

## 〈研究発表〉

日本における木質バイオマス燃焼灰の二酸化炭素固定能に関する  
調査のための物理化学的性質中尾 泰康<sup>1)</sup>, 池 美乃里<sup>2)</sup>, 塩田 憲司<sup>3)</sup>大下 和徹<sup>4)</sup>, 高岡 昌輝<sup>5)</sup><sup>1)</sup> 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 E-mail:nakao.yasumichi.37s@st.kyoto-u.ac.jp)<sup>2)</sup> 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 E-mail:ike.minori.57v@st.kyoto-u.ac.jp)<sup>3)</sup> 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 E-mail:shiota.kenji.4x@kyoto-u.ac.jp)<sup>4)</sup> 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 E-mail:oshita.kazuyuki.6e@kyoto-u.ac.jp)<sup>5)</sup> 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 E-mail:takaoka.masaki.4ws@st.kyoto-u.ac.jp)

## 概要

木質バイオマス燃焼灰による二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の固定はCO<sub>2</sub>のネガティブエミッションに貢献する。70の木質バイオマス灰(主灰, 飛灰)の元素組成, 粒度, 鉱物組成, 理論二酸化炭素貯留容量(TSC)を調査した。主灰のメデアン径は飛灰よりも大きく, 飛灰の比表面積が主灰より大きいことが示唆された。鉱物組成に関しては石英, 方解石など様々な結晶構造が見られた。主灰と飛灰, 炉形式を変数として, TSCを推定する式を最小二乗法により求めた。飛灰は主灰と比較して有意にTSCが高く, 循環流動床炉から発生する灰は他の炉形式のものと比較して有意にTSCが高かった。

キーワード: 木質バイオマス燃焼灰, 炭酸化, 元素組成, 鉱物組成, 炉形式

原稿受付 2024.7.1

EICA: 29(2・3) 151-155

## 1. はじめに

固定価格買取制度(FIT制度)におけるバイオマス発電施設の導入は2023年12月時点で866件, 6364MWであり, 認定容量は9730MWに達している<sup>1)</sup>。2023年に国内の木質バイオマス発電に伴い発生した燃焼灰は約90万トン程度と推計され, 廃棄物としての適正処理とリサイクル資源としての有効利用が進められている<sup>2)</sup>。Vassilevによると, 木質バイオマス燃料の灰分中にはCaOが平均39.2%, Na<sub>2</sub>O, MgO, K<sub>2</sub>Oがそれぞれ2.04%, 6.42%, 12.44%含まれる<sup>3)</sup>。そのため, 近年, 大気中のCO<sub>2</sub>を固定し温室効果ガス削減に寄与する材として注目されている<sup>4)</sup>。

木質バイオマス燃焼灰を二酸化炭素固定に利用する上で最大の課題は, その特性の多様性である。木質バイオマス燃焼灰は燃料の種類や燃焼炉等により特性が様々で, 木材の灰分の主たる構成成分であるCaO, SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>Oの組成をとってもそれぞれ1~83%, 2~59%, 3~35%と幅広い<sup>3)</sup>。そのため有効利用のポテンシャルは灰を排出する事業者ごとに大きく異なる。燃

焼灰の炭酸化に関する研究において木質系バイオマス燃焼プラントから排出される灰試料を用いる例は未だ少ない。先行研究で用いられた試料には, 実験室で端材を強熱して得た模擬的な灰<sup>5)</sup>, ドイツの木材専焼プラントから排出されたストーカ主灰<sup>6)</sup>, 中国においてマツを熱供給プラントで燃焼した主灰<sup>7)</sup>, 日本で木材・パーム椰子殻を燃料とするストーカ炉から採取した主灰<sup>8)</sup>があったが, これらの研究はすべて主灰を試料としており飛灰は扱っていなかった。複数の木材燃料やプラント間で比較もなされていないため, 当該試料に限る研究結果であり一般性に欠ける。木質系バイオマス燃焼灰の多様性を鑑みると, それらの二酸化炭素固定能についての知見は未だ十分とは言えない。木質系バイオマス燃焼灰の特性を詳細に理解し, より多くの二酸化炭素固定能を有する燃焼灰の特徴について知見を深めることなしに, 木質系バイオマス燃焼灰を二酸化炭素固定に利用することによる, BECCSを用いたゼロエミッション・マイナスエミッションを達成することは困難である。

