

## 短 報 (Short communication)

# 木質バイオマス発電所燃焼灰の若齢ヒノキ林への施用試験

大谷 達也<sup>1)\*</sup>、酒井 寿夫<sup>1)</sup>

### 要旨

バイオマス発電所燃焼灰の林地施用が樹木の成長に与える影響を検討するため、四国南西部の若齢ヒノキ林において個体あたり年に1 kg ずつ燃焼灰を施用し、年間成長量を2年間にわたって記録した。線形混合効果モデルによって、胸高直径および樹高の年間成長量が灰施用によって減少し、1年1回だけの施用より2年連続2回の施用によって成長量がより低下することが示された。実験室内での溶出試験から、施用後の初回の降雨によってカリウム、硫酸、および塩素といった塩類が高濃度で溶出し、若齢ヒノキの成長を抑制したと考えられた。樹木の成長低下をおこさないように燃焼灰を林地に撒くには、量や散布方法を慎重に検討する必要がある。

キーワード：塩素、成長抑制、カリウム、胸高直径、樹高

### 1. はじめに

近年、FIT制度（再生可能エネルギーの固定価格買い取り）の後押しをうけ木質バイオマスを利用した発電所の稼働が全国で相次いでおり、四国内でも稼働中のバイオマス発電所がすでに複数ある（日本木質バイオマスエネルギー協会 2018）。現在の法制度のもとでは、バイオマス発電所の燃焼灰は産業廃棄物となり、処理費用が必要となる。一方で、バイオマスの燃焼灰にはカリウムやカルシウムといった植物にとっての栄養成分が含まれるため肥料としての利用が期待され、ヨーロッパや北米においては、燃焼灰を林地に施用する際の散布量、灰の形状、土壌の化学性、樹木の反応、および重金属汚染といった観点について検討されている（Pitman 2006, Augusto et al. 2008, Hannam et al. 2018）。国内においてもバイオマス燃焼灰を造林地に施用することができれば、灰処理費用の削減につながるかもしれない。

しかし、林地への燃焼灰施用によって樹木成長が促進されるとの報告がある一方で（Solla-Gullón et al. 2006, Pérez-Cruzado et al. 2011）、成長に影響しない（Park et al. 2005, 折橋ら 2011, 梅田・玉川 2012）、あるいは施用量によっては成長が抑制されるとの報告もある（Brais et al. 2015, 長倉ら 2018）。国内において林業樹種に対する燃焼灰施用の影響を検討したものは上記3例しかなく、いずれも苗木や当年生実生を使って苗畑やコンテナ培地への施用の影響を評価したものであり、造林地でもう少し大きな樹木個体を対象に実施した例はいまだない。燃焼灰の林地施用が樹木の成長に

どのように影響するかを検討するためには、より多くの樹種・生育段階の樹木への施用事例を蓄積する必要がある。そこで、高知県南西部に生育する若齢ヒノキ林に燃焼灰を施用して2年間の成長を追跡し、燃焼灰施用が直径および樹高の年間成長量におよぼす影響を検討した。あわせて、実験室内で灰成分の溶出試験をおこない、主要な成分の濃度変化を明らかにした。

### 2. 材料と方法

#### 2.1 燃焼灰の施用試験

高知県土佐清水市下の加江に生育する若齢ヒノキ林において、2016年3月から2018年3月の2年間にわたり調査をおこなった。試験区1および2として、ともに北向き斜面にあり（傾斜25～32度）、互いに数百m離れた2カ所に調査地を設けた（Fig. 1）。それぞれの試験区には若齢ヒノキ個体50本ずつを含むプロットを4カ所ずつ設置し、燃焼灰を施用するプロットと施用しないプロットを半数ずつ設定した。合計で400本を試験対象木とした。明らかな小個体や異常な樹形のは除外して、全体におおよそ10 m×20 mの範囲に収まるように互いに近接した50個体を選んで1プロットとした。隣接するプロットは互いに10 mほど離し、同じ試験区内の4つのプロットは斜面の水平方向に配置した。このヒノキ林は試験開始の2016年において7年生であったが、ニホンジカによる食害のため複数回の補植がなされ、同齢個体だけで構成されていない（植栽密度およそ3,000本 ha<sup>-1</sup>）。いずれの試験区においても、土壌型は適潤性褐色森林土（土じ

