

バイオマス灰を大量に用いたセメント硬化体の諸物性 — 灰の化学的な指標である NBO/T が硬化体に及ぼす影響 —

高木亮一^{*1}・林 俊斉^{*1}

本研究では、バイオマス灰を大量に用いたセメント硬化体の諸物性について、灰の化学的な指標である NBO/T が硬化体に及ぼす影響に着目した検討を実施した。その結果、モルタルフロー試験によって測定されるバイオマス灰の Wf140 が配合設計に適用可能な指標であることを確認した。バイオマス灰を用いた場合、材齢の経過とともに硬化体中の数～数 10nm 程度の空隙量が大きくなっており、C-S-H が多く生成されていた可能性が示唆された。また、灰の NBO/T と硬化体の圧縮強度の間に正の相関関係が確認でき、この NBO/T を配合強度推定の指標として用いられる可能性が示唆された。

キーワード：バイオマス灰、石炭灰原粉、アッシュクリート、圧縮強度、NBO/T、C-S-H

1. はじめに

現在、世界は脱炭素化社会への取り組みが進む中、深刻なエネルギー危機を迎えている。新型コロナウイルス感染症のパンデミックの減衰に伴う急速な経済回復やロシア連邦によるウクライナ侵攻がその要因となっている。世界中で電力価格の上昇が進み、そのうち 90% が化石燃料の高騰に起因していると報告されている^{1) 2)}。そのため、多くの国々では政府がエネルギー供給の混乱を避けるために代替となる化石燃料源を模索しており、更に化石燃料に多額の補助金を出す選択をした。そのような背景にあるが、将来的な化石燃料からの転換を見据え、再生可能エネルギーの導入は増加している^{3) 4)}。

アジア圏では豊富なバイオマス資源を有しており、再生可能エネルギーのうちバイオマス発電に対する関心が高い。ASEAN は 2015 年に経済統合を開始し、日本工学会アカデミー（以下、EAJ）を中心として、東アジアにおけるバイオマスエネルギーの社会実装に向けた取り組みが進んでいる⁵⁾。

日本では再生可能エネルギーは 2012 年 7 月から開始した固定価格買取制度（FIT）の後押しもあり、近年急速に成長してきている電源構成である。そのうち、バイオマス発電は再生可能エネルギーにもかかわらず、安定供給が可能な発電形式として期待されている。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、2021 年 10 月には第 6 次エネルギー基本計画が閣議決定された。この基本計画では、バイオマス発電による年間発電量を 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⁶⁾。国際的にも成長市場である日本向けを対象としたバイオマ

ス発電の燃料である木質ペレットの生産は増加してきている⁷⁾。国際エネルギー機関の報告書⁸⁾では、バイオマス灰の発生量の統計が存在する国はオーストリアをはじめとする 7 か国のみとなっており、日本での現状は把握できていない。しかし、バイオマス発電では副産物としてバイオマス焼却灰が 350 億 kWh の発電量に対して、17 万～81 万 t 発生するとの推計結果がある⁹⁾。このような背景の中、これらのバイオマス灰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^{10) 11)}。

著者らは石炭火力発電所から産出される石炭灰（JIS 規格外のフライアッシュ原粉）（以下、FA）を大量に有効活用するアッシュクリート（以下、AC）の技術を開発し、1980 年代から海域での適用を皮切りに、陸域での新たな技術（AC Type II, Type S）も展開してきている^{12) 13)}。AC は資源を有効活用するだけでなく、圧縮強度が同等のコンクリートと比べると CO₂ 排出量は 6 割程度となる¹⁴⁾ため、低炭素化技術としての特徴も有する。これまでに AC に用いた FA の総量は 169 万 t（2022 年 3 月末時点）に達するが、バイオマス焼却灰を適用した事例はない。本論文では、バイオマス焼却灰のうち飛灰（以下、BFA）の有効利用を見据え、AC に BFA を用いた場合の諸物性について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1 に、灰の試験項目および試験方法を表-2 に示す。AC は産業廃棄物として処分される石炭灰を大量に有効活用することをコンセプトとしており、

*1 構造・材料研究部

水、セメント、大量の石炭灰、石膏を混練した硬練りのペーストを振動締固めによって硬化させたものである¹²⁾。ACでは強度促進の観点から海水及び石膏（火力発電所から発生する脱硫石膏）を、有害元素溶出抑制の

表-1 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
石膏	GS	2.15	脱硫石膏
石炭灰 (FA)	FA1	2.27	石炭灰原粉
	FA2	2.20	
バイオマス灰(BFA)	T1	2.39	T発電所 炉:循環流動層 燃料:PKS
	T2	2.40	
	T3	2.37	
	T4	2.43	
	S1	2.54	S発電所 炉:循環流動層 燃料:PKS
	S2	2.39	
	S3	2.49	
	B1	2.59	B発電所 炉:循環流動層 燃料:PKS:WP=50:50
	B2	2.49	
	B3	2.47	

