

論文 バイオマス燃焼灰を用いたセメントレス材料に関する基礎的検討

弘瀬 密樹*1・近藤 拓也*2・横井 克則*3

要旨：本研究では、木質バイオマス発電から得られる燃焼灰を利用したセメントレス材料の基礎的物性を検討するため、空気量試験、フロー試験、圧縮強度試験およびビッカース硬さ試験を実施した。配合は、水結合材比を 70%の一定とし、水結合材に対して消石灰置換率 26%、フライアッシュ置換率 10, 30, 50, 70%とした。供試体はφ50×100mm の円柱供試体とし、材齢 7, 14, 28 日で圧縮強度を測定した。試験結果より、水中養生において強度が増加する傾向を示した。また、燃焼灰を使用する際の留意点および改善点が得られた。

キーワード：セメントレス材料、バイオマス燃焼灰、消石灰、フライアッシュ

1. はじめに

近年、地球温暖化問題や循環型社会構築の実現に向けて化石燃料に替わるエネルギー資源の開発、そして森林資源のさらなる有効活用手段として木質バイオマス発電への関心が高まっている。木質バイオマス発電は、森林や枝葉などが原料となるチップやペレットなどを燃料材としており、その燃焼プロセス中に発生する木質バイオマス燃焼灰（以下、燃焼灰）の量は発電量の増加に伴い増加している¹⁾。また、2023 年度には最大で 81 万トンの燃焼灰が発生すると推計されている²⁾。しかし、産業廃棄物である燃焼灰の処理コストは事業の採算性を悪化させていることが知られており³⁾、早急な対策が求められている。燃焼灰の有効的な活用方法としては、林地還元のための堆肥、農業用資材、建設用資材といった報告がある⁴⁾。

燃焼灰の建設用資材への利用に着目した場合、燃焼灰をコンクリート混和材として利用した例はあるものの、燃焼灰をセメント置換材として利用している例は少ない。また、燃焼灰の成分はセメントの成分と類似している部分があり、セメント置換材として有効利用できる可能性がある。既往の研究⁵⁾において、燃焼灰へのアルカリ刺激剤として消石灰を利用した木灰コンクリートでは、材齢 7 日で圧縮強度が 2~3N/mm²であった。この結果は構造物や建設用資材として利用するには安全性や耐久性が懸念される。

そのため本研究では、燃焼灰の有効利用およびセメント置換材としての有用性を調査することを目的として、火力発電所における副産物であるフライアッシュと混合した供試体を作製した。またアルカリ刺激剤として使用した消石灰との混合割合を試験要因とし、基礎的物性の検討を実施した。



写真-1 燃焼灰（左：乾燥前、右：乾燥後）

2. 実験内容

2.1 使用材料の概要

本研究で使用した燃焼灰は、高知県の木質バイオマス発電所から排出されたものとした。また、本研究で使用した燃焼灰は、樹皮や端材を含む未利用材のみを使用しており、発電の燃料となる木質チップに加工した後に木質バイオマス発電を行っている。本実験で使用した燃焼灰を写真-1 に示す。色は全体的に黒色であり無臭である。また、燃焼灰に見られる固まりは、焼成からの冷却過程において燃焼灰が凝集したものと考えられる。

燃焼灰は発生過程により 3 種類に分類される。燃焼室やボイラー缶体の底部から排出される燃焼残留物である「主灰」、ボイラー内の燃焼によって舞い上がった灰を「飛灰」、炉の隙間から落下したものが「リドリング灰」である。既往の研究⁶⁾より、3 種類の燃焼灰の内、飛灰のみが水と反応し強度発現に寄与している傾向が得られたため、本研究で用いた燃焼灰は飛灰とした。しかし飛灰は吸水率が高く、全体の 3 割が水分であるため、そのまま使用すると水結合材比やフレッシュ性状に影響を与える可能性がある。そのため本試験では、飛灰を 110℃で 24 時間炉乾燥させた後に使用した。また、燃焼灰を用いる際の留意点として重金属の溶出が懸念されることが知られている。そのため、燃焼灰に含まれる金属物質の分析結果を事前に調査した。その結果、重金属溶出による