原稿受付：平成30年6月27日 原稿受理：平成30年9月3日

1) 森林総合研究所 四国支所

\* 森林総合研究所 四国支所 〒780-8077 高知県高知市朝倉西町 2-915

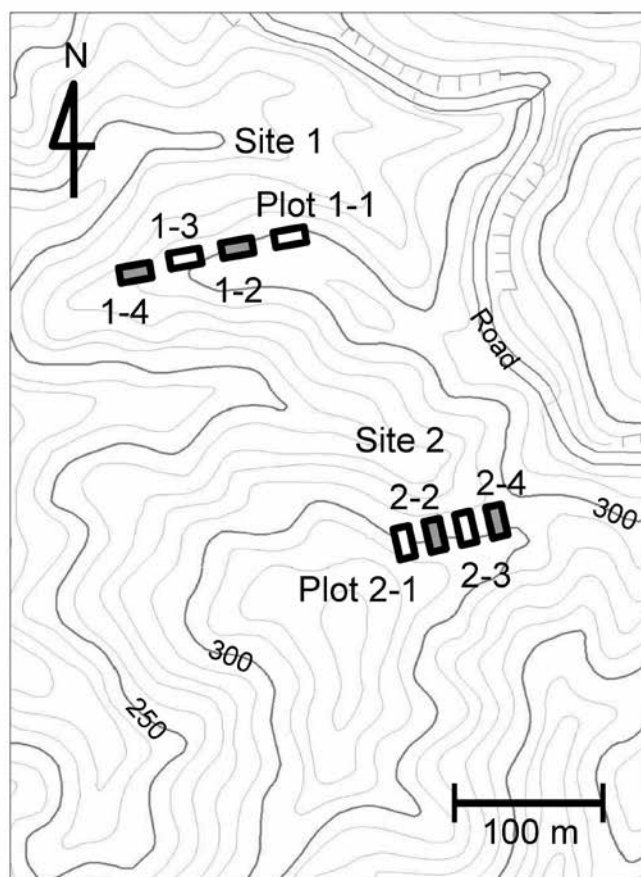


Fig. 1. 調査地の地形および試験区・プロットの配置。  
国土地理院地形図をもとに作図。白抜きのプロットは無処理、灰色のプロットは灰施用を表す。

**Map of study sites and plots.**

Based on the geographical map published by the Geospatial Information Authority of Japan. White plot, control; gray plot, ash application.

よう部 1976)であり、下層植生としてウラジロ、コシダ、ススキ、ヌルデ、およびイチゴ類が繁茂していた。調査地から北へ 10 km 離れた中村気象観測所での記録によれば、年平均気温および年間降水量の順に、年平均値で 16.3 °C および 2,669.2 mm、2016 年では 17.2 °C および 3,225.5 mm、2017 年では 16.1 °C および 2,635.5 mm であった (気象庁 2018)。

2016 年 3 月 14 日から 15 日には初回のサイズ測定と試験区 1 の 2 つのプロット (1-2, 1-4) における灰施用、2017 年同日には 2 回目のサイズ測定と試験区 1 と 2 の 4 つのプロット (1-2, 1-4, 2-2, 2-4) における灰施用をおこなった。残りの 4 プロット (1-1, 1-3, 2-1, 2-3) には一度も燃焼灰を施用せず無処理とした。幹の胸高直径については、ノギスを使って直交方向に 0.1 mm 刻みで 2 回測定して平均値を算出した。樹高については測高棒を使って 1 cm 刻みで測定した。いずれの年も、カリウム (K) 18 g を含有するようにヒノキ個体あたり 1.0 kg の燃焼灰を、根元の斜面上側に長さ 30 cm ほどの半円弧状に撒いた。カリウムの量およ

び散布方法については、塘 (1971) を参考に決定した。面積あたりの灰施用量に換算すると 2.5 Mg ha<sup>-1</sup> ほどとなる。2018 年 3 月 6 日から 7 日には 3 回目のサイズ測定をおこなった。いずれのサイズ測定にあたって、事前に下草刈りをおこなった。2016 年 3 月調査開始時点の個体サイズは、試験区 1 において胸高直径 16.6 ± 4.9 mm、樹高 233 ± 34 cm (平均 ± SD, n = 200)、試験区 2 においてそれぞれ 22.8 ± 7.1 mm、276 ± 44 cm (n = 200) となり、試験区 2 のほうがやや大きかった。

