ca 含有量は高まったものの、スギ、ヒノキ葉の Mg、K 含有量やヒノキ葉の Ca 含有量に有意な処理間差はみられず、すべての個体ではないが葉に Cr、Cd、Ni といった重金属、Fe、Cu、Mn、Zn といった微量必須重金属および Al の含有量が高まる個体がみられた (Table 6)。苗の成長を大きく損なうことなくコンテナ苗培地資材として燃焼灰を混合できる割合は、スギでは 10% 程度であるのに対し、ヒノキでは 5% 程度であることが明らかとなった。

スギ 25% 区では他の処理区に比べ、葉の C 含有量が低く、Fe、Mn、Zn といった微量必須重金属の含有量とともに、必須ではない Al の含有量も高い傾向があった (Table 6)。Al は土壌や土壌溶液中で低濃度の場合は成長に有益に働くが、過剰になると Ca や Mg の吸収や根の成長を抑制することが知られている (Marschner 1995)。しかし、他の処理区と比べ、スギ 25% 区で葉の Ca と Mg 含有量は低くなく (Table 6)、T/R も高くなくことから根の成長が抑制されたわけではなかった (Table 3)。このことから、25% 区では Al の過剰害は生じていなかったと考えられる。スギでは燃焼灰を混合したすべての処理区で葉の Cd 含有量が対照区よりも有意に高かったが、燃焼灰の混合割合を反映しているわけではなかった (Table 6)。重金属ではあるが、Fe、Cu、Mn、Zn といった微量必須元素は酵素反応などに必要であり、Ni は必須元素ではないが酵素の構造と維持に働いている (茅野・小畑 1991)。燃焼灰の混合率が高い処理区でも重金属の含有量が高まらなかった個体もあったことから、燃焼灰の混合率が高い処理区でのスギ、ヒノキコンテナ苗の成長抑制に重金属の影響培地への燃焼灰の混合により、燃焼灰に含有される Ca、K および Mg の植物体への吸収量が増加することが見込まれたが、スギ、ヒノキ葉の Mg、K 含有量やヒノキ葉の Ca 含有量に有意な処理間差はみられなかった (Table 6)。燃焼灰を混合していない対照区で良好な成長がみられたことから、苗木の成長には元肥

と追肥で与えた固形肥料に含まれる養分量で充分だったために、培地への燃焼灰の混合による苗木の成長および葉の Mg、K、Ca 含有量に対する施肥効果が小さかったと考えられた。しかしながら、スギでは燃焼灰の混合率が高い処理区ほど葉の Ca 含有量は高くなった (Table 6)。成木ではリター中の Ca 含有量がヒノキに比べスギで多いことが報告されていることから (澤田・加藤 1993)、スギは Ca の要求量が高い樹種である可能性がある。そのために燃焼灰の混合率が高い処理区では Ca 吸収が増え、葉の Ca 含有量に反映されたと考えられる。

1) スギ、ヒノキともに、培地への燃焼灰の混合によって個体の成長が対照区よりも促進されることはなくむしろ抑制され、スギでは 25% 区、ヒノキでは 10% 区と 25% で、根元直径、苗高、乾重が対照区に比べて著しく小さかった、2) 燃焼灰の混合によって、培地の pH は上昇し、交換性 Ca および Mg 含有量は増加し、N、C 含有量は減少し、葉中の Fe、Mn、Zn 等の重金属や Al の含有量が高まる個体があった、3) これらのことを考慮すると、苗の成長を大きく損なうことなく土壌資材として燃焼灰を利用するには、コンテナ苗培地への燃焼灰の混合率 (体積比) の上限値をスギでは 10%、ヒノキは 5% に設定することが適切であると考えられた。将来的に燃焼灰を培地に混合したコンテナ苗の流通を検討するためには、引き続き苗木の成長の追調査を行うとともに、コンテナ苗の林地植栽に伴う培地からの重金属の溶出を調査するなど、コンテナ苗の健全性および安全性に関するさらなる研究が必要である。

謝 辞

木質バイオマス発電所からの燃焼灰の調達では吉田貴紘氏にお世話になった。苗木の成長調査では田中 (小田) あゆみ氏、酒井恵子氏にご協力いただいた。また、植物・土壌試料の調整では根本美千代氏、勝井祥江氏、吉田佳氏のお世話になった。本研究は (国研) 森林研究・整備機構森林総合研究所交付金プロジェクト「木質バイオマス発電事業の安定的な拡大手法の開発」 (課題番号 201423) により行われ、研究の一部に森林総合研究所の「家族責任がある研究者のための支援制度」による研究支援を受けた。