以上のような背景のもとで, 本研究では, 木質バイ

オマス発電施設から発生する燃焼灰による二酸化炭素固定ポテンシャルを評価する目的で、木質バイオマス燃焼灰の特性評価を行った。具体的には、国内のバイオマス発電設備より収集した燃焼灰 70 種の粒度分布、元素組成、鉍物組成を調べて、過去の先行研究の成果と併せて特性評価を行った。

## 2. 試料・実験方法

### 2.1 試料

試料は 45 施設から排出された 70 種類の木質バイオマス燃焼灰であり、うち 24 種類は主灰、46 種類が飛灰であった。燃焼炉形式と燃料種はそれぞれ **Table 1** に示した 6 種類、7 種類が含まれていた。それぞれの炉形式の主灰 (ba), 飛灰 (fa) を (BFB, CFB, G, SS, TS, PC)\_(ba, fa) として示す。

**Table 1** Furnace type and fuel type in woody biomass power plants

燃焼方式	CFB	循環流動床
	BFB	バブリング流動床
	G	ガス化エンジン
	SS	階段式ストーカ
	TS	トラベリングストーカ
	PC	微粉炭ボイラー
燃料種	WC	木材チップ
	WP	木材ペレット
	BR	枝葉材
	BR	樹皮材
	WW	廃木材
	PKS	パーム椰子殻
	Coal	石炭

### 2.2 粒度分布

#### (1) レーザー回折

使用機器の測定可能粒径の上限を超える粒子を取り除くために 1 mm のステンレス製ふるいと受け皿を用いて 1 分間手動で振動させ、1 mm 以上の粒子を取り除いて質量を記録した。その後、レーザー回折式粒度分布計 (島津製作所製, SALD-2200) を使用し、飛灰の粒径分布を測定した。また一部の飛灰は炭素含有量が多く水に浮いてしまったため、飛灰 46 種類のうち 15 種類で測定が行えなかった。測定をおこなえなかった試料のうち 3 種類については、今回分析に用いた湿式ではなく乾式のレーザー回折式粒度分布計 (島津製作所製, SALD-2300) とサイクロン噴射型乾式測定ユニット (島津製作所製, SALD-DS5S) を用いて計測した。

#### (2) ふるい分け法

用いた試料のうち主灰については、レーザー回折式粒度分布計の測定上限の 1 mm を超えるものを多く含んでいたためふるいを用いて粒度分布を測定した。2

mm, 1 mm, 500  $\mu$ m, 250  $\mu$ m, 150  $\mu$ m, 75  $\mu$ m の 6 種類のステンレス製ふるいと受け皿を使用し、7 段階に主灰を粒度ごとに分類した。試料は一度の測定に 100g を使用した。電磁ふるい振とう機 (FRITSCH 製, BASIC) を使用し、振動時間は 20 分、振動幅は 2.5 mm で実験を行い、残った試料の質量から粒度分布を算出した。

### 2.3 元素組成分析

#### (1) CHN

70 種類全ての試料で全炭素・未燃炭素を測定した。これらは CHN コーダ (株)ジェイ・サイエンス・ラボ製: MICRO CORDER JM10) により測定したが、未燃炭素含有量については、前処理として過剰の塩酸で無機炭素を遊離させたものを試料として CHN コーダで炭素含有量を測定した。

