

論文 バイオマス灰を用いた基礎砕石およびコンクリートの試験施工に関する一考察

高木 亮^{*1}・神村 幸弥^{*2}・斎藤 豪^{*3}・佐伯 竜彦^{*4}

要旨：バイオマス灰の有効活用技術の展開を進めるための試験施工を実施した。バイオマス灰を約 1200kg/m³と大量に用いたセメント硬化体による破砕材を、配合設計手法を用いて作製した。その結果、目標強度や再生クラッシュラン RC-30 の品質規格を満たし、基礎砕石として問題無く施工することができた。バイオマス灰を細骨材置換として 25kg/m³ 用いたコンクリートをプラントにて製造した際、バイオマス灰を使用しない配合とスランプおよび空気量はほぼ同等で、圧縮強度は高かった。このコンクリートを用いてボックスカルバートを施工した際、ポンプ圧送性、充填性、表面の出来ばえは良好であった。

キーワード：バイオマス灰、基礎砕石、破砕材、コンクリート、混和材

1. はじめに

世界的な資源やエネルギーの大量使用によって、生態系の変化、汚染、経済の安定を脅かす事態となっており¹⁾、日本では 1950 年代から 1970 年代の高度経済成長期に環境問題が深刻化していった。このような環境問題、例えば大気汚染対策²⁾に取り組みつつ、1970 年代のオイルショックを契機にエネルギー効率の向上を進め、LED 照明や太陽光パネルといった分野で世界をリードする地位を確立し、クリーンテクノロジーを採用してきた³⁾。その中で、日本政府は世界的な気候変動問題への対応として 2020 年 10 月にカーボンニュートラルを宣言し⁴⁾、2021 年には第 6 次エネルギー基本計画が閣議決定した⁵⁾。この基本計画では、再生可能エネルギーのうちバイオマス発電は年間発電量を 2021 年度の 262 億 kWh から政策対応強化ケースとして 2030 年度には 471 億 kWh 導入することを見込んでいる⁵⁾。バイオマス発電では副産物としてバイオマス灰（以下、BFA）が 350 億 kWh の発電量に対して、17 万～81 万 t 発生すると推計結果がある⁶⁾。現状では BFA の多くは産業廃棄物として処理されていることから、有効利用が期待されており、肥料原料や建設資材等への適用が検討されている^{7,8)}。

このような背景の中、著者らは再生可能エネルギーにも関わらず、安定供給が可能な発電形式として期待されているバイオマス発電に着目しており、そこから

発生する BFA を大量に有効活用するために、石炭灰原粉を使用した既存のセメント硬化体の技術であるアッシュクリート（以下、AC）へ BFA を単独使用する技術を検討してきた^{9,10)}。なお、AC は産業廃棄物として処分される灰を大量に有効活用するために、水、セメント、灰を混練した硬練りのペーストを振動締め固めによって硬化させたものである。この他にも、BFA をコンクリート用の混和材としての利用の検討も進めている¹¹⁾。本論文では、これらの試験室レベルでの検討結果を踏まえ、BFA の有効活用技術の展開を進めるための基礎砕石およびコンクリートの試験施工を実施した結果に関する考察を示したものである。

2. 基礎砕石

BFA を用いた AC を製造し、その AC を破砕した破砕材を、ボックスカルバートの基礎砕石として施工した。

2.1 使用材料

AC の使用材料を表-1 に、BFA の化学成分を表-2 に、使用した BFA を写真-1 に、BFA の試験項目および試験

表-1 アッシュクリートの使用材料

種類	記号	密度 (g/cm ³)	概要
水	W	1.03	人工海水
セメント	C	3.04	高炉セメント B 種
バイオマス灰	BFA	2.47	バイオマス発電所循環流動層, 燃料:PKS

表-2 バイオマス灰の化学成分

化学成分 (%)								ig.loss (%)	CaO/SiO ₂
Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	FeO	TiO ₂		
6.72	54.84	20.01	0.37	4.34	2.97	2.86	0.27	2.8	0.391

