

〈論文〉

国内の木質系バイオマス発電施設における燃焼灰発生量の推計と有効利用用途調査

池 美乃里¹⁾, 川 越 裕 之²⁾, 高 岡 昌 輝¹⁾¹⁾ 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラスター1-3 E-mail:takaoka.masaki.4w@kyoto-u.ac.jp)²⁾ 合同会社CNリサーチ
(〒500-8407 岐阜市高砂町1-17 E-mail:h_kawagoe@cn-research.co.jp)

概 要

木質系バイオマス燃焼灰の発生量と有効利用状況を明らかにすることを目的としてアンケート調査を行った。燃料の灰分は樹皮含有割合や枝葉の有無、生産地域との相関がみられた。実際の灰量は灰分から計算した値の平均2.3倍の灰が発生した。未利用木質区分の施設や階段式ストーカ炉を採用する施設は主灰発生量が多かった。燃焼灰はセメント、コンクリート骨材、路盤材、肥料、土壌改良材、再生土、埋め戻し材、燃料、製鉄原料として利用され、費用は平均15,800円/tで廃棄物として処分するよりも安い傾向があり、多様な活用が見込まれた。

キーワード：燃料種、流動砂、ANOVA、数量化I類、主灰

原稿受付 2024.6.21 原稿受理 2024.9.17

EICA: 29(2・3) 161-169

1. 序 論

気候変動緩和の要求とともに、バイオマス発電の重要性が高まっている。日本では2011年に固定価格買取制度(FIT)が導入され、固形バイオマス燃料として木材やパーム椰子殻(PKS)の消費量が急増している。FIT認定木質バイオマス発電施設74件を対象とした調査によると、2014年時点で43MWであった導入容量が2023年には4,000MW超と、10年間で約100倍に成長した¹⁾。バイオマスの直接燃焼による発電施設は灰を排出し、それらの適切な処理が必要とされる。株式会社森のエネルギー研究所が2017年に行った調査によると、16事業者の分析から木質系バイオマス燃焼灰1tあたりの平均灰処理費用は20,000円であり、灰処理費用が最大の事業者で総発電費用の18%を占めていた²⁾。

木質系バイオマス燃焼灰は肥料³⁾、建設資材⁴⁾、吸着材料⁵⁾、ジオポリマー⁶⁾等へのリサイクルが期待される資源でもある。気候変動や粒子状物質の発生といった環境影響を抑制する上でも、土壌改良材等への燃焼灰の有効利用は効果的である。Costaらは、石灰や加里肥料、リン酸肥料代替として木質系バイオマス燃焼灰を利用するシナリオは、燃焼灰を埋め立てるシナリオと比較して、灰1tあたりの温室効果ガス排出や粒子状物質の排出が小さくなることを示した⁷⁾。燃焼灰を利用することで肥料等の製品の製造過程で出る温室効果ガス排出や粒子状物質の排出を削減できるた

めである。しかしながら、それらの有効利用は木質系バイオマスをエネルギー利用する施設の半数程度にとどまっており⁸⁾、未だ十分とは言えない。またその全国的な利用用途についても現況が把握できない部分が多い。木質系バイオマス燃焼灰有効利用に関するアンケート調査で、国内の事業者より灰の活用条件のひとつとして「安定供給」「まとまった量での供給」が挙げられているが⁹⁾、燃焼灰の発生量を把握することは現状難しい。

木質バイオマス燃料の灰分は燃料の種類によって異なる。発電施設から発生する木質バイオマス灰の量は、燃料の0.5%から12%まで幅広いことが報告されている²⁾。日本の木質系バイオマス専焼発電施設で燃焼される燃料は2023年度に2,600~3,000万tと見積もられ、このうち木質チップ(WC)、木質ペレット(WP)、PKSがそれぞれおよそ3割を占める。国内外の文献を調査した結果、灰分は樹皮材(B)、PKS、枝葉材(BR)、廃木材(WW)、WC、WPの順で多い¹⁰⁾。広葉樹と比べて針葉樹は灰分が少ないと報告されている¹¹⁾。同じ木材でも部位により灰分が異なり、樹皮の灰分は心材や辺材より10倍多い¹²⁾。

実際の燃焼灰発生量は、燃料の灰分の他にも様々な因子の影響を受けることが指摘されている。折橋らは、北海道の事業者に対して調査を行い、木質系バイオマスの灰を参照した計算上の灰発生量と比べ、アンケート調査に基づく推計量は1.5倍程度大きいことを示している¹³⁾。著者らは流動層炉における流動砂の使用や、

未燃炭素の残留等は燃焼灰発生量を増加させる要因となることを同様にアンケート調査から指摘している¹⁴⁾。Feuerborn は発生する灰の量には、木材の種類、樹皮、枝葉の量、燃焼技術が重要であると述べ、2016 年のドイツの木質バイオマス灰は 105 万 t で、そのうち廃木材灰が 65 万 t を占めると推定している¹⁵⁾。Du らは、いくつかのバイオマスサンプルを実験室で燃焼させて、バイオマスの燃焼温度の上昇に伴い、成分の分解と揮発によって灰の量が少なくなることを明らかにした¹⁶⁾。Jenkins らも、バイオマス試料の燃焼温度を 575℃ から 1,000℃ まで変化させる実験で、2 時間の燃焼により得られる灰の値は温度上昇に伴い、最も差の大きいもので 0.63 倍まで減少すると報告した¹⁷⁾。燃焼灰発生量の評価は重要であるが、上記のパラメータと木質系バイオマスの灰分との具体的な相関は未だ明らかにされておらず、燃焼灰発生量の予測を困難にしている。燃焼灰の有効利用を進めるうえで、燃焼灰の発生状況や有効利用の現況を把握することは非常に重要であるにもかかわらず、これらに関する実態調査の報告例は限られている。

本研究では、木質系バイオマス燃焼灰の発生量と有効利用状況を明らかにし、有効利用のさらなる促進に資することを目的として、発電施設を対象としたアンケート調査を行った。アンケートの結果から樹種、樹皮含有量、枝葉の有無、生産地域が WC の灰分に及ぼす影響を評価するとともに、灰発生量を左右するその他の因子について考察し、より正確に燃焼灰発生量を予測するための知見を提供する。また、木質系バイオマス燃焼灰有効利用の現況を知るため、有効利用の有無、その用途について調べた。さらに有効利用の障壁となりうる要因として費用に着目し、埋め立て処理や各用途への有効利用にかかるコストを比較した。