#### (2) XRF

主要構成元素を測定する機器として、波長分散型蛍光 X 線分析装置 (島津製作所製, XRF-1800) を使用した。粉碎、均一化した試料をアルミキャップ ( $\phi$ 39.7 $\times$ H11.3 mm) にとり、ブリスケットプレス機 (島津製作所製, MP-35) をシリンダ内圧 80 kgf/cm<sup>2</sup> (表示 20 t) で 30 秒加圧することで成形した試料を使用した。7 種類の試料については十分な強度を得ることができなかったため、そのうち 3 種類の試料では ICP 発光分析による値を用いた。

### 2.4 鉍物組成分析

70 種類すべての試料で鉍物組成分析を行った。測定には水平型 X 線回折装置 (XRD, 株式会社リガク製, RINT-Ultima+/PCQ2) を使用し、解析ソフトウェア (PDXL2: 株式会社リガク製) を使用して、自動プロファイル処理によるバックグラウンド除去、 $K\alpha_2$  除去、平滑化、およびピークサーチを行った。自動プロファイル処理でピークを取りこぼしている場合は手動でピークを追加したあと、データベース (International Centre for Diffraction Data; ICDD カード PDXL2 用 Inorganic Crystal Structure Database, Crystallography Open Database, および日本結晶学会無機結晶構造データベース) を使用して化合物の同定を行った。

## 3. 結果及び考察

### 3.1 炭素含有量

**Fig. 1** に、木質バイオマス燃焼灰試料の全炭素 (TC) および無機炭素 (IC) 含有量を、炉形式と主灰・飛灰ごとに分類して示す。

燃焼灰タイプごとの平均値で比較すると、TC 含有

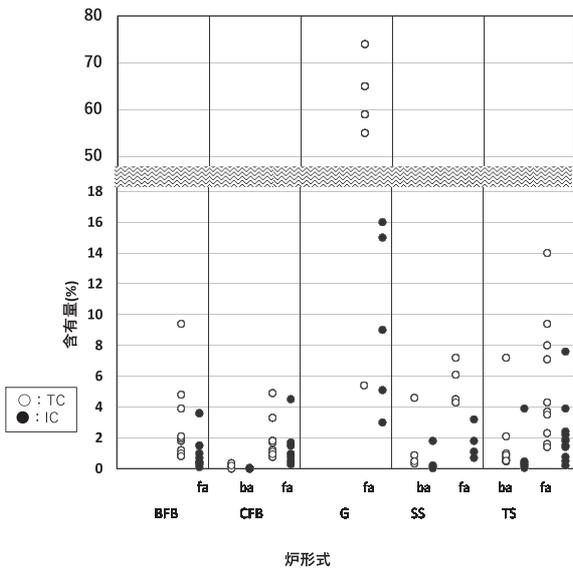


Fig. 1 Contents of TC and IC in woody biomass ash

量は G-fa >> SS-fa > TS-fa > BFB-fa > CFB-fa > SS-ba > TS-ba > CFB-ba であった。PC 由来の 4 試料の平均 TC をこれらと比較すると SS-fa よりも大きく G-fa よりも小さかった。国内の先行研究でも TC 含有量が、CFB 由来の燃焼灰 (1.0-4.8%) と比べてストーカ炉由来の燃焼灰 (8.8-14.0%) で高いことが報告されており、本研究の分析結果と一致した<sup>9)</sup>。IC 含有量は G-fa > TS-fa > SS-fa > CFB-fa > BFB-fa > TS-ba > SS-ba > CFB-ba であった。PC 由来の試料の平均 IC は SS-fa よりも大きく G-fa よりも小さかった。