*1 (株) 安藤・間 技術研究所構造・材料研究部主任研究員 修士 (工学) (正会員)

*2 (株) 安藤・間 東北支店土木部駒込ダム出張所 修士 (工学)

*3 東京大学 大学院工学研究科建築学専攻特任准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 新潟大学 工学部工学科教授 博士 (工学) (正会員)

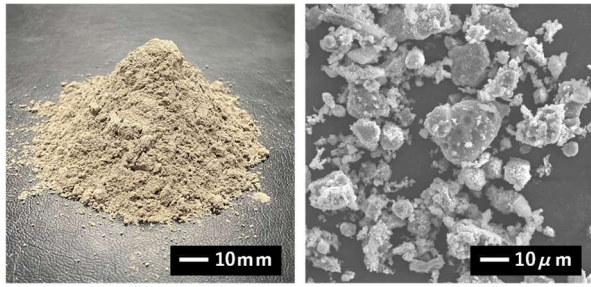


写真-1 使用したバイオマス灰

表-3 バイオマス灰の試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
密度	JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」に準拠
強熱減量	JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」に準拠
Wf140	灰と水の混練物によってモルタルフロー試験 (JIS A 5201「セメントの物理試験方法」) を実施し、フロー値 140mm となる水粉体比を算出
XRF	蛍光 X 線分析装置 JSX-1000s (日本電子社) を使用
XRD	粉末 X 線回折装置 Mini FlexII (Rigaku 社) によるリートベルト解析
有害元素溶出量	土壤環境基準(環告 46 号試験)に準拠

方法を表-3 に示す。XRD の試験結果から、BFA は石英 (SiO_2)、炭酸カルシウム (CaCO_3)、消石灰 (Ca(OH)_2)、塩化カリウム (KCl)、オケルマナイト ($2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$)、石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) など構成されていることが確認できた。

BFA の Wf140 は 38.6%、強熱減量は 2.8%であった。この Wf140 は AC の配合設計時に用いる指標となる^{10,11)}

有害元素溶出量試験結果を表-4 に示す。有害元素溶出試験の測定項目は石炭灰混合材料の環境安全品質基準を参考¹²⁾に 8 項目とした。本試験で使用した材料では、六価クロム、セレン、ふっ素が土壤環境基準値を超過していた。

2.2 配合

AC の配合を表-5 に示す。既往の研究^{9,10)}を参考に、前述の Wf140 から材齢 28 日における目標強度レベルを 15 N/mm^2 とした場合の配合を導いた。なお、AC では実施工の際は強度増加の観点から海水を、有害元素溶出抑制の観点から高炉セメント B 種を用いている。

2.3 破砕材の製造方法

破砕材の製造状況を写真-2 に示す。破砕材の製造量は 1 m^3 とした。練混ぜは、50L 強制二軸型ミキサ (練混ぜ量: 40L) を用いて 2 分間実施した。AC は通常のコンクリートとは違い、ダンプトラックで輸送することを基本としているため、混練物は練上がり直後から無振動状態では流動性がない。そのため、プラスチック製の容器に入れた状態でテーブルバイブレータを使用して 60 秒間締め固めを実施した。試験体作製後、材齢 1 日までは

表-4 有害元素溶出量試験結果

項目	環告 46 号 溶出量 (mg/L)		
	C	BFA	基準値
カドミウム	0.0007	ND	0.003 以下
鉛	0.007	0.005	0.01 以下
六価クロム	0.39	0.28	0.05 以下
砒素	ND	ND	0.01 以下
総水銀	ND	ND	0.0005 以下
セレン	0.003	0.016	0.01 以下
ふっ素	0.14	0.97	0.8 以下
ほう素	ND	0.2	1 以下