観点から高炉セメントB種及び石膏を用いている¹³⁾。本試験では、バイオマス発電のうち燃料への適応性が高いことと環境負荷が低いことから主流となっている循環流動層ボイラ¹⁰⁾を採用している3発電所、燃料は海外産のパーム椰子殻 (PKS) や木質ペレット (WP) で同産地の入手時期が異なる3~4種類のBFAを用いた。灰の試験項目のうち、フロー値比とWf140は硬化体のフレッシュ性状と、活性度指数は圧縮強度との関係を考察するための指標とした。

灰のSEM（走査型電子顕微鏡）観察結果を写真-1に示す。本論文では、後述するNBO/Tに着目しており、BFAの中でNBO/Tが最も高かったB3を中心に試験を

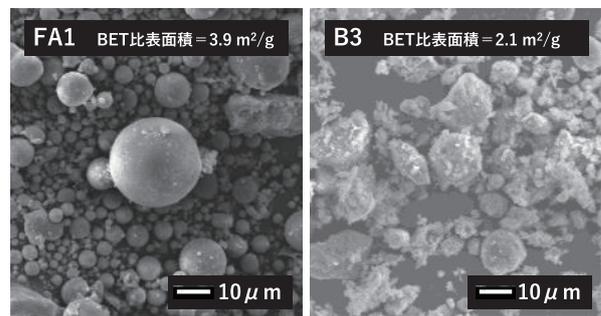


写真-1 灰のSEM（走査型電子顕微鏡）観察結果

表-2 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
有害元素	土壤環境基準(環告46号試験)に準拠
フロー値比	JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」に準拠
活性度指数	JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」に準拠、材齢7、28、91日
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 Flex II (Rigaku社) によるリートベルト解析

表-3 使用材料の有害元素溶出試験結果

項目	環告46号 溶出量 (mg/L)				
	C	GS	FA1	B3	基準値
カドミウム	0.0007	ND	ND	ND	0.003 以下
鉛	0.007	ND	ND	0.003	0.01 以下
六価クロム	0.39	ND	0.064	0.36	0.05 以下
砒素	ND	ND	0.002	ND	0.01 以下
総水銀	ND	ND	ND	ND	0.0005 以下
セレン	0.003	1.3	0.014	0.033	0.01 以下
ふっ素	0.14	4.5	1.8	0.86	0.8 以下
ほう素	ND	0.8	0.3	3.8	1 以下

ND: 検出下限値以下、着色箇所: 基準値超過

表-4 灰の化学成分

記号	化学成分 (%)									NBO/T	CaO/SiO ₂
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	FeO	TiO ₂			
FA1	22.08	58.65	5.34	0.42	0.99	0.84	2.21	1.16	0.10	0.091	
FA2	24.75	58.81	2.05	0.32	1.73	0.54	3.87	2.31	0.14	0.035	
T1	3.59	48.60	27.24	0.23	4.28	2.86	1.20	0.19	1.46	0.560	
T2	3.39	52.53	23.14	0.30	5.10	2.58	1.10	0.17	1.21	0.441	
T3	2.75	52.83	24.68	0.23	4.52	2.30	0.99	0.15	1.24	0.467	
T4	2.51	43.69	29.96	0.31	4.94	2.15	1.51	0.13	1.82	0.686	
S1	4.31	53.59	22.42	0.48	4.55	2.06	1.65	0.18	1.15	0.418	
S2	3.15	56.86	21.88	0.37	4.25	1.89	0.93	0.15	1.02	0.385	
S3	4.25	61.07	19.09	0.48	4.50	1.57	0.82	0.23	0.81	0.313	
B1	6.34	37.40	22.42	1.01	8.03	4.54	1.36	0.48	1.71	0.599	
B2	3.87	35.55	30.05	0.65	5.66	3.52	1.22	0.32	2.19	0.845	
B3	4.22	34.44	27.30	0.51	6.79	4.37	1.46	0.32	2.21	0.793	

施した。BFAはFAと目視では同様の粉体に見えるものの、BFAはFAに比べBET比表面積は小さく、SEM画像からも荒く丸みが少ないことがわかる。

使用材料の有害元素溶出試験結果を表-3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¹⁶⁾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、ほう素が土壌環境基準値を超過していた。

灰の化学成分を表-4に、SiO₂-CaO-Al₂O₃ 3元系における使用材料の化学組成を図-1に、灰のCaO/SiO₂とNBO/Tの関係を図-2に示す。フライアッシュの反応性は四面体形成イオン数あたりの非架橋酸素数の比率(NBO/T：式(1))として表されるガラスの重合の程度と高い正の相関関係があることが確認されている¹³⁾。

$$\frac{NBO}{T} = \frac{2(X_{CaO} + X_{MgO} + X_{Na_2O} + X_{K_2O} + X_{FeO} - X_{Al_2O_3}) + 2X_{TiO_2}}{X_{SiO_2} + 2X_{Al_2O_3}} \quad (1)$$