*1 高知工業高等専門学校専攻科 ソーシャルデザイン工学専攻（学生会員）

*2 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科准教授（正会員）

*3 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科教授（正会員）

建設資材への悪影響は小さい結果が得られた。

燃焼灰の蛍光 X 線分析結果を表-1 に示す。また、使用したフライアッシュの成分表を表-2 に示す。今回使用した燃焼灰はカルシウムとカリウムが多く含まれている。しかし、普通セメントと比較すると強度発現に起因するカルシウムやケイ素の割合が少ない。また既往の研究より燃焼灰の X 線回折の結果から SiO_2 のピーク強度が高く、これは燃焼灰に含まれる SiO_2 の多くが結晶質である可能性について述べられている⁷⁾。そのため、本材料ではポゾラン反応性は期待できないと考えられる。また、カリウムが多く含まれている場合、骨材に含まれるシリカ鉱物と反応することでアルカリシリカ反応の原因となる可能性がある。そのため、既往の研究⁸⁾より、カリウムを除去する方法も提案されている。しかし、本研究では基礎的検討であるため、カリウム除去などの成分を改善する処理等は行わず試験を実施した。

本研究で使用した材料の密度を表-3 に示す。表-1 に示すように、燃焼灰にはカルシウム成分とケイ素成分がセメントと比較して少ない。そのため、カルシウム成分の補填および燃焼灰のアルカリ刺激剤として消石灰（工業用特号） $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ を使用した。また、燃焼灰は粒子形状が粗いため練混ぜ直後の流動性が低下することが知られている⁷⁾。そのため、ケイ素成分の補填及び流動性の改善を目的として、フライアッシュ II 種を採用した。

2.2 試験配合

本試験のパラメータを表-4、配合を表-5 に示す。水結合材比は 0.7 であり、結合材は燃焼灰＋消石灰＋フライアッシュとした。水結合材比は予備試験により、十分な流動性を得ることができると考えられる最小限度となる水の量とした。

また、基礎的検討として混和剤等は使用せずに実験を行った。消石灰はカルシウムを含むため、燃焼灰とフライアッシュの反応の関係を正しくは評価できない。しかし、予備試験より、燃焼灰＋水では強度発現が十分に行われなかったため、初期強度の獲得を目的として消石灰を用いた。また、同様の予備試験より、消石灰置換率 26% において材齢 28 日強度が最も発現したため、本研究では消石灰置換率 26%を採用した。

表-1 燃焼灰の蛍光 X 線分析結果

Mg	0.92	Mn	0.63
Al	-	Fe	2.23
Si	1.67	Ni	-
P	0.17	Cu	0.08
S	4.12	Zn	0.14
Cl	1.65	Br	0.02
K	54.46	Rb	0.15
Ca	33.09	Sr	0.23
Ti	0.16	Ba	0.31
Cr	-	(単位：mass%)	

表-2 フライアッシュの成分表

品質		試験値	
SiO ₂	%	63.3	
湿分	%	0.11	
強熱減量	%	1.9	
粉末度	cm ² /g	3050	
フロー値比	%	102	
活性度指数	材齡 28 日	%	80
	材齡 91 日	%	93

表-3 使用材料の密度

種類	材料名	略号	密度 (g/cm^3)
粉体	燃焼灰 (湿灰)	M ₀	1.66
	燃焼灰 (乾燥灰)	M ₁	1.96
	消石灰	S	2.21
	フライアッシュ (JIS II 種)	FA	2.20

表-4 試験パラメータ

試験要因	水準
フライアッシュ置換率	10, 30, 50, 70%
養生方法	気中養生 (20℃室内) 水中養生 (20℃室内)

表-5 試験配合

記号	W/(M ₁ +S+FA)	S/(M ₁ +S+FA)	FA/(M ₁ +S+FA)	単位量(kg/m^3)			
				W	M ₁	S	FA
F10	0.7	0.26	0.1	589	538.2	218.6	84.1
F30			0.3	594	373.5	220.7	254.6
F50			0.5	600	205.6	222.8	428.4
F70			0.7	605	34.6	224.9	605.4

また、フライアッシュの置換率は4水準とした。圧縮強度試験は水分条件が強度発現に与える影響を検討するため、養生方法を2水準として比較検討を行った。

2.3 供試体作成および養生条件

練混ぜは、業務用 15L バケツに所定の材料を投入し、ハンドミキサーを用いて行った。練り混ぜ後 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱型枠に打ち込み材齢 3 日で脱型した。材齢 3 日で脱型を行った理由は、予備試験より凝結時間がセメントと比較すると遅い傾向が得られたためである。なお F50 および F70 は材齢 3 日で脱型を行える強度に達していなかったため、材齢 7 日で脱型した。その後水中（20℃室内）および気中（20℃室内）で試験日まで養生を行った。また、フロー試験用の供試体練り混ぜは JIS R 5201 付属書 C に準拠して行った。