**2.2 燃焼灰の成分と溶出試験**

ここで使用した燃焼灰は、(株) グリーンエネルギー研究所 (高知県宿毛市) のバイオマス発電所においてスギ・ヒノキの間伐材や一般家庭の庭木など木質バイオマスのみを燃やして産出されたもので、その成分は燃料の樹種や幹、枝、および葉の混合比率により変動する。本試験に使用した灰は 2016 年 1 月末に産出されたもので、主灰、リドリング灰、および飛灰の 6 : 1 : 3 での混合物であった。この発電所では燃焼灰をいった

ん水に通して回収する湿式のシステムを採用しているため燃焼灰の重量含水率は26%であり、乾物の成分はカルシウム (CaO) 12%、カリウム (K<sub>2</sub>O) 2.8%、有機炭素 1.9%、マグネシウム (MgO) 1.8%、リン酸 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 0.85%、および窒素 0.01% 未満であった (グリーンエネルギー研究所の依頼による東洋電化テクノロジー調査、2016年2月3日)。調査地の若齢ヒノキ林に施用するまでの期間、燃焼灰はナイロン袋に1kgずつ小分けにして保管された。

施用した燃焼灰から降雨によって溶出する成分の濃度を分析するため、灰から溶出する主要な成分の濃度変化を調べた。この溶出試験にはヒノキ林で施用したものと同一の燃焼灰を使用した。内径6cmのプフナー型ロートにろ紙を敷き、単位面積あたりの量が野外での施用とおおよそ同量となるように14.3gの灰を入れ、20分ごとに5mLの超純水を加えて自然落下により溶出液を回収した。合計50mLの超純水を加えた時点で (試験開始から3時間経過)、吸引をかけて溶出液を回収した。この操作を1日に3回連続して行い、3日間で合計9回、溶出液を採取した。溶出液の一部を使ってpHと電気伝導率 (EC) を測定した。残りの溶出液を0.45 $\mu$ mのメンブレンフィルターでろ過し、適度な濃度に希釈した後、イオンクロマトグラフ法によりNa<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、およびPO<sub>4</sub><sup>3-</sup>の濃度を定量した (ICS-1600-cation/2100-anion, Thermo Fisher Scientific製)。この試験での超純水の添加速度は、5.9 mm h<sup>-1</sup>の降水量に相当する (3時間で17.7 mm)。

### 2.3 統計解析

下刈り時の誤伐で幹が傷んだもの、何らかの理由により根元を大きく掘り返されたもの、および明らかに傾いたものを除いて、プロットあたり42本から49本 (46.1 $\pm$ 2.1本、平均 $\pm$ SD) を解析の対象とした。直径および樹高について、1年目および2年目の年間成長量を算出した。灰施用が樹木の成長におよぼす影響を検討するため、灰施用の回数 (無施用、1年だけ1回の施用、2年連続2回の施用) を固定効果、調査年・ヒノキ個体・プロット・試験区のちがいをランダム傾きおよびランダム切片とする線形混合効果モデルを、直径と樹高のそれぞれの年間成長量にあてはめた。ここで解析の対象としているのは、各個体について1年目と2年目にそれぞれ算出される直径と樹高の年間成長量である。ランダム傾きとランダム切片の両方、あるいはランダム切片だけを含まないモデルを比較して、AICのより小さいモデルを採用した。採用されたモデルについて、灰施用の固定効果を含む場合と含まない場合を比較して尤度比検定をおこない、灰施用の効果について有意性を検討した。統計解析には、R 3.5.0 (R Core Team 2018) および lmerTest 3.0-1 (Kuznetsova