2. 方 法

2.1 アンケート調査

本研究では、2022 年 3 月時点で日本国内にある FIT 認定を受けたバイオマス発電施設¹⁸⁾ 220 件（総発電容量 5,509 MW、発電端）を調査対象とした。これらは木質バイオマス燃料である木材や PKS を主燃料とする発電施設である。対象となる 220 の発電施設には、現在計画中で 2026 年までに運転を開始するものも含まれている。2022 年 3 月時点で稼働中の施設は 186 施設、4,731 MW（発電端）である。2020 年～2022 年にアンケート調査を実施し、105 カ所から回答を得た。アンケート実施時点で 81 施設は稼働中、24 施設は計画中であった。稼働中施設については燃料使用量、燃料種、燃料の灰分、炉の種類、灰の発生量、灰の有効利用用途などを尋ねた。一部施設では炭化物

が熱分解残渣として発生していたが、本論文では便宜上これらの熱分解残渣も「灰」として発生量を調査した。また燃料については、樹種、樹皮含有割合、枝葉の有無、生産地域を併せて尋ねた。計画中の施設に関しては、実際に用いる燃料の灰分や灰の発生量等は不明であるが、炉形式や燃焼温度計画値、燃料種や燃料使用量の計画を尋ねた。

2.2 統計解析

本研究の統計解析には JMP[®] 17 を用いた。木質チップの灰分に及ぼす影響因子の評価のため、分散分析（ANOVA）と数量化 I 類を伴う最小二乗法による重回帰分析を行った。パラメータは強制投入法により、樹種、樹皮含有割合、枝葉の有無、生産地域を考慮した。樹種についてはアンケートの結果から、スギ、ナラ、マツ、広葉樹混合、針葉樹混合、区別なし（MIX）の 6 種類に分類した。生産地域は都道府県ごととし、FIT 施設リスト¹⁸⁾の都道府県番号（01. 北海道～47. 沖縄県）を用いた。特に生産地域の回答のない場合発電施設の立地する都道府県とし、海外由来の WC は除外した。

灰分当たりの燃焼灰発生量についても、数量化 I 類を伴う最小二乗法による重回帰分析を行った。パラメータは強制投入法により、区分（一般木質・農作物残渣または未利用木質）、燃焼温度、発電施設の緯度、炉形式（気泡流動層ボイラ；BFB、循環流動層ボイラ；CFB、ガス化発電設備；G、階段式ストロカ炉；SS、トラベリングストロカ炉；TS）を考慮した。区分については FIT 施設リスト¹⁸⁾を参照した。未利用木質とは、林野庁「発電利用に供する木質バイオマスの証明のためのガイドライン」において「森林における立木竹の伐採又は間伐により発生する未利用の木質バイオマス（輸入されたものを除く）」とされるもので、「間伐材等由来の木質バイオマス」とも呼ばれる。一般木質バイオマスは、前述した未利用木質及び建設資材廃棄物以外の木質バイオマスであると定義され、製材残材やその他由来の証明が可能な木材を指す¹⁹⁾。燃料種についてはパラメータに含めなかった。燃料種ごとに灰分は大きく異なり¹⁰⁾、燃料種は灰発生量に影響すると考えられるが、目的変数を灰分計算値あたりの実際の灰発生量とすることで、改めて説明変数に追加せずとも既にその影響は考慮されていると判断した。

3. 結果と考察

3.1 アンケート調査結果

アンケートの対象となった 220 施設のうち、36 施設は BFB、90 施設は CFB、24 施設は G、14 施設は SS、27 施設は TS を採用していた。29 施設の炉形式

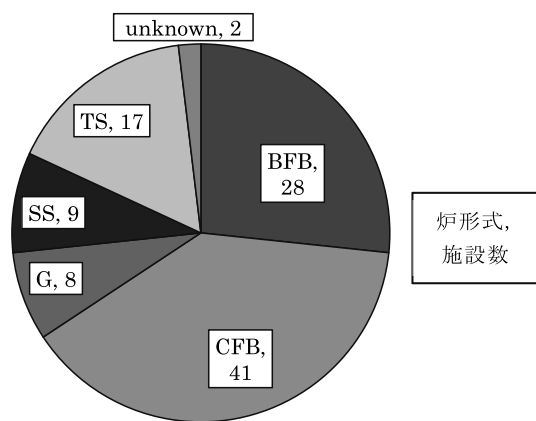


Fig. 1 Furnace type of questionnaire respondents

は不明であった。回答した105施設の炉形式をFig. 1に示す。対象とした220施設と同様、4割程度をCFBが占め、次いでBFBが多かった。欧州の木質系バイオマス発電施設ではストーカ炉が主流であるが^{20,21)}、日本は炉形式の内訳において大きく異なる傾向が見られた。灰の回収方式（バグフィルター、電気集じん機、その他）については74施設が回答し、そのうち68施設はバグフィルターを採用していた。電気集じん機とその他を回答した施設はそれぞれ3施設であった。発電容量（発電端）はアンケートに回答した105施設の合計が1,984 MWで、220件全体（5,509 MW）のおよそ36%にあたった。燃料使用量を回答した施設は103件ありその総量は年間1,184万t-wetであった。アンケート実施時点（2022年3月）で103件のうち79施設は稼働中、24施設は計画中であり、1,184万t-wetのうち稼働中79施設の総燃料使用量は789万t-wetであった。WC, WP, PKS, B, BR, WWを燃焼している施設はそれぞれ86, 21, 34, 8, 6, 19件で、50施設は複数種類の燃料を混焼していた。日本木質バイオマスエネルギー協会による2022年度の燃料需給調査では、82発電施設で540万tの燃料が調達されたと報告されている¹⁾。この値は乾燥重量が用いられており、本研究におけるアンケートでの燃料含水率（309データ）平均値36.3%-wetを仮定すると、82発電施設で848万t-wet程度の燃料が調達されたことになり、本研究のアンケート結果と概ね一致した。アンケートに回答しなかった施設も含めると、2022年度に合計容量4,731 MWの発電で使用された燃料はおおよそ2,800万t-wetと推計される。燃焼温度は48施設が回答し、680–1,250℃であった。平均値は841℃で、ANOVAの結果BFB（データ数20）、CFB（16）、G（4）、SS（2）、TS（10）の燃焼温度平均値はそれぞれ849℃（95%信頼区間817–880℃）、818℃（783–853℃）、844℃（773–914℃）、845℃（746–944℃）、785℃（740–829℃）で、炉形式による燃焼温度の有意な差は見られなかった。