ND: 検出下限値以下, 着色箇所: 基準値超過

表-5 アッシュクリートの配合

W/C (%)	W/B (%)	単位量 (kg/m^3)		
		W	B	
			C	BFA
238.0	33.0	445	187	1163



練混ぜ後振動前

振動締め固め後



水中養生状況

作製した破砕材

写真-2 破砕材の製造状況

養生シートを用い、その後は標準水中養生を実施した。材齢 28 日において、硬化体をジョークラッシャーにて破砕した。

2.4 試験項目

試験項目および試験方法を表-6 に示す。混練物のフレッシュ性状の定量的な評価として、振動フロー試験を実施することとした。振動フロー試験より得られた Vf20 は $207 \times 206 \text{ mm}$ であり、石炭灰を用いて実施した過去の工事時と同等であった。なお、その際の管理値は $200 \pm 25 \text{ mm}$ であった¹⁰⁾。圧縮強度は破砕材ではなく、円柱供試体を用いた。

2.5 試験結果

圧縮強度は材齢 7 日で 7.13 N/mm^2 、材齢 28 日で 22.9 N/mm^2 、材齢 91 日で 27.8 N/mm^2 であった。材齢 28 日での目標強度 15 N/mm^2 を満足する結果であり、既往の研究の配合設計手法^{9,10)}が適用できる可能性が示唆された。

表-6 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
Vf20	テーブルパイププレートの上でフローコーン (JIS A 5201) に混練物を詰め、フローコーンを静かに鉛直に引き上げ、テーブルパイププレートを 20 秒加振させた時の直行する広がり (直径) 2 点を 1 mm 単位で測定した。この値を Vf20 としてフレッシュ性状の評価項目とした。
圧縮強度	JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」φ5×10cm, 材齢 7, 28, 91 日
有害元素	JIS K 0058-1 「スラグ類の化学物質試験方法 第 1 部: 溶出量試験方法」φ5×10, 材齢 28 日
粒度	JIS A 5001 「道路用砕石」 材齢 28 日に破碎した破碎材を用いて試験を実施した。 目標値: 下層路盤相当 (日本道路協会 (平成 22 年度版) 舗装再生便覧参照)
すり減り減量	
塑性指数	
含水比	
修正 CBR	

有害元素溶出量はふっ素のみ 0.10 mg/L で土壤環境基準の 0.80 mg/L 以下であり、それ以外の項目は全て検出下限値以下となった。使用した BFA は材料自体から六価クロム, セレン, ふっ素において土壤環境基準を超過する溶出量が確認されたが, BFA を単位量として 1100kg/m³ を超えて大量に用いた場合でも, セメント硬化体とすることで土壤環境基準値を超過することは無く, 環境安全性が確認できた。

破碎材の試験結果を表-7 に, 粒度分布を図-1 に示す。AC は水, セメント, バイオマス灰のみを使用しており, 砕石と比べると密度が低いことを特徴としている。本試験では下層路盤に用いる再生路盤材料として再生クラッシュラン RC-30 の品質規格 (舗装再生便覧¹³⁾) を目標値としたが, すり減り減量, 含水比, 修正 CBR の値はすべて満足していた。また, 破碎時に使用したジョークラッシュヤーの刃間距離を調整したことで, 歩留まり 100% の状態で RC-30 の粒度分布を満足することができた。

2.6 基礎砕石としての施工

基礎砕石の施工状況を写真-2 に示す。製造した破碎材を使用し, 後述するボックスカルバートの基礎砕石として施工した。基礎砕石の厚さは 150mm とし, バックホウを用いて破碎材を整地した。バックホウを用いても破碎材は砕けることも無く, 強度にも問題なかったと考えられる。基礎砕石としては通常の再生クラッシュランと同様の施工性であった。なお, 基礎砕石の上には厚さ 100mm の均しコンクリートを施工した。