2.4 試験項目

(1) 空気量試験およびスランプ試験

本試験における試験方法を表-6 に示す。予備試験において燃焼灰を混入した供試体中には写真-2 のように多くの塊が見られた。そのため、JIS A 1128 に準じて空気量を測定した。スランプ試験は JIS A 1171 に準拠して空気量試験と同様に練混ぜ直後に測定した。また、本研究では目標空気量およびスランプ値は定めないものとした。

(2) フロー試験

ペーストの流動性評価は、水結合材比が高いためスランプ試験とともに JIS R 5201「セメントの物理試験方法」のスランプフロー試験より、モルタルフロー試験機を用いてフローテーブルの打数を 15 回とし、直交する二軸方向の直径を測定し、フロー値とした。

(3) 圧縮強度試験

所定の材齢で供試体を取り出し表面が平滑になるように研磨した。試験実施材齢は 7, 14, 28 日とした。また、圧縮強度試験は同一配合の供試体につき 3 体の試験体で行い、平均値を試験結果として採用した。

(4) ビッカース硬さ試験

ビッカース硬さ試験は、JIS Z 2244 に準拠して実施した。フライアッシュ置換率 50%で実施し、材齢 28 日まで水中養生した供試体を 5 日間乾燥させた後に供試体を切断した。測定は $\phi 50 \times 100\text{mm}$ 供試体を $\phi 50 \times 20\text{mm}$ に切断して行い、切断面を試験に供した。試験力を 9.8N、試験力の保持時間を 10 秒とした。測定位置は、供試体切断面のモルタル端部から深さ最大 50mm まで、2mm 間隔で測定を行った。今回は供試体内の水和せずに残存している燃焼灰の状況を確認するため、1 測点につき 1 回の測定で評価を行った。なお、測定に当たっては、目視により切断の影響で測定面にひび割れが生じていないことを確認した。

表-6 試験方法

試験名	試験方法
空気量試験	JIS A 1128
フロー試験	JIS R 5201
圧縮強度試験	JIS A 1108
ビッカース硬さ試験	JIS Z 2244



写真-2 練り混ぜ直後のペースト表面状況

表-7 空気量とスランプ

記号	空気量 (%)	スランプ(cm)
F10	10 以上	3.1
F30	6.6	9.3
F50	3.8	12 以上
F70	2.0	12 以上

表-8 フロー値

記号	フロー値(mm)	
	最大	直交方向
F10	155	152
F30	196	194
F50	262	260
F70	300	300

4. 実験結果および考察

4.1 空気量およびスランプ

空気量とスランプ値を表-7 に示す。燃焼灰の混合割合の増加（フライアッシュの混合割合の低下）とともに、流動性が増し、また空気量が低下する傾向が示された。これは、今回使用した燃焼灰の吸水率が約 30%であり、燃焼灰の使用量の増加とともに水分が燃焼灰に吸収されたためと考えられる。

また、F50 および F70 ではスランプが 12cm 以上を記録したものの、写真-2 に示すように燃焼灰が分散せずにだまとなっているものが確認できる。このだま中には空

気が存在するため、今回の測定値には、エントラップトエアの他、だま中に含まれる空気も多く含まれていると考えられる。だまの存在は強度や耐久性に大きく影響を与える可能性がある。そのため、適切な混和剤などを用いることにより、燃焼灰に水を加えることにより生じるだまを除去する必要があると考えられる。

4.2 スランプフロー値

フロー試験から得られたフロー値の最大値、および直交方向のフロー値を表-8、15打後のフローの様子を図-1に示す。

フロー値は、フライアッシュ置換率が増加するほど大きくなる傾向が得られた。これは、4.1で示したように、燃焼灰の吸水率が高いことに起因すると考えられ、表-7で示したスランプ値と整合性がある結果と考えられる。またフライアッシュは滑らかな球形粒子から成り立っているため、ワーカビリティ改善の一助となった可能性がある。また、全体の傾向として、フロー試験終了後一定時間が経過すると、供試体の端部からブリーディング水が発生した。またその状況はフライアッシュ置換率が増加するほど顕著であった。これは、水結合材比が大きい上に、吸水率が高い燃焼灰の使用量が少なくなったことに起因していると考えられる。