3.2 燃料の灰分

アンケートで回答のあった各燃料種の灰分（%-dry）を累積分布でFig. 2に示す。灰分の回答数はWC:127, WP:10, PKS:26, B:12, BR:2, WW:17であった。各施設は異なる種類の燃料を混焼している場合があり、複数の燃料について回答しており、施設数とは一致しない。算術平均値で比較するとWP（0.85%-dry）<WC（1.5%-dry）<PKS（2.5%-dry）<WW（3.2%-dry）<B（4.2%-dry）であった。BR（平均1.3%-dry）についてはデータ数が非常に小さいため、平均値の議論からは除外する。樹皮材の灰分が多いことはTsuchiyaらの先行研究においても指摘されている¹³⁾。灰分の正規Q-Qプロットと対数正規Q-Qプロットの線形性を比較したところ、WC, WP, PKS, B, WWの R^2 値は正規分布について0.74, 0.97, 0.95, 0.92, 0.92、対数正規分布について0.97, 0.94, 0.97, 0.96, 0.94であった。WC, PKS, B, WWは対数正規Q-Qプロットの方がより良好な線形性を示し、データ数が比較的小さいWP, BRを除く燃料種では灰分分布が正規分布よりも対数正規分布に近いことを示唆した。灰分が対数正規分布に従う傾向は文献値の分布と一致している⁹⁾。灰分が対数正規分布に倣う傾向は下水汚泥の固形分²²⁾でも報告されている。灰分の対数平均値はWP（0.86%-dry）<WC（1.0%-dry）<PKS（2.8%-dry）<B（3.0%-dry）<WW（3.4%-dry）であった。ANOVAの結果、灰分対数平均値の95%信頼区間はWC:0.85–1.2%-dry, WP:0.46–1.6%-dry, PKS:1.9–4.2%-dry, B:1.7–5.3%-dry, BR:0.24–4.1%-dry, WW:2.1–5.5%-dryであった。TurkeyのHSD検定で多重比較すると、BとWC（ $p=0.0100$ ）、PKSとWC（ $p=0.0001$ ）、PKSとWP（ $p=0.0343$ ）、WWとWC（ $p=0.0002$ ）、WWとWP（ $p=0.0160$ ）の灰分対数平均値にはそれぞれ有意な差があるといえる。PKSは主にインドネシア、マレーシアから輸入される農業残渣であるが、ANOVAの結果その原産地による灰分の平均値に有意な差は無かった。インドネシア産（5データ）、マレーシア産（6データ）のPKSの灰分対数平均値（95%信頼区間）はそれぞれ2.5%-dry（1.9–3.4%-dry）、2.6%-dry（2.0–3.4%-dry）で、2か国の混合を用いている場合（6データ）は2.7%-dry（2.1–3.5%-dry）であった。

このうち、最もデータ数が多く広い範囲に値が分布しているWCについて、樹種、樹皮含有割合、枝葉の有無、生産地域が灰分に及ぼす影響を調べた。発電施設で用いられるWCには、樹幹部だけでなく樹皮や枝葉が部分的に含まれる場合がある。樹皮含有割合（回答数40）と灰分の間には有意な正の相関がみられた（ $p=0.0477$ ）。生産地域と灰分の関係について、原産地の都道府県番号と灰分の間には弱い負の相関がみ