3. コンクリート

基礎砕石とは別に, BFA を混和材として用いたコンクリートを使用してボックスカルバートを施工した。

表-7 破碎材の試験結果

		破碎材	RC-30 品質規格
表乾密度 (g/cm ³)		1.82	—
絶乾密度 (g/cm ³)		1.40	—
吸水率 (%)		30.4	—
すり減り減量 (%)		29.5	50 以下
塑性指数		NP	6 以下
含水比 (%)		26.3	—
修正 CBR (%)	締固め度 90%	26.2	20 以上
	締固め度 95%	36.0	

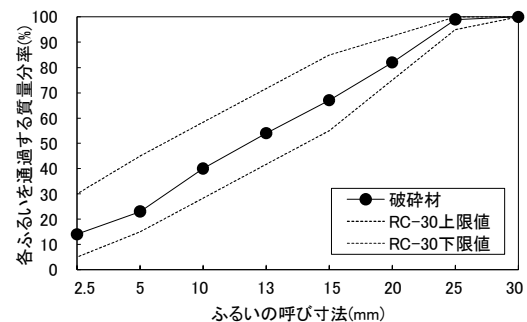


図-1 破碎材の粒度分布



写真-3 基礎砕石の施工状況

表-8 コンクリートの使用材料

材料名	記号	密度 (g/cm ³)	備考
水	W	1.00	地下水
セメント	C	3.14	普通ポルトランドセメント
バイオマス灰	BFA	2.46	バイオマス発電所
細骨材	S1	2.57	山砂
	S2	2.69	砕砂 (石灰石)
粗骨材	G	2.69	砕石 2005 (硬質砂岩)
混和剤	AD1	—	AE 減水剤
	AD2	—	AE 減水剤 遅延形
	AE	—	空気量調整剤

3.1 使用材料

コンクリートの使用材料を表-8 に示す。なお, BFA

表-9 コンクリートの配合

	BFA	配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					W	C	BFA	S1	S2	G
N-N	無添加	標準期	52.5	44.2	164	312	0	552	247	1038
N-S		夏期	51.5	43.4	169	328		534	239	
BFA-N	添加	標準期	52.5	43.4	164	312	25	534	239	
BFA-S		夏期	51.5	42.6	169	328		516	231	

は前述の基礎砕石と同じものを使用した。使用材料の全アルカリ量は、セメントが 0.57%，BFA が 3.23%，混和剤は AD1 が 0.5%，AD2 が 0.9%，AE が 1.2%，細骨材および粗骨材の NaCl 量はすべて 0%であった。

3.2 配合

コンクリートの配合を表-9 に示す。著者らの既往の研究結果¹⁴⁾ や事前の製造プラントでの室内試験練りの結果を参考に、BFA を用いない（以下、無添加）基準となる呼び強度 24 の配合に対し、単位水量、単位セメント量、単位粗骨材量は一定とし、細骨材置換で BFA を 25 kg/m³ 用いて、混和剤の使用量のみでフレッシュ性状の調整を実施することとした。更に、AE 減水剤を使用した標準期と、AE 減水剤遅延形を使用した夏期の計 4 配合とした。

3.3 コンクリートの製造および運搬

コンクリートはレディーミクストコンクリートを出荷しているプラント（工場）にて、強制二軸ミキサ（公称容量 3m³）を用いて、1 バッチにつき 2m³ 分を練り混ぜて、2 バッチ分である 4m³ をトラックアジテータにて運搬した。コンクリートの練り混ぜを開始してから荷卸しまでに要した時間は 30 分以下であった。