ここで、NBO：非架橋酸素数

T：四面体形成イオン数

Xi：四面体網目構造を形成する原子のモル数

FAのNBO/Tは0.1程度であるが、BFAのNBO/Tは0.8~2.2とFAに比べて大きい。BFAの各成分ではCaOやK₂Oは大きく、SiO₂は小さいといった特徴がある。図-1より、BFAは混和材料としてはFAと高炉スラグ微粉末の両方の性質を有している可能性がある。特にCaO量が大きい(NBO/Tの高い)BFAは潜在水硬性を有しているスラグに近い性状を示す可能性が高いと考えられる。また、図-2より、BFAのCaO/SiO₂とNBO/Tの間に非常に強い正の相関関係があることがわかる。そこで、本試験ではこのNBO/Tを硬化体の評価指標として用いることとした。

灰のXRDの試験結果から、FAは石英(SiO₂)、ムライト(2Al₂O₃・SiO₂)、消石灰(CaO)など、BFAは石英、炭酸カルシウム(CaCO₃)、水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)、塩化カリウム(KCl)、オケルマナイト(2CaO・MgO・2SiO₂)などで構成されていることが確認できた。

2.2 配(調)合

配(調)合を表-6に示す。ACの配(調)合設計手法は灰の品質指標として、モルタルフロー試験(JIS A 5201「セメントの物理試験方法」)によって測定されるWf140(フロー値140mmとなる水粉体比)との相関関係から、最適水粉体比とセメント添加率によって強度を調整する方法である¹⁷⁾。本試験ではこの配(調)合設計手法を用い、FA1で配合強度13.3 N/mm²とした配(調)合を基準とし、単位水量、セメント量、石膏量を一定の条件で、灰量のみを変化(灰の容積は一定)させた。

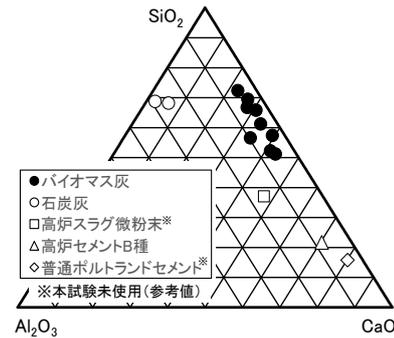


図-1 SiO₂-CaO-Al₂O₃ 3元系における使用材料の化学組成

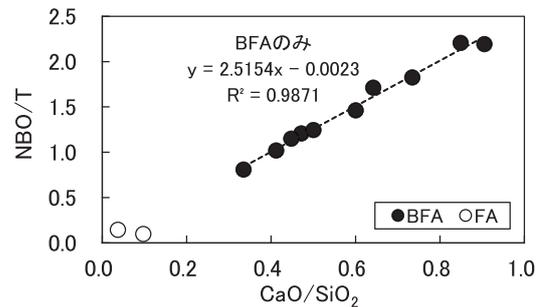


図-2 灰のCaO/SiO₂とNBO/Tの関係

表-6 配(調)合

使用灰	W/C (%)	W/P (%)	単位量 (kg/m ³)			
			W	P		
				C	GS	灰
FA1	288	35.6	447	155	36	1066
T1		34.0				1122
T2		34.2				1117
T3		34.3				1113
T4		33.6				1141
S1		33.2				1155
S2		34.0				1122
S3		32.9				1169
B1		31.8				1216
B2		31.9				1169
B3		33.1				1160

表-7 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
Vf20	テーブルバイブレータ(以下、TB)の上でフローコーン(以下、FC)(JIS A 5201)に混練物を詰め、FCを静かに鉛直に引き上げ、TBを20秒加振させた時の直行する広がり(直径)2点を1mm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。
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
圧縮強度	JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」φ5×10、材齢7、28、91日
空隙構造	水銀王入ポロシメーター、3~300000nm 材齢7、28、91日
XRD	粉末X線回折装置 Mini Flex II (Rigaku社)によるリートベルト解析 材齢7、28、91日

2.3 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-7に示す。硬化体の練混ぜは、ホバート型モルタルミキサで2分間実施した。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。また、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、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。混練物はφ5×10cmの型枠内に入れて、テーブルバイブレータを使用して60秒間締め固めて供試体を作製した。試験体作製後、材齢7日までは封緘養生、その後、所定の材齢まで標準水中養生を実施した。