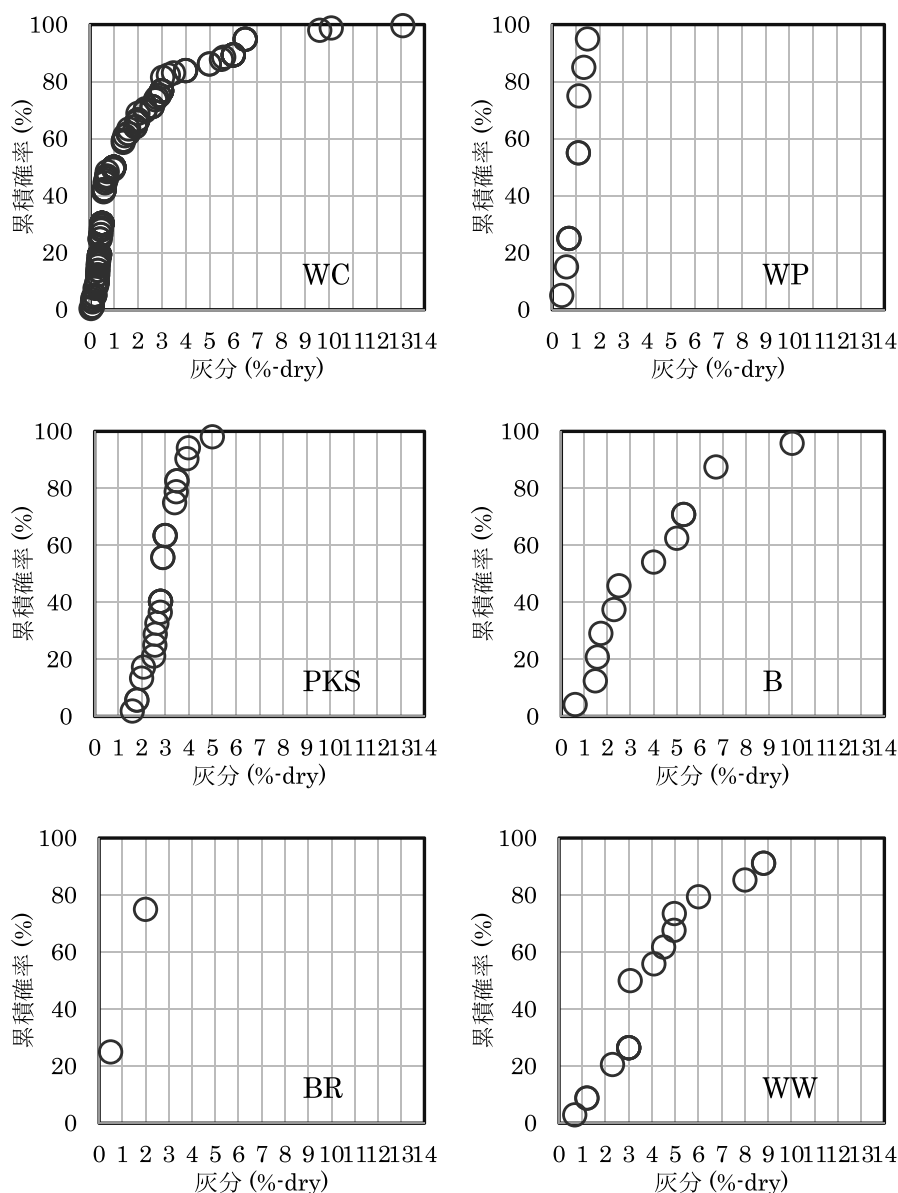


Fig. 2 Distribution of ash content in woody biomass fuel

られた。植物中の灰分は水分の吸い上げ量の影響を大きく受けることが知られており、寒冷地域の植物はより多くの水分を吸い上げるため灰分がより多くなることが予想される²³⁾。北部の地域ほど WC の灰分が多くなる傾向があるので、南部の都道府県であるほど大きな値となる都道府県番号と負の相関を成したと考えられるが、相関は有意な値ではなかった ($p=0.1207$)。また Turkey の HSD 検定の結果枝葉を含む WC と枝葉を含まない WC の灰分対数平均値の間には有意な差があることが分かった ($p<0.0001$)。ANOVA の結果枝葉有 (データ数 33) の灰分対数平均値は 2.6%-dry (95% 信頼区間で 1.8-3.7%-dry)、枝葉無 (データ数 40) の灰分対数平均値は 0.83%-dry (95% 信頼区間で 0.59-1.2%-dry) であった。先行研究においても、樹幹部に比べ葉は著しく灰分が多いことが指摘されている²⁴⁾。澤井らによると果樹剪定枝の灰分は枝の平均直径の累乗関数で表すことができ、細い枝で

あるほど樹幹部に比べ樹皮含有割合が増大するため灰分が多くなる²⁵⁾。本研究における BR の灰分が平均 1.3%-dry、対数平均 1.0%-dry と少なかったのは、データ数が 2 と小さかったためであると考えられる。スギ、ナラ、マツ、針葉樹混合、広葉樹混合、MIX の灰分データ数はそれぞれ 23, 7, 8, 58, 4, 14 で、広葉樹より針葉樹の WC の方が多く利用されていた。各樹種の灰分対数平均値 (95% 信頼区間) は 0.86%-dry (0.53-1.4%-dry), 1%-dry (0.42-2.4%-dry), 0.35%-dry (0.15-0.79%-dry), 1.0%-dry (0.77-1.4%-dry), 1.7%-dry (0.54-5.5%-dry), 2.0%-dry (1.1-3.7%-dry) で、マツと MIX の間にのみ有意な差が見られた。先行研究では、針葉樹が広葉樹と比べて灰分が少ないと報告されているが¹²⁾、その差は大きくないと考えられる。Zhai らも、針葉樹と広葉樹の灰分平均値がそれぞれ 1.0% と 1.6% であるとした上で、統計的解析の結果両者に有意な差は無いと結論づけてい

Table 1 Results of multiple regression analysis for ash content in WC

項	推定値	標準誤差	t 値	p 値 (Prob> t)
切 片	3.7069307	1.102082	3.36	0.0022
原産地	-0.074416	0.030158	-2.47	0.02
樹皮含有割合	0.0284144	0.032539	0.87	0.39
樹種 [スギ]	0.0347011	0.825911	0.04	0.9668
樹種 [ナラ]	-0.860334	1.081874	-0.8	0.4332
樹種 [マツ]	-2.328741	2.008468	-1.16	0.2561
樹種 [MIX]	0.9131709	1.270973	0.72	0.4784
樹種 [広葉樹]	1.1710981	2.063822	0.57	0.5749
樹種 [針葉樹]	1.070104	0.789699	1.36	0.1862
枝葉の有無 [無]	-0.503303	0.42116	-1.2	0.2421
枝葉の有無 [有]	0.5033029	0.42116	1.2	0.2421

N=128, $R^2=0.34$, 自由度調整 $R^2=0.15$, $p=0.1234$

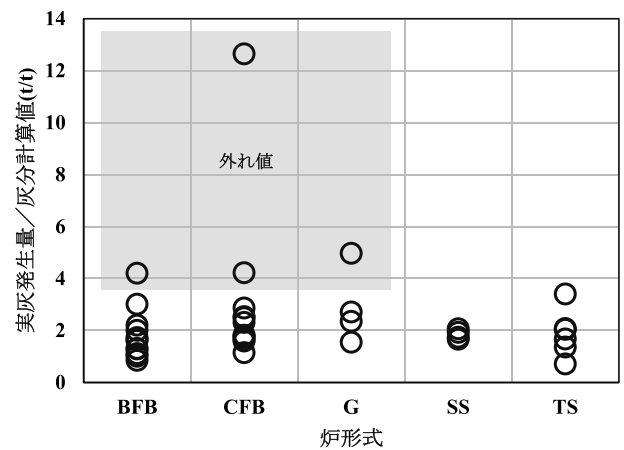
る²⁶⁾。中川と松村の報告では、針葉樹と広葉樹の灰分は心材ではほぼ同じ1%前後、葉については針葉樹の方がやや小さい値であった²⁴⁾。

WCの灰分を目的変数とする数量化I類を伴う重回帰分析の結果、**Table 1**の結果を得た。データ数128、回帰式による予測値と実測値の R^2 は0.34、自由度調整 R^2 は0.15であった。帰無仮説のp値は0.1234であった。このモデルにより灰分の多少を説明することは困難であるといえる。上記で灰分と有意な正の相関があると判断された樹皮含有割合、枝葉の有無について、推定値の正負は重回帰分析においても一致するものの、帰無仮説のp値は有意さを示す値とはならなかった。反対に、原産地の都道府県番号については灰分に対する有意な負の影響を示した。樹皮含有割合、枝葉の有無については、いずれも灰分との有意な単相関を示すが、この2パラメータ間にも相関があるため、重回帰分析においては効果が打ち消しあったものと考えられる。樹皮含有割合をパラメータから外して再度分析を行ったところ、枝葉の有無は灰分に対し有意な正の影響が見られた($p=0.0004$)。

3.3 燃焼灰発生量

アンケートに回答した105施設のうち、2022年3月までに運転を開始している施設は81施設、計画中の施設は24施設であった。稼働中の81施設のうち、燃焼灰発生量を回答した施設は74施設で、年間灰発生量は合計23.6万t-wetであった。このうち主灰は8.2万t-wet、飛灰及び混合灰は15.4万t-wetであった。回答した74施設の総発電容量(発電端)は1,075MWで、2022年3月までに稼働している186施設(総発電容量4,731MW)で2021年度に発生した木質系バイオマス燃焼灰は104万t-wetと推計される。220施設(総発電容量5,509MW)全てが稼働すると、単純計算で年間121万t-wetもの燃焼灰が発生する可能性がある。