3.4 ボックスカルバートの施工

ボックスカルバートの断面図を図-2 に、コンクリートの打込みおよび仕上げの状況を写真-3 に、完成したボックスカルバート（BFA 使用）を写真-4 に示す。ボックスカルバートは無添加および BFA を用いた配合について各 1 基作製した。施工に関しては、底版、側壁、頂版の 3 回に分けてコンクリートを打ち込んだ。施工時期に合わせて底版は標準期配合、側壁と頂版は夏期配合とした。コンクリートの打込み量は底版で約 3m³、側壁は約 5m³、頂版は約 3m³ の計約 11m³ であった。無添加に比べ、BFA を用いたコンクリートではポンプ圧送性、充填性は良好であった。バイブレータによる締固め時にも材料分離等は生じず、側面を含めた表面には気泡も少なく、出来ばえも良好であった。また、ブリーディングはほぼ同等で、鍍均しによる表面仕上げは問題なく実施できた。

3.5 試験項目

コンクリートの試験項目のうち、スランプは JIS A

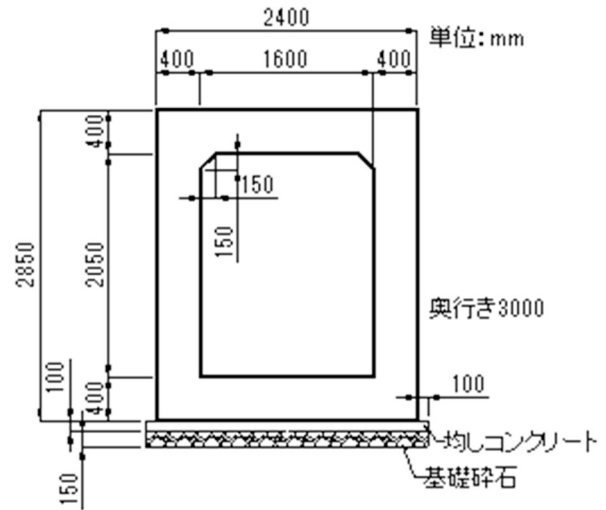


図-2 ボックスカルバートの断面図



写真-4 コンクリートの打込みおよび仕上げの状況



写真-5 完成したボックスカルバート（BFA 使用）

1101「コンクリートのスランプ試験方法」、空気量は JIS A 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法-空気室圧力方法」、圧縮強度は JIS A 1108

表-10 フレッシュ性状試験結果

配合	施工箇所	混和剤添加量 (C×%)			アルカリ総量 (kg/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	打込み時外気温 (°C)
		AD1	AD2	AE					
N-N	底版	1.10	—	0.0035	1.8	12.0	4.5	24	22
N-S	側壁	—	1.10	0.0035	1.9	14.0	4.1	32	29
	頂版	—	1.10	0.0035		11.0	4.1	33	30
BFA-N	底版	1.10	—	0.0040	2.6	11.5	4.6	24	22
BFA-S	側壁	—	1.10	0.0035	2.7	14.5	4.6	32	29
	頂版	—	1.10	0.0035		11.5	3.9	32	30

「コンクリートの圧縮試験方法」に準拠し、荷卸し時点にて試料を採取した。フレッシュ性状の目標値は、スランプが 12±2.5cm、空気量が 4.5±1.5%とした。圧縮強度の試験体寸法は φ10×20 cm、試験材齢は 7, 28, 91 日、養生は標準水中養生および封緘養生とした。封緘養生の試験体は施工場所にて所定の材齢まで保存した。目標強度は前述の通り材齢 28 日で 24 N/mm²とした。

3.6 試験結果

フレッシュ性状の試験結果を表-10 に示す。荷卸し時におけるコンクリートの温度は標準期配合では 24°C、夏期配合では 32°Cであった。スランプおよび空気量は混和剤の使用量を調整することで目標の範囲内に収まった。混和材の添加量は、BFA を用いた配合が無添加の配合よりも標準期で AE 剤の量が単位セメント量に対し 0.0005%のみ多かったものの、その他では全て同じ添加量であった。スランプや空気量の結果もほぼ同等であったことから、BFA を使用したことによるフレッシュ性状への影響は少なかった。