CFB, TS, SS のいずれでも ba よりも fa の方が高い TC, IC を含有する傾向が見られた。

### 3.2 元素組成

#### (1) 元素組成分析

Table 2 に分析結果の主灰、飛灰、全体それぞれの平均を元素別にまとめた。全木質灰バイオマス試料中の平均含有量は Si > Ca > K > Al > Fe > Cl > Mg > S > Na > P であった。主灰のみの平均では Si > Ca > Al > K > Fe > Mg > Na > P > S > Cl, 飛灰のみでは Ca > Si > K > Al > Cl > Fe > Mg > S > P > Na となった。主灰中の Ca, Mg の平均含有量 (それぞれ 7.0%, 1.3%) と比べて飛灰中の Ca, Mg の平均含有量 (それぞれ 14.1%, 2.0%) は 1.5 倍以上高かった。K についても飛灰の方が 1.9 倍以上多く含有していた。逆に、Si 含有量は主灰の方が 1.7 倍高く、Na は主灰、飛灰ともに含有量が 1% 程度と低かった。

Table 2 Elemental composition (average) of woody biomass ash

(%)	TC	IC	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe
主灰	1.6	0.4	1.1	1.3	4.0	22.8	0.4	0.1	0.1	3.6	7.0	2.6
飛灰	9.0	2.4	1.0	2.0	3.4	13.3	0.9	1.8	2.4	7.0	14.1	2.3
全体	6.5	1.7	1.0	1.8	3.6	16.5	0.8	1.2	2.3	5.9	11.7	2.4

#### (2) TSC の推定

木質バイオマス燃焼灰のうち、二酸化炭素と結合する主な反応物となるアルカリ金属元素、アルカリ土類金属元素がより多く含まれたのは飛灰であった。さらに、飛灰中の平均 Ca 含有量を炉形式ごとで比較すると BFB > G > TS > SS > CFB となった。

Dananjayan ら<sup>10)</sup> は式 (1) により灰中の特定の金属元素が全て炭酸化された場合に固定される CO<sub>2</sub> の質量 % を理論二酸化炭素結合容量 (Theoretical Sequestration Capacity, TSC) と定義しており、これに依りそれぞれの TSC を算出した結果を Table 3 に示す。主灰と飛灰の平均はそれぞれ 14.2%, 20.7% となり、Fig. 2 から主灰よりも飛灰のほうが高い傾向が示された。この結果からも飛灰は主灰に比較して二酸化炭素の固定材としての潜在性は飛灰のほうが優れていることが確認された。また、主灰/飛灰 (sample), 炉形式 (Furnace), 各燃料種を変数として、TSC を推定する式をデータ分析ソフトウェア (JMP<sup>®</sup> ver. 17.0) を用いて、数量化 I 類により求め、その結果を Table 3 にまとめた。

TSC の値に有意に影響を与えると考えられる (帰無仮説の p 値 < 0.05) 因子は主灰/飛灰と炉形式で

Table 3 Multiple Regression Analysis with TSC's Quantification theory I

項	推定値	標準誤差	t 値	p 値 (Prob >  t )
切片	13.8612	2.317095	5.98	<.0001
sample [BA]	-4.4019	0.75637	-5.82	<.0001
sample [FA]	4.40187	0.75637	5.82	<.0001
Furnace [BFB]	2.782787	1.605568	1.73	0.0867
Furnace [CFB]	3.61519	1.31263	2.75	0.0072
Furnace [G]	-8.8224	2.21941	-3.98	0.0001
Furnace [SS]	1.887051	1.851006	1.02	0.3109
Furnace [TS]	0.537332	1.570347	0.34	0.7331
WC	3.480808	2.194832	1.59	0.1165
WP	-0.01879	2.219708	-0.01	0.9933
PKS	-0.17989	1.719974	-0.1	0.9169
BR	-0.50916	2.316173	-0.22	0.8265
B	1.285193	4.892937	0.26	0.7934
WW	-2.73202	1.94066	-1.41	0.1628
Coal	1.519479	4.420665	0.34	0.7319