燃料使用量と灰分から計算上の灰発生量を求めたところ(38データ)、必ずしもその値は実際の燃焼灰発

**Fig. 3** Actual discharged ash amount per calculated ash amount**Table 2** Results of multiple regression analysis for BA discharge per calculated ash amount

項	推定値	標準誤差	t 値	p 値 (Prob> t)
切 片	3.24	2.65	1.22	0.256
区分 [一般木質・農作物残渣]	-0.899	0.191	-4.71	0.0015
区分 [未利用木質]	0.899	0.191	4.71	0.0015
燃焼温度	-0.00285	0.00223	-1.28	0.237
緯 度	0.00789	0.0575	0.14	0.894
炉形式 [BFB]	-1.56	0.296	-5.27	0.0008
炉形式 [CFB]	0.601	0.305	1.97	0.0841
炉形式 [SS]	1.05	0.410	2.56	0.0334
炉形式 [TS]	-0.0907	0.27	-0.33	0.753

N=28, $R^2=0.81$, 自由度調整 $R^2=0.67$, $p=0.0143$

生量と一致しなかった。**Fig. 3**に燃焼炉形式ごとの灰分計算値に対する実灰発生量の比を示す。実際の燃焼灰発生量は灰分計算値の0.72~13倍であった。外れ値(四分位法により検定)を除いても0.72~3.4倍、平均2.3倍と幅がある。この理由として、燃料の灰分分析に用いられた燃焼温度と実際の燃焼炉の燃焼温度が異なる可能性、砂礫や建築廃材由来の夾雑物が混入した可能性、未燃分が燃焼灰中に残っている可能性、灰分計算値は乾燥重量であるのに対し実際の発生量は湿潤ベースで計量される点等が考えられる。燃焼灰利用の手引きの一例では、燃焼灰の発生量はWP・おが粉について0.5%-wet、WCについて0.34%-wetを掛けて見積もるものとしている²⁷⁾。これらの値は燃料の灰分の目安を示すものであるが、実際にはその2倍以上の燃焼灰が発生することが予想される。

燃焼灰発生量に影響を及ぼす因子を調べるため、数量化I類を伴う最小二乗法による重回帰分析を行った。解析は**Fig. 3**に示す4つの外れ値を除外して行った。区分、燃焼温度、発電施設の緯度、炉形式のいずれも、実灰発生量/灰分計算値に有意な影響が見られなかった。これは実灰発生量を飛灰発生量に限定しても同様であったが、主灰発生量についてはその限りでない。目的変数を主灰発生量/灰分計算値とした重回帰分析の結果を**Table 2**に示す。データ数28、回帰式によ

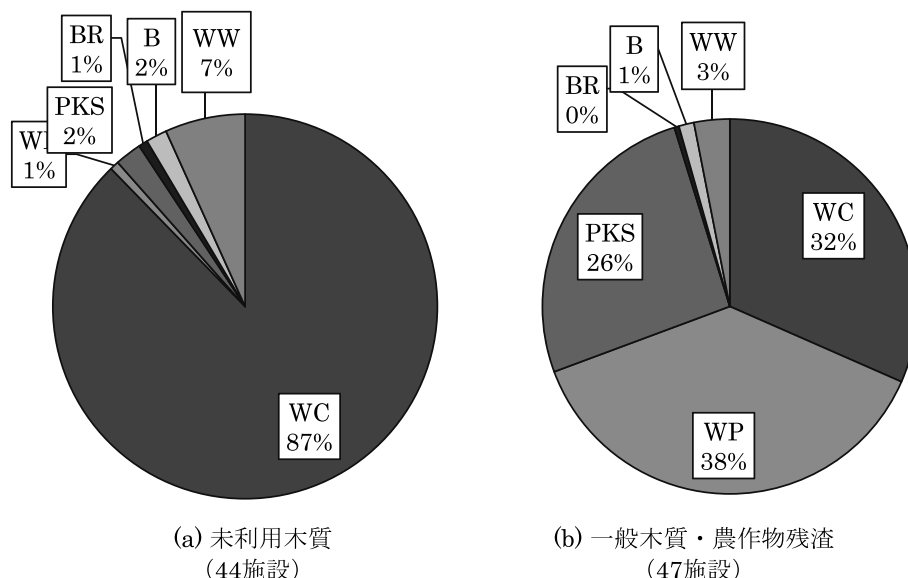


Fig. 4 Breakdown of fuel types consumed

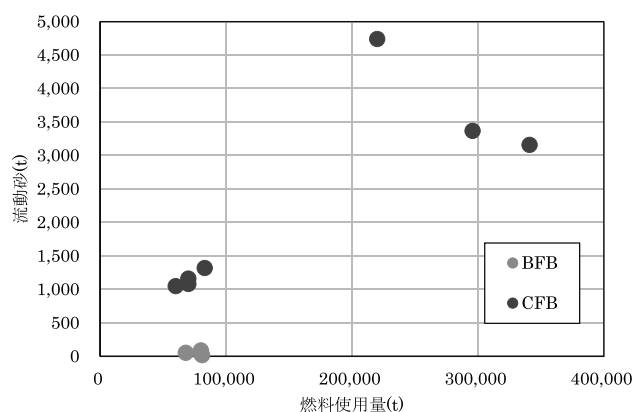


Fig. 5 Fluidized bed sand consumption

る予測値と実測値の R^2 は 0.81, 自由度調整 R^2 は 0.67, 帰無仮説の p 値は 0.0143 であった。未利用木質燃料を用いる施設 (15 データ) は主灰発生量に対し有意な正の影響, 一般木質・農作物残渣を燃焼する施設 (10 データ) は有意な負の影響を示した。Fig. 4(a), (b) に, 未利用木質区分, 一般木質・農作物残渣区分で使用される燃料の内訳を示す。未利用木質資源は間伐材等由来の木質バイオマスであり, 枝条や樹皮など林業・製材事業活動に伴い発生し従来有効活用されていなかった資源が含まれている。枝条や樹皮などは砂や石などの異物が混入し易く, また樹幹部に比べ灰分が多くなることから燃焼灰の発生量も多くなる²⁸⁾。一方, 一般木質・農作物残渣区分の施設では燃料として間伐材等由来のものではなく, PKS や輸入 WP 等が用いられる。炉形式 BFB は他の炉形式に比べ主灰発生量が有意に少なく, SS は主灰発生量が有意に多い。炉形式のうち G はデータ数が少なく, 結果から除外した。ストーカ炉の燃焼灰発生量に占める主灰の割合は流動層炉と比較して大きく, 都市ごみ焼却施設の例では焼却残渣発生量の 69.1~92.6% を占める²⁹⁾。バイ