本試験で使用した BFA は K₂O が多く含まれていたため、アルカリ総量が大きくなるのが懸念された。コンクリートの代表的な劣化現象のうちアルカリシリカ反応に関しては、コンクリート中のアルカリ総量を規制する、アルカリシリカ反応抑制効果のある混合セメントなどを使用する、安全と認められる骨材を使用するといった抑制対策が一般的であり、JISA 5308「レディーミクストコンクリート」では、このうちの一つ以上の対策を講じることとなっている¹⁵⁾。このうちアルカリ総量の抑制対策は、コンクリート中のアルカリ総量を 3.0 kg/m³以下とするものである。本試験でのアルカリ総量は、使用材料と配合を基にコンクリート中の全アルカリ量を Na₂O 等量で算出した。その結果、BFA を 25 kg/m³用いた場合では、アルカリ総量は 2.6 および 2.7 kg/m³であり、無添加よりも大きな値となるものの、総量規制値の 3.0 kg/m³は満足するものであった。

コンクリートの圧縮強度試験結果を表-11 および図-3 に示す。すべての水準において目標とした材齢 28 日での 24 N/mm²は満足する結果であった。側壁を施工

表-11 圧縮強度試験結果

配合	施工箇所	養生	圧縮強度 (N/mm ²)		
			7 日	28 日	91 日
N-N	底版	水中	23.8	31.3	37.9
N-S	側壁	水中	27.0	35.3	42.8
		封緘	25.8	32.7	38.2
	頂版	水中	29.3	35.8	42.0
BFA-N	底版	水中	24.8	33.1	40.8
BFA-S	側壁	水中	29.3	39.0	44.8
		封緘	27.0	34.4	39.8
	頂版	水中	30.7	38.8	45.8

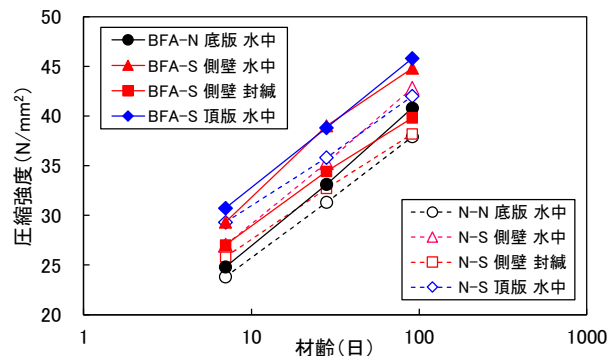


図-3 圧縮強度試験結果

した際の水中養生と封緘養生の結果では、水中養生の方が圧縮強度は高かった。無添加に比べ、BFA を用いた水準では全て圧縮強度が高くなり、その割合は 4~10%であった。本試験では細骨材置換として BFA を用いており、BFA が強度増加に寄与していた。BFA を用いた場合、無添加と比べ材齢の経過に伴う強度増加の傾向は同様であり、例えば、混和材で使用されているフライアッシュによるポゾラン活性に起因する長期強度増加の傾向¹⁶⁾は確認できなかった。著者らは、BFA を用いた場合、フライアッシュを用いた場合と比べて生成する水和物が異なり、C-S-H が強度増加に寄与していることを確認しており¹⁰⁾、材齢の経過による強度増加の傾向が BFA と無添加で同じ傾向を示した要因であると推察された。

4. まとめ

バイオマス灰の有効活用技術の展開を進めるために、バイオマス灰を約 1200kg/m³ と大量に用いたセメント硬化体による破砕材を基礎砕石に使用した。更に、バイオマス灰を混和材としたコンクリートを用いて製造したボックスカルバートの試験施工を実施した。得られた知見を以下に示す。なお、本試験で使用したバイオマス灰は 1 種類に留まったため、今後より多くのバイオマス灰を用いた試験を実施するとともに、本試験で実施した強度試験については長期的な性状の調査を継続していく予定である。