4.3 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図-2 および図-3 に示す。ここで材齢3日以降、水中養生を行ったものは図-2、材齢3日以降気中養生を行ったものを図-3に示す。フライアッシュ置換率が50%および70%では、材齢3日で脱型が行えなかったため、材齢7日における圧縮強度は実施しなかった。

水中養生環境下における圧縮強度は、燃焼灰量が最も大きいF10で最も大きく、フライアッシュ置換率の増加とともに小さくなる傾向を示した。これは表-1より、燃焼灰に含まれるカルシウムの量が多いため、燃焼灰量の増加とともにCa/Si比が増加したためと考えられる。そのためC-S-Hの生成量も増加し、強度が増加したものと考えられる。またいずれの配合においても圧縮強度が増加している。ポゾラン反応には水が不可欠であり、経時的に強度が増加しているのは、ポゾラン反応が促進されていることを示唆する。今回の試験では材齢28日までの結果を示しているが、ポゾラン反応の活性化は材齢91日以降に生じるという研究成果もあり⁹⁾、今回の傾向は長期的に見ると変化する可能性がある。そのため、今後の継続的な調査が必要である。

気中養生では、材齢14日までは圧縮強度が増加する傾向を示したが、水中養生と比較するとその量は低かった。また材齢28日ではF70を除く供試体で圧縮強度が低下する傾向を示した。材齢14日までは、練混ぜ以降供