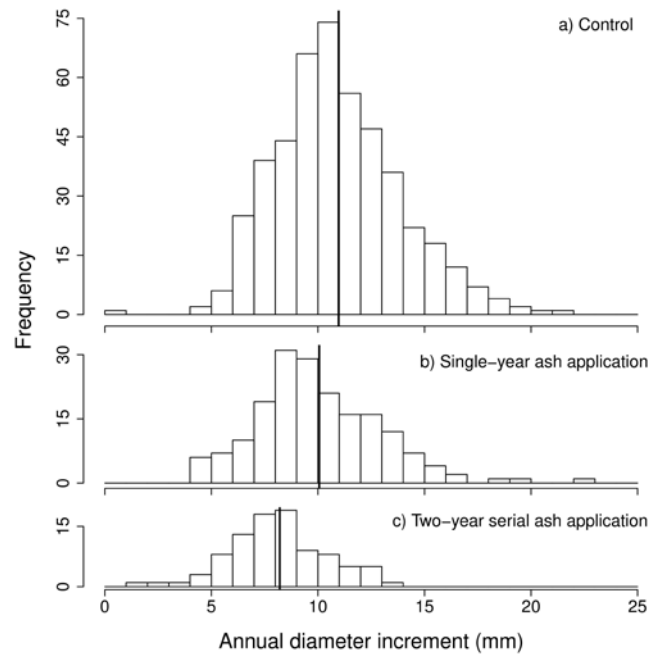
et al. 2017) を使用した。

### 3. 結果と考察

両試験区の結果をあわせて直径および樹高の年間成長量の頻度分布として灰施用の処理ごとに示すと、Fig. 2 および3のようになる。年間直径成長量の平均値は、無処理、1年だけ1回の施用 (以下、1年施用)、および2年連続2回の施用 (以下、2年連続施用) の順に、11.0 $\pm$ 2.9 mm ( $\pm$ SD)、10.1 $\pm$ 3.0 mm、および8.2 $\pm$ 2.3 mm となり、灰施用の回数が増えると成長量が低下した (Fig. 2)。樹高成長についても順に、61 $\pm$ 17 cm、54 $\pm$ 21 cm、および43 $\pm$ 19 cm となり、直径と同様の傾向を示した (Fig. 3)。線形混合効果モデルによる解析では、直径・樹高ともに灰施用を固定効果として、ヒノキ個体・プロット・試験区のちがいをランダム切片とするモデルが採用された。調査年のちがいはランダム効果として組み込まない方がより適切なモデルと判定された。灰施用はヒノキ若齢個体の年間の直径成長量に影響し ( $\chi^2(1) = 20.6, p = 3.3e^{-5}$ )、1年施用および2年連続施用ともに係数が負の値になることが示された (Table 1)。すなわち、全体の平均で10.77 $\pm$ 0.88 mm y<sup>-1</sup>の年間直径成長量が期待されるどころ、1年施用では0.70 $\pm$ 0.20 mm、2年連続施用では1.31 $\pm$ 0.28 mmの成長量低下がおけると示された。同様に樹高について、灰施用は樹高成長量に影響し ( $\chi^2(1) = 34.9, p = 2.7e^{-8}$ )、1年施用および2年連続施用ともに係数が負の値になることが示された (Table 2)。すなわち、全体の平均で62.1 $\pm$ 2.0 cm y<sup>-1</sup>の年間樹高成長量が期待されるどころ、1年施用では10.0 $\pm$ 2.1 cm、2年連続施用では18.1 $\pm$ 3.0 cmの成長量低下がおけると示された。これらの結果から、胸高直径・樹高ともに灰施用が1回だけでも成長量の低下がおり、2年連続して施用した場合には成長がより大きく低下することが示された。

Table 3に溶出試験の結果を示した。溶出液のpHは1回目の溶出から9回目まですべて強いアルカリ性 (平均8.4~9.0、最小8.1、最大9.3) を示した。ECについては、1回目は7.20 $\pm$ 0.77 mS cm<sup>-1</sup> (平均値 $\pm$ SD, n = 5) と非常に高かったが、2回目は0.91 $\pm$ 0.11 mS cm<sup>-1</sup> となり1回目のおよそ7分の1となった。その後、ECの値は下がり続け5回目からは0.3 mS cm<sup>-1</sup>を下回った。1回目の溶出液中、濃度が高かったのはカリウム、硫酸、塩素、ナトリウム、およびカルシウムであり、とくにカリウムと硫酸は1,500 mg L<sup>-1</sup>を、塩素は800 mg L<sup>-1</sup>を超えた。これらの成分の濃度はいずれも、2回目以降には急激に下がった。アンモニウムイオンは検出されなかった。