- (1) 破砕材の製造時に配合設計手法を適用したところ、圧縮強度は材齢 28 日で 22.9N/mm² となり、目標強度 15 N/mm² を満足した。
- (2) 破砕時に使用したジョークラッシャーの刃間距離を調整したことで、破砕材は歩留まり 100% の状態で RC-30 の粒度分布を満足することができ、更にその他の品質規格も満たすことができた。
- (3) 作製した破砕材を用いて厚さ 150mm の基礎砕石を通常の再生クラッシュランと同様に施工することができた。
- (4) バイオマス灰を細骨材置換として 25kg/m³ 用いたコンクリートをプラントにて製造した際、バイオマス灰を使用しない配合とスランプおよび空気量はほぼ同等で、圧縮強度は高い結果となり、バイオマス灰が強度増加に寄与していたことが確認できた。
- (5) バイオマス灰を用いたコンクリートを用いてボックスカルバートを施工した際、ポンプ圧送性、充填性、表面の出来ばえは良好であった。

参考文献

- 1) Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. : A review on circular economy : the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems, *Journal of Cleaner production*, No.114, pp.11-32, 2016
- 2) Yamagami, M., Ikemori, F., Nakashima, H., Hisatsune, K., Ueda, K., Wakamatsu, S., & Osada, K. : Trends in PM2.5 Concentration in Nagoya, Japan, from 2003 to 2018 and impacts of PM2.5 Countermeasures. *Atmosphere*, 12(5), 590, 2021
- 3) Noble, G. W. : Green Japan: environmental technologies, innovation policy, and the pursuit of green growth, 2021
- 4) Herrador, M., de Jong, W., Nasu, K., & Granrath, L. :

Circular economy and zero-carbon strategies between Japan and South Korea: A comparative study, *Science of The Total Environment*, No.820, 153274, 2022

- 5) 経済産業省資源エネルギー庁：2030 年度におけるエネルギー需要の見通し（関連資料）（2021）
- 6) 池美乃里, 大下和徹, 高岡昌輝：国内の FIT 認証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
- 7) F. F. Udoeyo et al. : Potential of Wood Waste Ash as an Additive in Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 605 - 611, 2006
- 8) T.Fukasawa et al. : Utilization of Incineration Fly Ash from Biomass Power Plants for Zeolite Synthesis from Coal Fly Ash by Microwave Hydrothermal Treatment, *Advanced Powder Technology*, Vol. 29, No. 3, pp. 450-456, 2018
- 9) 高木亮一, 林俊斉, 神村幸弥, 斎藤豪：バイオマス灰を大量に用いたセメント硬化体の諸物性, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.45, No.1, pp.112-117, 2023.6
- 10) 高木亮一, 林俊斉, 神村幸弥, 斎藤豪：バイオマス灰の NBO/T がセメント硬化体の圧縮強度に及ぼす影響, *セメント・コンクリート論文集*, Vol. 77, pp. 153-162, 2024.3
- 11) 高木亮一, 松浦忠孝, 仲摩慎剛, 笹木圭子：石炭灰を用いたセメント硬化体の有害元素溶出抑制に関する検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.41, No.1, pp.113-118, 2019.6
- 12) 土木学会：石炭灰混合材料を地盤・土構造物に利用するための技術指針（案）, *コンクリートライブラリー* 159, pp.22, 2021.3
- 13) 日本道路協会：舗装再生便覧（令和 6 年度版）, pp.16-17, 2024.3
- 14) 高木亮一, 日下陽一郎, 神村幸弥, 斎藤豪：バイオマス灰を用いたコンクリートのセメント有効係数に関する検討, 第 78 回セメント技術大会講演要旨, pp.68-69, 2024.5
- 15) 日本工業規格：JIS A 5308 レディーミクストコンクリート, 2024.3
- 16) Isaia, Geraldo C., Antonio Luiz Guerra GASTALDINI, and R. Moraes : Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete, *Cement and concrete composites*, No.25.1 , pp. 69-76, 2003