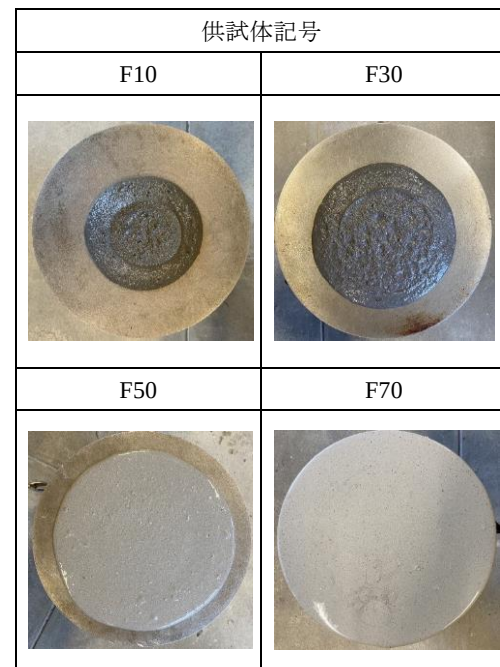


図-1 フロー試験後の状況

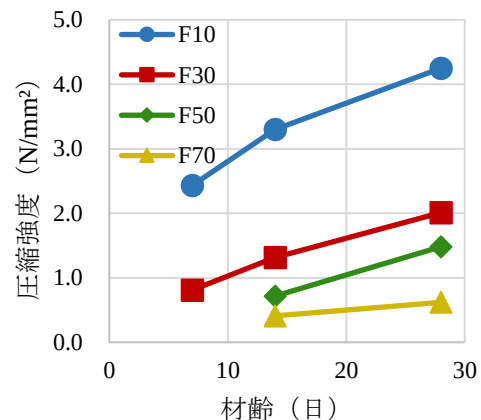


図-2 圧縮強度（水中養生）

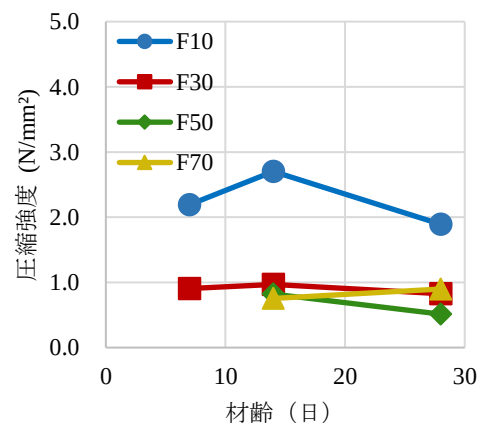


図-3 圧縮強度（気中養生）

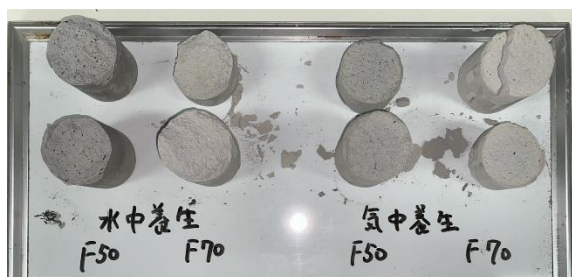
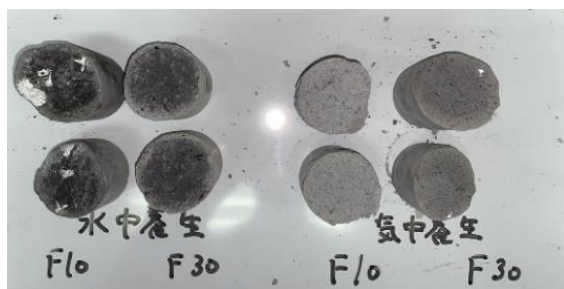


写真-3 供試体断面（圧縮強度試験材齢 28 日）

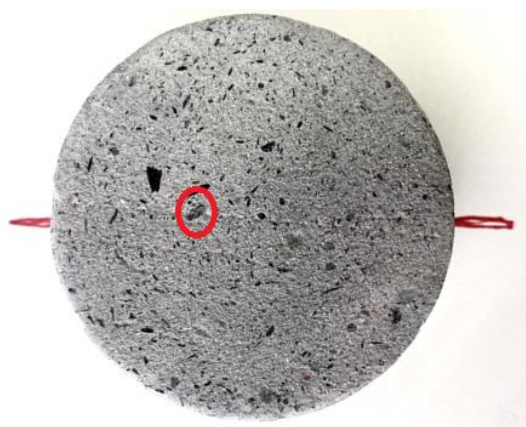


写真-4 ビッカース硬さ試験用供試体断面
(F50：水中養生)

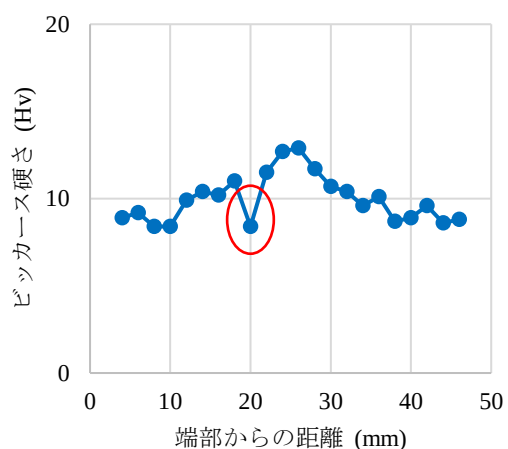


図-4 ビッカース硬さ分布
(F50：水中養生)

試体に残存する水分や、消石灰の炭酸硬化反応などにより強度が増加したものと考えられる。しかし以降は供試体中に十分な水分がないことより、強度を発現させるほどのポズラン反応が行われなかったことが挙げられる。また、水結合材比が大きいため、材齢 3 日からの乾燥により、収縮の増加が考えられる。これより供試体表面にひび割れが発生し、圧縮強度に影響を与えているものと考えられる。

一般的な水セメント比 70% のセメントペースト圧縮強度が材齢 28 日で $20 \sim 25 \text{ N/mm}^2$ である¹⁰⁾のに対し、本試験で得られた材齢 28 日における圧縮強度は最大で $4 \sim 5 \text{ N/mm}^2$ であった。また予備試験より、消石灰が混合されていない場合では材齢 28 日においても圧縮強度が 1 N/mm^2 以下であった。そのため、燃焼灰を用いた硬化体の強度発現には十分なアルカリ量が必要であるが、他の要因についても検討を行う必要がある。

材齢 28 日における圧縮強度試験終了後の供試体断面を写真-3 に示す。水中養生におけるフライアッシュ置換率 10% で消石灰の塊が残存していた。本条件は最も大きい圧縮強度を示していたが、未反応消石灰の存在は圧縮強度低下の原因となる。そのため、適切な練混ぜ方法や最適な消石灰配合量について検討を行う必要がある。

4.4 ビッカース硬さ試験

ビッカース硬さ試験に使用した供試体断面を写真-4、試験結果を図-4 に示す。写真-4 において、赤線で示している部分に沿ってビッカース硬さを測定した。また、黒く点在している箇所はフライアッシュと反応していない燃焼灰であると考えられる。