引用文献

- 今富 裕樹 (2011) スギ再造林の低コスト化を目指した技術開発 (1) 伐採・地拵え・植栽の一貫作業による低コスト化. 現代林業, 542, 52-55.
- 梶本 卓也・宇都木 玄 (2016) プロジェクト「コンテナ苗を活用した低コスト再造林技術の実証研究」の紹介. 森林遺伝育種, 5, 101-105.
- 鹿又 秀聡・上村 佳奈 (2011) スギのコンテナ苗の低

- コスト化の可能性. 日本森林学会大会発表データベース 第 122 回日本森林学会大会, 67.
- 加藤 哲郎 (1998) 用土. 藤原 俊六郎・安西 徹郎・小川 吉雄・加藤 哲郎編 “新版 土壤肥料用語事典”. 農村漁村文化協会, 238-246.
- 茅野 充男・小畑 仁 (1991) 元素の生理作用. 茅野 光男編 “現代植物生理学 5 物質の輸送と貯蔵”. 朝倉書店, 89-127.
- Marschner, H. (1995) Mineral Nutrition of Higher plants second edition, Academic press, 889pp.
- 村本 穰司・後藤 逸男・蜷木 翠 (1992) 振とう浸出法による土壤の交換性陽イオンおよび陽イオン交換容量の迅速分析. 日本土壌肥科学雑誌, 63, 210-215.
- 折橋 健・山田 敦・高橋 徹・田代 直明・古賀 信也 (2011) 木質バイオマス燃焼灰の林地還元に向けた基礎知見. 九大演報, 92, 13-18.
- 林野庁 (2017) 平成 29 年版森林・林業白書. 全国林業改良普及協会, 174-175.
- Sano, T., Miura, S., Furusawa, H., Kaneko, S., Yoshida, T., Nomura, T. and Ohara, S. (2013) Composition of inorganic elements and the leaching behavior of biomass combustion ashes discharged from wood pellet boilers in Japan. J Wood Sci, 59, 307-320.
- 澤田 智志・加藤 秀正 (1993) スギおよびヒノキ林下の土壌における塩基の蓄積要因. 日本土壌肥科学雑誌, 64, 296-302.
- 和田 健太郎・内山 知二 (2016) 製材残材を燃料とするボイラーから排出された木質燃焼灰の肥料効果. 日本土壌肥科学雑誌, 87, 40-44.

Effect of woody ash mixing to growing media on the growth and nutrient condition of containerized Sugi (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) seedlings

Junko NAGAKURA^{1)*}, Mayumi Y. OGASA²⁾, Tsuyoshi YAMADA¹⁾ and Keizo HIRAI¹⁾

Abstract

Most of the combustion ash produced from the woody biomass power plant has been considered as industrial waste. However, ash contains nutrients such as Ca and K and may be reusable as a fertilizer and/or soil material for cultivating seedlings. To evaluate the feasibility of using ash as container growing media, we measured the growth and nutrient status of Sugi (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) seedlings planted in containers with different mixing ratios of 0% (as a control), 5%, 10% or 25% of ash application (by volume). Ash application did not increase the seedling size of both Sugi and Hinoki. The height, diameter, and biomass growth of Sugi treated with 25% ash application were significantly restricted compared with those of other treatments. In Hinoki, the height, diameter, and biomass growth were significantly restricted with 10% and 25% ash application. The exchangeable Mg and Na contents in the growing media at the end of the growing season were lower in the seedlings treated with a higher ash mixing ratio. Needle Ca content of Sugi was increased with a higher ash mixing ratio, whereas that of Hinoki was comparable among treatments. No significant difference was observed in needle Mg and K contents of both Sugi and Hinoki among treatments. These results suggested that ash could be mixed up to 10% and 5% for Sugi and Hinoki, respectively, into container growing media without restricting seedling growth. It would be necessary to investigate whether ash-mixed seedlings grow well after planting in a forest.

Key words: biomass combustion ash, containerized seedling, fertilization, hinoki, nutrient absorption, sugi

Received 5 October 2017, Accepted 15 December 2017

1) Department of Forest Soils, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Department of Plant Ecology, FFPRI

* Department of Forest Soils, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; e-mail: kurya@affrc.go.jp