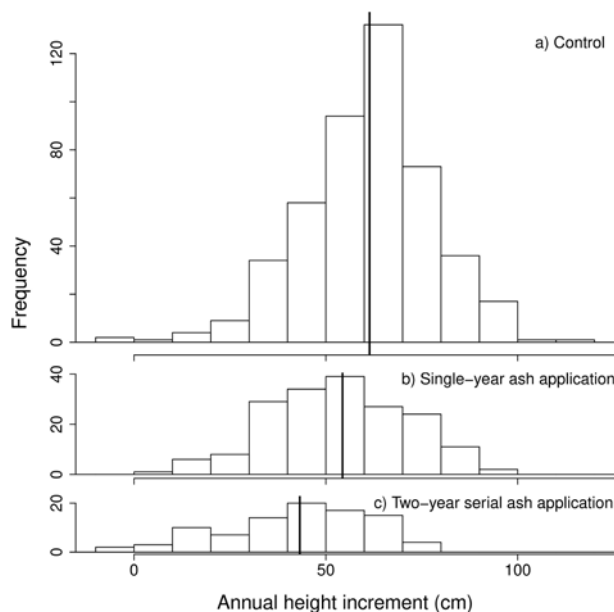
予備試験として、調査地で採取した表層土壌 (0~10 cm) の風乾細土10gに1回目の溶出液の一部10mL (pH 8.9, EC 6.64 mS cm<sup>-1</sup>) を加え5分間の静置後に脱



**Fig. 2.** 若齢ヒノキ個体の年間直径成長量、a) 燃烧灰の無処理、b) 1年施用、およびc) 2年連続施用。縦黒線は平均値を表す。a) はプロット 1-1、1-3、2-1、2-3 の1年目と2年目、および2-2、2-4の1年目、b) はプロット 1-2、1-4 の1年目、および2-2、2-4の2年目、およびc) はプロット 1-2、1-4の2年目のデータからなる。

**Annual diameter increment of young hinoki cypress trees: a) control, b) single-year application, and c) two-year serial application of the combustion ash.**

Vertical bold lines indicate the mean values. Data of a) come from plots 1-1, 1-3, 2-1, and 2-3 in the first and second years, and plots 2-2 and 2-4 in the first year; b) from plots 1-2 and 1-4 in the first year, and plots 2-2 and 2-4 in the second year; and c) from plots 1-2 and 1-4 in the second year.



**Fig. 3.** 若齢ヒノキ個体の年間樹高成長量、a) 燃烧灰の無処理、b) 1年施用、およびc) 2年連続施用。縦黒線は平均値を表す。データの詳細については Fig. 2. を参照。

**Annual height increment of young hinoki cypress trees: a) control, b) single-year application, and c) two-year serial application of the combustion ash.**

Vertical bold lines indicate the mean values. See Fig. 2. for the details of data.

**Table 1.** 燃焼灰施用による若齢ヒノキ個体の年間直径成長量 (mm) に対する影響 — 線形混合効果モデルによる解析結果  
**Effects of the combustion ash application on the annual diameter increment (mm) of young hinoki cypress trees**  
 — results of the linear mixed-effects model analysis

| Fixed effect                | Estimate | Standard error     | df    | <i>t</i> value | <i>P</i>           |
|-----------------------------|----------|--------------------|-------|----------------|--------------------|
| Intercept                   | 10.77    | 0.88               | 2.02  | 12.10          | 6.4e <sup>-3</sup> |
| Single-year application     | -0.70    | 0.20               | 208.8 | -3.51          | 5.0e <sup>-4</sup> |
| Two-year serial application | -1.31    | 0.28               | 208.8 | -4.62          | 6.7e <sup>-6</sup> |
| Random effect               | Variance | Standard deviation |       |                |                    |
| Tree individual (intercept) | 4.52     | 2.13               |       |                |                    |
| Plot (intercept)            | 0.26     | 0.51               |       |                |                    |
| Site (intercept)            | 1.48     | 1.21               |       |                |                    |
| Residual                    | 2.11     | 1.45               |       |                |                    |

Observations, 738; tree individual, 369; plot, 8; site, 2

**Table 2.** 燃焼灰施用による若齢ヒノキ個体の年間樹高成長量 (cm) に対する影響 — 線形混合効果モデルによる解析結果  
**Effects of the combustion ash application on the annual height increment (cm) of young hinoki cypress trees**  
 — results of the linear mixed-effects model analysis

| Fixed effect                | Estimate | Standard error     | df   | <i>t</i> value | <i>P</i>           |
|-----------------------------|----------|--------------------|------|----------------|--------------------|
| Intercept                   | 62.1     | 2.0                | 2.57 | 30.90          | 2.2e <sup>-4</sup> |
| Single-year application     | -10.0    | 2.1                | 69.3 | -4.72          | 1.2e <sup>-5</sup> |
| Two-year serial application | -18.1    | 3.0                | 69.4 | -6.11          | 5.2e <sup>-8</sup> |
| Random effect               | Variance | Standard deviation |      |                |                    |
| Tree individual (intercept) | 34.8     | 5.9                |      |                |                    |
| Plot (intercept)            | 15.5     | 3.9                |      |                |                    |
| Site (intercept)            | 1.9      | 1.4                |      |                |                    |
| Residual                    | 288.7    | 17.0               |      |                |                    |