オマス燃焼の例では, 主灰の割合は BFB で 17%³⁰⁾, TS で 75%²⁸⁾ の報告がある。流動層炉は炉内の流動媒体を押込空気により攪拌し, 燃料を浮遊燃焼させるため飛灰が多くなる。一方で炉の下部で不燃物が分離されるが, 一部は流動媒体移行し炉内に戻されるため主灰が少なくなる³¹⁾。また BFB は CFB と比べても主灰発生量が少なく, これは流動砂投入量の違いによるものであると考えられる。Fig. 5 に示すように, BFB での燃料当たりの流動砂投入量は CFB と比べて圧倒的に少なかった。

3.4 燃焼灰有効利用用途

木質系バイオマス燃焼灰の有効利用用途としては, セメント原料や肥料原料等が挙げられる。木質系バイオマス燃焼灰は石炭フライアッシュと比較し粒度が大きく, K_2O を多量に含む³²⁾。そのため燃焼灰をセメント原料として利用する際, アルカリシリカ反応によるコンクリートの異常膨張やひび割れを引き起こすリスクが高くなる³³⁾。都市ごみ焼却灰のセメント原料利用においても受け入れの基準として K_2O 含有量 2% 未満が提案されており³⁴⁾, 木質系バイオマス燃焼灰のセメント原料利用には量的制限があると考えられる。一方肥料原料としては木質系バイオマス燃焼灰の高い K_2O 含有量が利点となるが, Cr, Ni, As, Cd, Pb, Hg といった重金属含有量が障壁となり, 廃木材を含む燃焼灰などがこれを理由に利用できない場合もある^{3,35)}。近年ではその他にジオポリマー⁶⁾, 二酸化炭素固定化材料³⁶⁾といった新たな用途への木質系バイオマス燃焼灰利用についても研究が進められている。

アンケートに回答した施設のうち燃焼灰を有効利用している施設は 42 件で, 廃棄物として処理している施設は 50 件であった。このうち 17 件は燃焼灰の有効

利用と廃棄物としての処理を併用していた。有効利用を行っている施設の割合は併用も含め 56% であり、北海道における先行研究の結果 (80%)¹³⁾ と比較し低い。複数回答可能で木質系バイオマス燃焼灰の有効利用用途を尋ねたところ、燃焼灰はセメント原料・コンクリート骨材 (14 件)、路盤材 (8 件)、肥料原料・土壌改良材 (8 件)、再生土・埋め戻し材 (5 件)、燃料 (1 件)、製鉄原料 (1 件) として有効利用されていた。燃料、製鉄原料として利用されていたのはいずれもガス化発電施設の残渣であり、それらは他の炉形式の燃焼灰と比較して圧倒的に多量の未燃炭素を含有するため、発熱量が高い³⁷⁾。ジオポリマー等、その他の用途への有効利用は確認できなかった。林野庁による調査において、木質バイオマスエネルギー利用事業所 1,342 件中、燃焼灰を産業廃棄物として処理をしている事業所は 732 件であった。農業 (肥料等) 利用を行っている事業所は 326 件、農業用以外への利用が 87 件、保管中が 130 件、その他が 67 件である⁸⁾。これらの事業所には FIT による発電業だけでなく製造業、農業、宿泊業等の業種が含まれている。本研究のアンケート結果から、発電事業においては、比較的農業分野への有効利用の割合が他業種より小さいことが分かる。林野庁による調査においても、電気・ガス・熱供給・水道業の 154 事業所中農業利用は 6 件、それ以外への利用が 11 件であった⁸⁾。

3.5 燃焼灰処理費用

燃焼灰の有効利用・廃棄にかかる費用について回答した施設は 50 件あり、合計年間燃焼灰発生量 15.9 万 t-wet に対しその総額は 26.4 億円であった。2022 年 3 月までに稼働している 186 施設で年間 104 万 t-wet の燃焼灰が発生するとその有効利用・処理費用の総額は単純計算で 173 億円と推定される。本研究の調査対象となった木質系バイオマス専焼発電施設 220 件が全て稼働すると、燃焼灰 121 万 t-wet の処理費用の総額は単純計算で 201 億円に上ることが予想される。燃焼灰の処理を廃棄物処理業者に委託している施設は 43 件あり、その委託費用は燃焼灰 1 t あたり平均 21,000 円であった。また、燃焼灰を廃棄物として埋め立て処理している施設は 15 件あり、その処理費用は 1 t あたり平均 20,500 円と、業者委託する場合と同程度であった。この結果は先行研究の調査結果と一致する²⁾。燃焼灰を有効利用している施設について、その加工や業者への委託費用は燃焼灰 1 t あたり平均 15,800 円であった。用途ごとの灰 1 t あたりの有効利用コストを **Fig. 6** に示す。ANOVA の結果、用途ごとの平均リサイクルコスト間に有意な差異は無かった。灰のリサイクルのコストは、灰を廃棄物として処分するよりも安い傾向がある。さらに、燃焼灰 (ガス化残

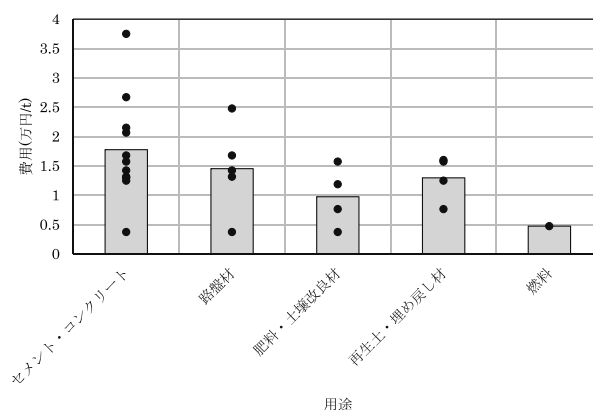


Fig. 6 Cost for recycling woody biomass ash

渣) を製鉄原料として有効利用しているある発電施設では、1 t あたり 4,000 円で有価販売していた。有効利用を行う施設数が廃棄物として処理する施設数を下回った理由は、経済的負担ではなく、木質バイオマス燃焼灰を原料として受け入れるリサイクル施設の能力や立地など、他の要因にあるのかもしれない。