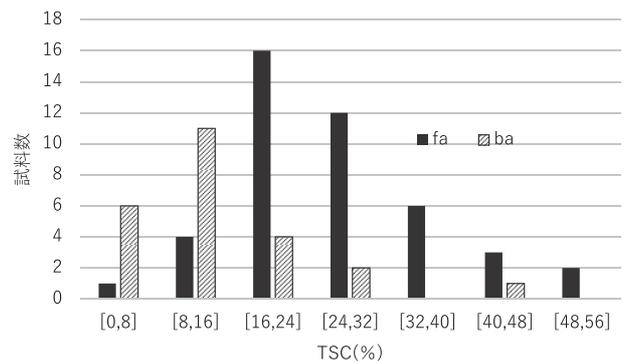


Fig. 2 TSC distribution of bottom ash and fly ash

あった。飛灰は主灰と比較して有意に TSC が高い。CFB から発生する灰は他の炉形式のものと比較して有意に TSC が高く、逆に G の灰は有意に TSC が低かった。

$$\begin{aligned} \text{TSC} = & 0.785(\text{CaO} - 0.7\text{SO}_3) + 1.09\text{MgO} \\ & + 0.71\text{Na}_2\text{O} + 0.468\text{K}_2\text{O} \end{aligned} \quad (1)$$

### 3.3 粒度分布

木質バイオマス燃焼灰試料の粒度分布の平均値および中央値を、炉形式と主灰・飛灰ごとに分類して Fig. 3 に示す。1 試料を除いた飛灰試料の平均粒径は 10.8~337.3  $\mu\text{m}$ 、中位径 11.2~550.2  $\mu\text{m}$  であった。いずれも 30 倍以上の幅があり、木質バイオマス燃焼灰の多様性が再確認できる。除いた試料は他の飛灰と比較して粒径が大きかった（平均粒径 691.6  $\mu\text{m}$ 、中位径 803  $\mu\text{m}$ ）。理由としては有害金属溶出を抑制する薬剤処理後の試料であり、本来の飛灰から物理的性状が変化した可能性が考えられた。55 試料中 48 試料は中位径が平均粒径よりも大きく、粒径のより大きい粒子の方が全体に占める割合が大きい粒径分布が伺えた。燃焼灰のタイプごとの平均粒径を比較すると、SS-ba > TS-ba > SS-fa > TS-fa > CFB-ba > BFB-fa > CFB-fa であった。

Tripathi ら<sup>11)</sup>が報告した木質バイオマス燃焼灰の平均径は 110~450  $\mu\text{m}$  であった。本研究の飛灰試料はこれと比べてより細粒を多く含んだ。粒子の形状に差異が無いと仮定すると、粒径分布が小さいほど比表面積が大きくなり、炭酸化プロセスで  $\text{CO}_2$  と燃焼灰中の成分が接触し反応する速度が大きくなる。この点では、先行研究の炭酸化材料として主に用いられてきた木質バイオマス燃焼主灰よりも、飛灰の方が二酸化炭素固定能のポテンシャルが高いと言える。

### 3.4 鉱物組成

XRD により検出された鉱物のうち 3 種類以上の試料に含まれていた鉱物とそれが含まれていた試料数を Table 4 にまとめた。最も多くの試料に存在が確認されたのは  $\text{SiO}_2$  であり、燃焼灰試料 70 点中 62 点に含まれていた。この結果は Sigvardsen ら<sup>12)</sup>の先行研究において、11 試料中 10 試料に  $\text{SiO}_2$  が存在したことと一致する。次に多くの試料に存在していた形態は  $\text{CaCO}_3$  であり、70 試料中 21 試料に存在していた。この 21 試料中 20 試料は飛灰であった。木質バイオマス飛灰中の Ca には発生時点である程度の二酸化炭素が既に固定されているといえる。Ca の存在形態は他に  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $(\text{Na}_{0.84}\text{Ca}_{0.16})\text{Al}_{1.16}\text{Si}_{2.84}\text{O}_8$ 、 $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$  があり、それぞれ 69 試料中 9, 3, 2 試料に存在していた。このうち  $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$  は飛灰にのみ存在が確認された。また  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が存在した 9 試料のうち 8 試料が飛灰であった。