Observations, 738; tree individual, 369; plot, 8; site, 2

イオン水 15 mL を加えたところ、pH 4.5 となった。同様に、風乾細土に脱イオン水 25 mL だけを加えた場合には pH 4.7 となった。このため燃焼灰溶出液の強アルカリ性が、ヒノキの成長低下に直接に影響した可能性は低いと考えられた。一方、これらの試料に脱イオン水をさらに 25 ml ずつ加えて EC を測定したところ (50 ml の溶液を測定)、溶出液と脱イオン水を加えた試料では 1.17 mS cm<sup>-1</sup>、脱イオン水だけを加えた試料では 0.06 mS cm<sup>-1</sup> であった。このことから、調査地の土壌のよりの EC 値はかなり小さい一方で、燃焼灰溶出液の添加によって EC 値が大きく上昇することが示された。

燃焼灰からの溶出成分は植物が必要とする養分である一方で、塩類イオンの土壌中濃度が高すぎると、根周辺の浸透圧上昇による水吸収の低下や植物体内の塩含有率上昇による生育障害がおこる (六本木 1998)。塩化ナトリウム以外の塩類が木本植物に及ぼす影響についての研究例はほとんどないものの、多年生草本の水耕栽培の例では (*Prunella vulgaris*, シソ科)、低

濃度のカリウムは成長を促進するもの高濃度 (KCl 40 mM, カリウム 1,564 mg L<sup>-1</sup> に相当) では成長が阻害された (Chen et al. 2013)。この濃度は、本試験における 1 回目の溶出液のカリウム濃度 (1,722.9 mg L<sup>-1</sup>) と同等といえる。本調査地の周辺では、2016 年では灰施用の 3 日後の 3 月 18 日に 60 mm 17 h<sup>-1</sup> (17 時間で 60 mm)、2017 年では灰施用の 5 日後の 3 月 20 日から 21 日にかけて 14.5 mm 17 h<sup>-1</sup> の降水があった (中村気象観測所、気象庁 2018)。調査地においても降水によって溶出試験と同じように高濃度の塩類が表層土壌に溶け出し、根系への作用の詳細は不明であるものの、若齢ヒノキの成長量を低下させた可能性がある。

カラマツ苗木にバイオマス燃焼灰を施用し樹木成長への影響がなかったとする報告では (折橋ら 2011, 梅田・玉川 2012)、個体あたりの灰施用量は 10 数 g から 35 g とわずかであるとともに、堆肥と混合するなどの前処理を施した。しかし、燃焼灰を処理する目的で林地に散布するならば、ある程度のまとまった量を撒くことも想定する必要がある。さらには、本試験で

Table 3. 連続的な溶出試験により燃焼灰から溶出されたイオン成分濃度

Ionic component concentration of eluate from the combustion ash from the repetitive leaching test using ultrapure water