4. 結 論

本研究では、燃焼灰の発生量と有効利用状況を明らかにし、木質系バイオマス燃焼灰の有効利用のさらなる促進に資することを目的として、木質系バイオマス発電施設を対象としたアンケート調査を行った。燃料の灰分にあらずパラメータを評価するとともに、灰発生量を左右するその他の因子について考察した。また、木質系バイオマス燃焼灰の有効利用用途、委託費用について調べた。

ANOVA の結果、B と WC、B と WP、PKS と WC、PKS と WC、PKS と WP、WW と WC、WW と WP の灰分対数平均値にはそれぞれ有意な差がみられた。樹皮含有割合と WC の灰分の間には有意な正の相関がみられ、WC の原産地都道府県番号と灰分の間には弱い負の相関がみられた。また、枝葉を含む WC と枝葉を含まない WC の灰分対数平均値の間にも有意差がある。

実際の燃焼灰発生量は外れ値を除いて灰分計算値の 0.72~3.4 倍であった。数量化 I 類を伴う重回帰分析の結果、灰分計算値あたりの実際の主灰発生量の値は区分、炉形式により有意な影響を受けることが分かった。燃料が未利用木質である施設は主灰発生量に対し有意に正の影響を、一般木質・農作物残渣の施設は有意に負の影響を示した。炉形式 BFB は主灰発生量に対し有意な負の影響を及ぼし、SS は有意な正の影響を及ぼす。BFB での燃料当たりの流動砂投入量は CFB と比べて圧倒的に少ない。

アンケートに回答した施設のうち 42 施設は燃焼灰

を有効利用, 50 施設は廃棄物として処理していた。燃焼灰の有効利用の普及には地域差があると考えられる。燃焼灰はセメント原料・コンクリート骨材, 路盤材, 肥料原料・土壌改良材, 再生土・埋め戻し材, 燃料, 製鉄原料として有効利用されている。廃棄物として処理する場合, 燃焼灰 1 t あたりの業者委託費用は平均 21,000 円, 埋め立て処理費用は 1 t あたり平均 20,500 であった。燃焼灰の有効利用費用は 1 t あたり平均 15,800 円で, 燃焼灰を廃棄物として処分するよりも有効利用する方が安い傾向がある。有効利用の障壁となる要因は経済的な事由でない可能性がある。

今後, 木質バイオマス燃焼灰の有効利用を促進するためには, 規制や需要, 燃焼灰を受け入れるリサイクル施設の能力や立地など, コスト以外の要因について明らかにする必要がある。

謝 辞

本研究は, 環境研究総合推進費 (JPAEERF2021 3G03) の助成により遂行されたものです。アンケートにご協力いただいた株式会社 TAKUMA および木質系バイオマス発電施設の皆様に心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本木質バイオマスエネルギー協会: 国産燃料材の需給動向 (2023 年度第 4 四半期速報値), [https://jwba.or.jp/wp/wp-content/uploads/2024/06/【20240618】R5_国産燃料材需給動向調査第4Q\(公表版\)\(2024.06.18 accessed\)](https://jwba.or.jp/wp/wp-content/uploads/2024/06/【20240618】R5_国産燃料材需給動向調査第4Q(公表版)(2024.06.18 accessed))
- 2) 森のエネルギー研究所: 平成 29 年度木質バイオマス利用支援体制構築事業のうち発電・熱電併給等推進のための調査報告書, https://www.mori-energy.jp/wp2/wp-content/uploads/2018/07/2017maff_chp_report.pdf (2018) (2024.06.13 accessed)
- 3) 前田典生: 木質バイオマスボイラ燃焼灰の有効利用法の開発, 広島大学博士論文 (2018)
- 4) K. Rahman, N. Sudharshan, J. Maslina and H. Roszilah: Utilization of wood waste ash in construction technology: A review, *Construction and Building Materials* Vol. 237 (2020)
- 5) P. Pengthamkeerati, T. Satapanajaru and O. Singchan: Sorption of reactive dye from aqueous solution on biomass fly ash, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 153, pp. 1149–1156 (2008)
- 6) L. Silvestro, T. P. Scolaro, A. S. Ruviaro, G. T. dos S. Lima, P. J. Gleize and F. Pelisser: Use of biomass wood ash to produce sustainable geopolymers. *Construction and Building Materials*, Vol. 370, p. 130641 (2023)
- 7) T. P. da Costa, P. Quinteiro, L. A. C. Tarelho, L. Arroja and A. C. Dias: Life cycle assessment of woody biomass ash for soil amelioration, *Waste Management*, Vol. 101, pp. 126–140 (2020)
- 8) 農林水産省: 令和 4 年木質バイオマスエネルギー利用動向調査, <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&id=000001425982> (2024) (2024.06.13 accessed)
- 9) 折橋 健, 原田 陽, 西宮耕栄: 北海道における木質バイオマス燃焼灰のリサイクルの可能性, *林産試験場報*, Vol. 551, pp. 5–8 (2024)
- 10) 池 美乃里, 大下和徹, 高岡昌輝: 国内の FIT 認定木質バイオマス発電施設における燃焼灰発生量推計, 廃棄物資源循環学会論文誌, Vol. 31, pp. 169–178 (2020)
- 11) 武田 宏: 木質バイオマス利用のための燃料特性評価, 新潟県森林研究所研究報告, Vol. 50, pp. 63–70 (2009)
- 12) Y. Tsuchiya, H. Shimogaki, H. Abe and A. Kagawa: Inorganic elements in typical Japanese trees for woody biomass fuel, *Journal of Wood Science*, Vol. 56, pp. 53–63 (2010)
- 13) 折橋 健, 原田 陽, 西宮耕栄: 北海道における木質バイオマス燃焼灰の発生量と利用量の推計, *林産試験場報*, Vol. 551, pp. 1–4 (2024)
- 14) M. Ike, H. Kawagoe and M. Takaoka: An Estimation of the Ash Generated from Woody Biomass Power Generation in Japan Based on Types of Combustion Systems. *Proceedings of 7th International Conference of Low Carbon Asia*, pp. 1–6 (2021)
- 15) IEA Bioenergy: Options for Increased Use of Ash from Biomass Combustion and Co-firing (2018)
- 16) S. Du, H. Yang, K. Qian, X. Wang and H. Chen: Fusion and transformation properties of the inorganic components in biomass ash, *Fuel*, Vol. 117, Part B, pp. 1281–1287 (2014)
- 17) B. M. Jenkins, R. R. Bakker and J. B. Wei: On the properties of washed straw, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 10, No. 4, pp. 177–200 (1996)
- 18) 経済産業省: 事業計画認定情報 公表用ウェブサイト, <https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfo> (2022.05.15 accessed)
- 19) 農林水産省: 発電利用に供する木質バイオマスの証明のためのガイドライン, https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/biomass/attach/pdf/hatudenriyou_guideline-7.pdf (2024) (2024.08.26 accessed)
- 20) N. Štirmer, I. Carević, B. Milovanović and A. Baricevic: MARKET POTENTIAL OF WOOD BIOMASS ASH UTILIZATION IN CEMENT COMPOSITES-CROATIAN CASE STUDY SynerCrete'18 International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete At: Funchal, Madeir, Portugal (2018)
- 21) K. Dufossé, M. Marie-Charlotte, V. Augiseau, T. Henrion and H. Djelal: Quantification and Environmental Assessment of Wood Ash from Biomass Power Plants: Case Study of Brittany Region in France, *Sustainability*, Vol. 14, No. 99 (2022)
- 22) H. Chang, Y. Zhao, A. Xu, A. Damgaard, T. H. Christensen: Mini-review of sewage sludge parameters related to system modelling, *Waste Management & Research*, Vol. 41, No. 5, pp. 970–976 (2023)
- 23) R. R. Bakker and H. W. Elbersen: Managing ash content and quality in herbaceous biomass: an analysis from plant to product, In 14th European Biomass Conference, Vol. 17, p. 21 (2005)
- 24) 中川重年, 松村正治: 神奈川県産樹木 15 種のバイオマス燃料としての特性評価, 神奈川県自然環境保全センター報告, Vol. 1, pp. 21–28 (2004)
- 25) 澤井 徹, 梶本武志, 本庄孝子, 佐野 寛, 難波邦彦, 井田民男, 瀧端 学, 左近孝憲: 和歌山県における果樹剪定枝のエネルギー利用, *環境技術*, Vol. 35, No. 12, pp. 916–923 (2006)
- 26) J. Zhai, I. T. Burk, W. M. Maye and D. I. Stewart: New insights into biomass combustion ash categorisation: A phylogenetic