木質バイオマス燃焼灰試料中の Na の存在形態には  $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ 、 $(\text{Na}_{0.84}\text{Ca}_{0.16})\text{Al}_{1.16}\text{Si}_{2.84}\text{O}_8$ 、 $\text{NaCl}$  があつた。Mg の存在形態には、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Ca}_2(\text{Mg}_{0.25}\text{Al}_{0.75})(\text{Si}_{1.25}\text{Al}_{0.75}\text{O}_7)$ 、 $\text{Na}_{21}\text{Mg}(\text{SO}_4)_{10}\text{Cl}_3$  があつた。K の存在形態には  $\text{KCl}$ 、 $\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})$ 、 $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ 、 $\text{K}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$  があつた。このうち  $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$  は飛灰のみで存在が確認できた。上述の形態以外には、

Table 4 Mineral composition of woody biomass ash

	BFB (14)	CFB (18)	SS (8)	TS (21)	G (5)	PC (4)
$\text{SiO}_2$	13	17	8	20	0	4
$\text{CaCO}_3$	3	8	2	6	2	0
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	2	2	2	2	1	0
KCl	2	4	0	0	0	0
$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})$	0	1	2	1	0	0
$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	1	0	1	3	0	0
$(\text{Na}_{0.84}\text{Ca}_{0.16})\text{Al}_{1.16}\text{Si}_{2.84}\text{O}_8$	0	0	0	3	0	0
$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	0	3	0	0	0	0

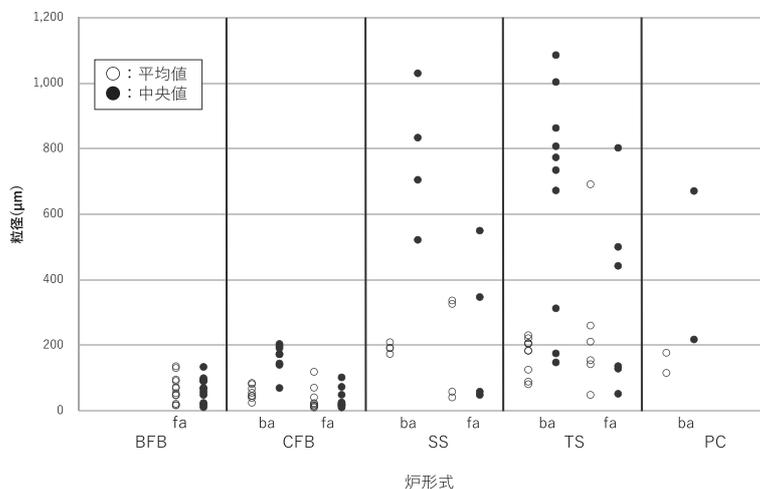


Fig. 3 Mean and median particle size of woody biomass ash by furnace type

$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ ,  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ,  $(\text{Na}, \text{K})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ ,  $\text{K}(\text{HCO}_3)$ 等の形態が一部の試料中に存在していた。

#### 4. おわりに

木質バイオマス燃焼灰の多様な特性を詳細に理解するために国内のバイオマス発電設備より収集した木質バイオマス燃焼灰70試料について元素組成、粒度分布、鉱物組成を調べた。

元素組成について二酸化炭素固定能に影響するアルカリ金属、アルカリ土類金属、特にCa, Mg, Kは主灰でそれぞれ平均含有量が7.9%, 1.4%, 4.0%, 飛灰でそれぞれ13.8%, 1.9%, 7.2%となり、主灰よりも飛灰に多く含まれていた。これらの結果から算出した理論二酸化炭素結合容量は主灰と飛灰でそれぞれ14.2%, 20.7%となり飛灰のほうが高いことが確認された。