|       | Number of times of leaching | pH           | EC                     | Na <sup>+</sup>       | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | K <sup>+</sup>    | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Cl <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> |
|-------|-----------------------------|--------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|       |                             |              | (mS cm <sup>-1</sup> ) | (mg L <sup>-1</sup> ) |                              |                   |                  |                  |                 |                              |                               |                               |
| Day 1 | 1 <sup>st</sup>             | 8.8<br>(0.0) | 7.20<br>(0.77)         | 222.9<br>(17.9)       | nd                           | 1722.9<br>(184.9) | 161.1<br>(15.1)  | 26.9<br>(1.6)    | 885.1<br>(64.3) | 11.4<br>(3.3)                | 1771.5<br>(184.4)             | nd                            |
|       | 2 <sup>nd</sup>             | 9.0<br>(0.2) | 0.91<br>(0.11)         | 23.5<br>(3.6)         | nd                           | 196.5<br>(20.2)   | 17.7<br>(4.7)    | 3.0<br>(0.7)     | 32.4<br>(10.8)  | 0.6<br>(0.2)                 | 221.7<br>(30.3)               | nd                            |
|       | 3 <sup>rd</sup>             | 9.0<br>(0.2) | 0.51<br>(0.10)         | 11.4<br>(1.7)         | nd                           | 102.6<br>(15.8)   | 13.2<br>(3.4)    | 2.3<br>(0.6)     | 8.5<br>(3.9)    | 0.4<br>(0.2)                 | 108.6<br>(28.6)               | 0.1<br>(0.1)                  |
| Day 2 | 4 <sup>th</sup>             | 8.5<br>(0.3) | 0.52<br>(0.06)         | 15.6<br>(1.6)         | nd                           | 107.5<br>(11.1)   | 12.9<br>(2.3)    | 4.3<br>(0.6)     | 15.7<br>(1.7)   | 1.3<br>(0.4)                 | 104.8<br>(21.6)               | 0.2<br>(0.1)                  |
|       | 5 <sup>th</sup>             | 8.6<br>(0.3) | 0.25<br>(0.02)         | 6.4<br>(0.6)          | nd                           | 53.4<br>(5.9)     | 8.5<br>(1.7)     | 2.2<br>(0.3)     | 0.9<br>(0.4)    | 1.9<br>(0.3)                 | 36.7<br>(12.3)                | 0.4<br>(0.1)                  |
|       | 6 <sup>th</sup>             | 8.4<br>(0.4) | 0.19<br>(0.01)         | 3.9<br>(0.4)          | nd                           | 36.2<br>(2.7)     | 7.5<br>(0.8)     | 1.5<br>(0.2)     | 0.5<br>(0.3)    | 1.5<br>(0.3)                 | 18.2<br>(6.6)                 | 0.4<br>(0.2)                  |
| Day 3 | 7 <sup>th</sup>             | 8.5<br>(0.2) | 0.25<br>(0.02)         | 5.0<br>(0.3)          | nd                           | 44.8<br>(2.4)     | 10.8<br>(1.6)    | 2.9<br>(0.2)     | 1.3<br>(0.3)    | 1.2<br>(0.3)                 | 25.3<br>(10.2)                | 0.2<br>(0.2)                  |
|       | 8 <sup>th</sup>             | 8.5<br>(0.3) | 0.17<br>(0.01)         | 2.8<br>(0.1)          | nd                           | 29.2<br>(1.9)     | 8.8<br>(1.0)     | 2.0<br>(0.0)     | 0.3<br>(0.1)    | 1.3<br>(0.3)                 | 12.9<br>(6.0)                 | 0.5<br>(0.2)                  |
|       | 9 <sup>th</sup>             | 8.7<br>(0.3) | 0.15<br>(0.01)         | 2.1<br>(0.1)          | nd                           | 24.2<br>(1.4)     | 8.9<br>(1.5)     | 1.7<br>(0.7)     | 0.2<br>(0.1)    | 1.1<br>(0.3)                 | 10.2<br>(6.7)                 | 0.4<br>(0.2)                  |

nd, 検出されず not detected

括弧内の数字は標準偏差を表す (n = 5)。5 mL の超純水を 20 分ごとにロート内の燃焼灰 (14.3 g) に加え、超純水を 50 mL 注ぐごとに溶出液を回収して分析した。

The numbers in parentheses show standard deviation (n = 5). Ultrapure water (5 mL) was added to the combustion ash (14.3 g) in a Buchner funnel every 20 minutes. A total of 50 mL of ultrapure water was added before each eluate was analyzed.

使用した燃焼灰は発電所内で水に浸けてから回収されているので、その時点で多くの成分が溶出している可能性がある。乾いた状態で回収する方式の発電所から排出される燃焼灰には成分が多量に残っており、なにも処理せずにそのまま林地に施用した場合には本試験より高濃度の塩類が溶出すると予想される。Augusto et al. (2008) では、バイオマス燃焼灰を林地に施用する際には成分がゆっくり溶け出すように前処理（粒状化や固化）をおこなうことを推奨している。バイオマス燃焼灰の林地施用にあたっては、樹木の成長に悪影響を与えないように量や散布方法を慎重に検討するとともに、前処理や灰施用にかかる費用に見合うだけの効果があるか十分に算定する必要がある。

### 謝 辞

(株) 相愛には社有林を調査地として使わせていただいた。(株) グリーンエネルギー研究所からは燃焼灰の提供を受けた。(株) 松竹には試験地の維持にご尽力いただいた。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)」の一部として行われた。