- analysis, *Fuel*, Vol. 287, p. 119469 (2021)
- 27) 高知県：木質バイオマス燃焼灰の自ら利用の手引き, https://www.pref.kochi.lg.jp/doc/bionensyobai-tebiki/file_contents/nensyobaitebiki20140731.pdf (2014) (2024.06.18 accessed)
- 28) 永野正朗：宿毛バイオマス発電所における燃焼灰の有効利用について, *日本エネルギー学会機関誌えねるみくす*, Vol. 100, No. 1, pp. 62–66 (2021)
- 29) 肴倉宏史：一般廃棄物熱処理残渣の資源化, *日本エネルギー学会機関誌えねるみくす*, Vol. 100, No. 1, pp. 48–54 (2021)
- 30) O. Dahl, H. Nurmesniemi, R. Pöykiö and G. Watkins: Heavy metal concentrations in bottom ash and fly ash fractions from a large-sized (246 MW) fluidized bed boiler with respect to their Finnish forest fertilizer limit values, *Fuel Processing Technology*, Vol. 91, No. 11, pp. 1634–1639 (2010)
- 31) タクマ環境技術研究会編：基礎からわかるごみ焼却技術, オーム社, pp. 44–45 (2017)
- 32) S. Wang: Cofired biomass fly ashes in mortar: Reduction of Alkali Silica Reaction (ASR) expansion, pore solution chemistry and the effects on compressive strength, *Construction and Building Materials*, Vol. 82, pp. 123–132 (2015)
- 33) R. Rajamma, D. Soare, T. C. Esteves, A. S. Silva, J. A. Labrinch and V. M. Ferreira: Investigation of Alkali-Silica Reaction in Concretes with Biomass Fly Ash, *International Congress on the Chemistry of Cement 2011 – XIII* (2011)
- 34) 経済産業省：都市ごみ焼却灰の国内広域処理システム構築に関する調査報告書, <https://dl.ndl.go.jp/pid/1285737/1/8> (2022.06.15 accessed)
- 35) Y. Pei, M. Ike, K. Shiota, M. Takaoka: The impacts of furnace and fuel types on the hazardous heavy metal contents and leaching behavior of woody biomass fly ash, *Fuel*, Vol. 372, p. 132202 (2024)
- 36) 後藤幸宏, 藤原 大, 前田有貴, 福富裕太, 瀧本絢子, 小倉正裕, 島倉久範, P. Gunning：高速炭酸化処理による木質バイオマス灰へのCO₂固定化・資材化の実証, *廃棄物資源循環学会研究発表会講演集*, Vol. 34, pp. 431–432 (2023)
- 37) S. Kilpimaa, T. Kuokkanen and U. Lassi: Characterization and utilization potential of wood ash from combustion process and carbon residue from gasification process, *Bioresources*, Vol. 8, No. 1, pp. 1011–1027 (2013)

Ash Discharge Estimation and a Survey on the Utilization of Woody Biomass Power Plants in Japan

Minori Ike^{1)†}, Hiroyuki Kawagoe²⁾, Masaki Takaoka¹⁾

¹⁾ Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

²⁾ CN Research, LLC

† Correspondence should be addressed to Minori Ike:

Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

E-mail: takaoka.masaki.4w@kyoto-u.ac.jp

Abstract

A questionnaire survey was conducted to determine the amount of woody biomass combustion ash discharged from power plants and for what it is recycled. Ash content of wood chip is correlated with the bark content, the presence or absence of branches and leaves, and the geological region. The actual amount of ash discharged was in average 2.3 times higher than the calculated ash content in fuel. Facilities using unutilized wood fuel and those using stepped stoker furnaces discharged more bottom ash, while those using bubbling fluidized beds discharged less. Woody biomass ash in Japan is utilized for cement, concrete aggregate, roadbed material, fertilizer, soil conditioner, recycled soil, backfill material, fuel, and material for steelmaking. The average recycling cost was 15,800 yen/t, which tends to be cheaper than cost for ash disposal as waste.

Key words: fuel type, fluidized bed sand, ANOVA, Hayashi's quantification methods I, bottom ash