供試体端部と比較し、供試体中心に近づくほどビッカース硬さが増加している。これは、供試体内部に多くの水分が存在し、反応が促進されたためと考えられる。また写真-4 の赤丸で囲んでいる、水和していない燃焼灰付近では、図-5 中の 20mm 付近に示すように、ビッカース硬さが低下する傾向を示した。そのため、粒径が大きい燃焼灰は硬化体の硬さに影響を与えると考えられる。

4.5 成果と課題

バイオマス発電所で発生した燃焼灰を利用して、フライアッシュおよび消石灰を混入し練混ぜを行った。そしてフレッシュ性状および硬化後の圧縮強度について検討を行った。今回の結果からは、燃焼灰を大量混入することにより、材齢 28 日で約 4 N/mm^2 程度の圧縮強度を得る硬化体を作製することができた。ポズラン反応が強度発現の主体であると考えられるため、養生期間の増加により、さらに圧縮強度が高い硬化体を作製することが可能であると考えられる。

一方で、強度発現に必要な配合が不明であること、また燃焼灰の粒径が大きいため、強度発現に悪影響を与え

ていることが想定できる結果を得た。そのため、各種化学分析を踏まえた最適な配合の検討、そして燃焼灰の粉碎や分級などを実施し、最大強度の増加そして強度の早期発現に向けた検討およびそのプロセスの解明を行っていききたい。同時に収縮性状など、実用化に向けた物性についても把握を行う予定である。

5. まとめ

本研究では、産業廃棄物の有効利用およびセメント置換材としての有用性を調査することを目的として、木質バイオマス燃焼灰にフライアッシュおよび消石灰を用いたセメントレス硬化体を作製し、基礎的物性の検討を実施した。空気量試験、スランプ試験、フロー試験、圧縮強度試験およびビッカース硬さ試験から得られた知見を下記に示す。

- (1) 燃焼灰の混合割合の増加（フライアッシュの混合割合の低下）とともに、流動性が増し、また空気量が低下する傾向が示された
- (2) フロー値は、フライアッシュ置換率が増加するほど大きくなる傾向が得られた。
- (3) フロー試験終了後一定時間が経過すると、供試体の端部からブリーディング水が発生した。またその状況はフライアッシュ置換率が増加するほど顕著であった。
- (4) 水中養生環境下における圧縮強度は、燃焼灰量が最も大きいF10で最も大きく、フライアッシュ置換率の増加とともに小さくなる傾向を示した。
- (5) 今回用いた材料・配合において、気中養生環境下における圧縮強度は、材齢14日と比較し、材齢28日で低下する傾向を示した。
- (6) 水和していない燃焼灰付近ではビッカース硬さが低下する傾向を示した。

参考文献

- 1) 金城雄大，須田裕哉，富山潤，南出拓人：バイオマス発電所から排出される PKS 燃焼灰を用いたモル

タルの耐久性評価に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1660-1665，2022.7

- 2) 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
- 3) 前川明弘，市川幸治，松浦真也，奥山幸俊，坂口貴啓：木質バイオマス燃焼灰を混入したモルタル硬化体の各種特性に関する基礎的研究，第29回廃棄物資源循環学会講演集，Vol.29，pp.209-210，2018.12
- 4) 折橋健，山田敦，高橋徹，田代直明，古賀信也：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：九州大学農学部演習林報告，Vol.92，pp.13-18，2011.3
- 5) 鈴木麻由，大内雅博，永野正展：木灰を用いたバイオマスコンクリートの開発，令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会，V-538，2019.9
- 6) 片山諒辰，大内雅博：木灰と消石灰を用いたコンクリートの強度発現，高知工科大学卒業論文，pp.1-2，2015.3
- 7) 鈴木真理子，長谷川雄基，小出健人，周藤将司：木質バイオマス燃焼灰を活用した植栽基盤ポーラスコンクリートの開発に向けた基礎検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1138-1143，2022.7
- 8) 境徹浩，古賀明宏，丸屋英二：木質バイオマス燃焼灰のセメント資源化のための改質技術，第32回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.167-168，2021.10
- 9) 濱島陽平，添田政司：フライアッシュコンクリートの強度発現に及ぼす養生条件の影響に関する研究，土木学会西部支部研究発表会，pp.715-716，2008.3
- 10) 田中俊成，酒井雄也：セメントペーストの圧縮強度とドリル掘削粉の物性との相関に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1853-1858，2019.7