### 引用文献

- Augusto, L., Bakker, M.R. and Meredieu, C. (2008) Wood ash applications to temperate forest ecosystems - Potential benefits and drawbacks. *Plant Soil*, 306, 181-198.
- Brais, S., Bélanger, N. and Guillemette, T. (2015) Wood ash and N fertilization in the Canadian boreal forest: Soil properties and response of jack pine and black spruce. *For Ecol Manage*, 348, 1-14.
- Chen, Y., Yu, M., Zhu, Z., Zhang, L. and Guo, Q. (2013) Optimisation of potassium chloride nutrition for proper growth, physiological development and bioactive component production in *Prunella vulgaris* L. *PLoS One*, 8, 1-7.
- 土じょう部 (1976) 林野土壌の分類 1975. 林業試験場研究報告, 280, 1-28.
- Hannam, K.D., Venier, L., Allen, D., Deschamps, C., Hope, E., Jull, M., Kwiaton, M., McKenney, D., Rutherford, P. M. and Hazlett P. W. (2018) Wood ash as a soil amendment in Canadian forests: what are the barriers to utilization? *Can J For Res*, 48, 442-450.
- 気象庁 (2018) "過去の気象データ検索", <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, (参照 2018

- 年6月10日).
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B. and Christensen R. H. B. (2017) lmerTest package: tests in linear mixed effects models. *J Stat Software*, 82, 1-26.
- 長倉 淳子・小笠 真由美・山田 毅・平井 敬三 (2018) 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. *森林総合研究所研究報告*, 17, 75-84.
- 日本木質バイオマスエネルギー協会 (2018) "木質バイオマスエネルギーデータブック 2018", 25 pp, <https://www.jwba.or.jp/>, (参照 2018 年 6 月 10 日).
- 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—カラマツペレット燃焼灰を用いた検討—. *九大演報*, 92, 13-18.
- Park, B. B., Yanai, R. D., Sahm J. M., Lee, D. K. and Abrahamson, L. P. (2005) Wood ash effects on plant and soil in a willow bioenergy plantation. *Biomass and Bioenergy*, 28, 355-365.
- Pérez-Cruzado, C., Solla-Gullón, F., Merino, A. and Rodríguez-Soalleiro, R. (2011) Analysis of growth and nutrition of a young *Castanea × coudercii* plantation after application of wood-bark ash. *Eur J For Res*, 130, 209-217.
- Pitman, R. M. (2006) Wood ash use in forestry - A review of the environmental impacts. *Forestry*, 79, 563-588.
- R Core Team (2018) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- 六本木 和夫(1998)生理障害. 藤原 俊六郎・安西 哲郎・小川 吉雄・加藤 哲郎編 "新版 土壤肥料用語事典". 農山漁村文化協会, 140-146.
- Solla-Gullón, F., Santalla, M., Rodríguez-Soalleiro, R. J. and Merino, A. (2006) Nutritional status and growth of a young *Pseudotsuga menziesii* plantation in a temperate region after application of wood-bark ash. *For Ecol Manage.*, 237, 312-321.
- 塘 隆男 (1971) 苗畑施肥と林地肥培. 地球出版, 199pp.
- 梅田 久男・玉川 和子 (2012) 木質系燃焼灰の有効利用に関する実証試験. 宮城県林業技術総合センター成果報告, 21, 40-44.

## An application test of combustion ash from a woody biomass power generator to a young hinoki cypress plantation

Tatsuya OTANI <sup>1)\*</sup> and Hisao SAKAI <sup>1)</sup>

### Abstract

We applied combustion ash from a woody biomass power generator to a young hinoki cypress plantation (*Chamaecyparis obtusa*, 1 kg of ash per tree per year) in the southwestern part of Shikoku Island, Japan, and we monitored the annual diameter and height growth for two years. Linear mixed-effects models indicated that the ash application decreased annual increment of stem diameter and tree height, and the two-year serial ash application lowered the annual tree growth more than the single-year ash application. The results of the laboratory leaching test suggested that a high concentration of  $K^+$ ,  $SO_4^{2-}$ , and  $Cl^-$  was leached from the combustion ash during the first rainfall, and the highly concentrated eluate might effect on the growth of the young hinoki cypress. The ash application to conifer plantations should be considered to determine the ash amount that influences tree growth and the use of the scattering technique.

**Key words :** chlorine, growth inhibition, potassium, stem diameter, tree height

---

Received 27 June 2018, Accepted 3 September 2018

1) Shikoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

\* Shikoku Research Center, FFPRI, 2-915 Asakuranishi, Kochi, Kochi, 780-8077 JAPAN; e-mail: tatsuyao@affrc.go.jp