粒度分布について中位径、平均径はそれぞれ主灰で69.9~1086.0  $\mu\text{m}$ , 24.9~231.1  $\mu\text{m}$ , 飛灰で11.2~550.2  $\mu\text{m}$ , 10.8~337.3  $\mu\text{m}$ となった。中位径では飛灰より主灰のほうが大きいことが確認された。炉形式ごとの粒径を比較すると日本では主流である流動床形式の燃焼炉が循環流動床、バブリング流動床ともに粒径が小さく、ストーカ炉形式の燃焼炉は階段式ストーカ炉、トラベリングストーカ炉ともに粒径が大きい傾向がみられた。

鉱物組成についてほぼすべての試料で $\text{SiO}_2$ が確認され、次いで多く存在していた形態は $\text{CaCO}_3$ であった。またアルカリ金属はケイ酸塩や水酸化物、炭酸塩等の形態で存在しており、幅広い形態で存在していることが確認された。

以上より、元素組成として主灰よりも飛灰でアルカリ金属を多く含むことから、TSCが主灰よりも飛灰のほうが高くなる。これにより、先行研究において試料として主に用いられてきた主灰よりも飛灰のほうが二酸化炭素固定材としてのポテンシャルを有していることが分かった。

#### 謝辞

本研究は、環境研究総合推進費(3G-2103)及び科学研究費基盤研究(B):23K25026の一部として実施されました。ここに記して感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 経済産業省：固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト 再生可能エネルギー事業計画認定情報(2024年6月5日参照)  
<https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary>.
- 2) 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, ID ICLCA, 20.0021, pp. 1-6 (2021)
- 3) S. V. Vassilev, C. G. Vassileva, Y. C. Song, W. Y. Li, and J. Feng.: Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion, Fuel, 208, 377-409 (2017)
- 4) S. V. Vassilev, C. G. Vassileva, and N. L. Petrova: Mineral carbonation of biomass ashes in relation to their  $\text{CO}_2$  capture and storage potential, ACS omega, 6(22), 14598-14611 (2021)
- 5) N. Tripathi, C. D. Hills, R. S. Singh and C. J. Atkinson: Biomass waste utilisation in low-carbon products: harnessing a major potential resource, npj Clim Atmos Sci, Vol. 2, 35 (2019)
- 6) R. Koch, G. Sailer, S. Paczkowski, S. Pelz, J. Poetsch, J. Müller: Lab-Scale Carbonation of Wood Ash for  $\text{CO}_2$ -Sequestration, Energies, Vol. 14, 10.3390/en14217371 (2021)
- 7) P. Wang, Y. Guo, C. Zhao, J. Yan and P. Lu: Biomass derived wood ash with amine modification for post-combustion  $\text{CO}_2$  capture, Applied Energy, Vol. 201, pp. 34-44 (2017)
- 8) 繁泉恒河, 久保田洋, 高地春菜, 正木祥太:  $\text{CO}_2$ を固定化した木質バイオマス燃焼灰(BECCS灰)の資源化技術の開発, フジタ技術研究報, Vol. 58, pp. 61-66 (2022)
- 9) 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, 広島大学大学院工学研究科化学工学専攻博士論文(2018)
- 10) R. R. T. Dananjayan, P. Kandasamy and R. Andimuthu: Direct mineral carbonation of coal fly ash for  $\text{CO}_2$  sequestration, Journal of cleaner production, Vol. 112, 4173-4182 (2016)
- 11) N. Tripathi, C. D. Hills, R. S. Singh and J. S. Singh: Offsetting anthropogenic carbon emissions from biomass waste and mineralised carbon dioxide, Scientific reports, 10 (1), 958 (2020)
- 12) N. M. Sigvardsen, G. M. Kirkelund, P. E. Jensen, M. R. Geiker and L. M. Ottosen: Impact of production parameters on physiochemical characteristics of wood ash for possible utilisation in cement-based materials, Resources, Conservation and Recycling, 145, 230-240 (2019)