3. 試験結果および考察

灰の物性ではFAについて2種類のデータを比較したが、硬化体の試験結果ではFA1とFA2はほぼ同等の傾向を示したため、FA1のみについて記載することとした。

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状を表-8に、Vf20とフロー値比の関係を図-3に、Vf20とWf140の関係を図-4に示す。フロー値比はフライアッシュを用いたコンクリートの流動性の発現の度合を示す重要な品質項目(指標)で、一般的にフロー値比が大きいほど所要の流動性を得るための単位水量は小さくなる¹⁸⁾。本試験結果ではフロー値比とVf20の間には相関関係が確認できなかった。しかし、Wf140とVf20の間には負の相関関係が確認できた。フロー値比は測定対象がモルタルであり、普通ポルトランドセメントのみを使用した基準モルタルと普通ポルトランドセメント重量の25%をフライアッシュに置換したモルタルのフローの比を表したものである。本試験ではペースト配合の流動性であるVf20を対象としており、水と灰の混合物によって測定されたWf140の方がより評価手法として適していたものと考えられる。このWf140

表-8 フレッシュ性状試験結果

記号	灰の物性		Vf20 (mm)
	フロー値比 (%)	Wf140 (%)	
FA1	105.1	31.8	278
T1	86.2	39.7	219
T2	97.7	38.3	239
T3	101.0	37.8	246
T4	99.5	36.9	243
S1	90.3	42.3	185
S2	92.3	32.5	309
S3	94.4	36.7	219
B1	88.0	40.6	145
B2	91.8	41.3	149
B3	96.0	39.1	195

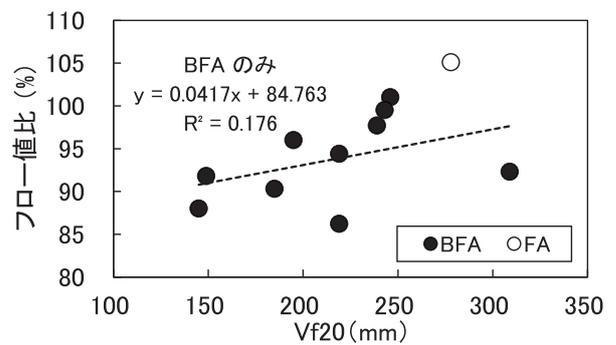


図-3 Vf20とフロー値比の関係

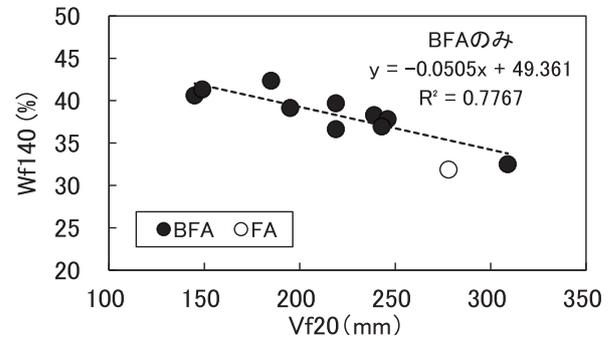


図-4 Vf20とWf140の関係

表-9 圧縮強度試験結果

記号	灰の活性度指数			圧縮強度 (N/mm ²)			FA1に対する強度比 (%)		
	7日	28日	91日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
FA1	79.5	91.7	94.4	9.9	17.4	23.9	100	100	100
T1	81.6	80.8	89.0	6.2	16.4	37.5	63	94	157
T2	82.5	81.3	82.3	5.6	16.0	35.8	57	92	150
T3	77.1	84.8	87.0	5.2	14.9	35.0	53	86	146
T4	79.6	78.3	80.2	4.5	15.4	34.6	45	89	145
S1	70.7	74.7	74.4	3.1	9.6	31.4	31	55	131
S2	77.6	79.2	78.2	2.5	7.7	21.7	25	44	91
S3	70.8	71.4	75.5	2.5	6.0	20.0	25	34	84
B1	77.4	78.3	85.7	4.4	18.8	33.3	44	108	139
B2	80.2	83.6	82.9	7.9	28.0	48.9	80	161	205
B3	77.5	77.5	84.3	6.7	21.3	38.3	68	122	160

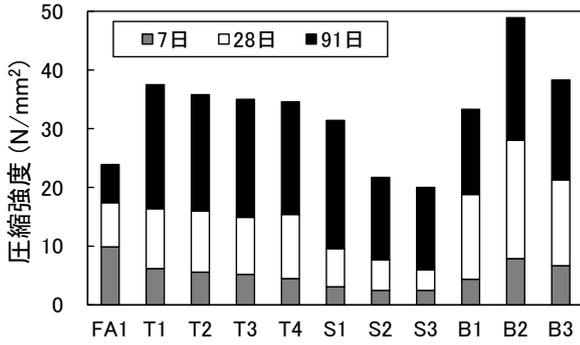


図-5 圧縮強度試験結果

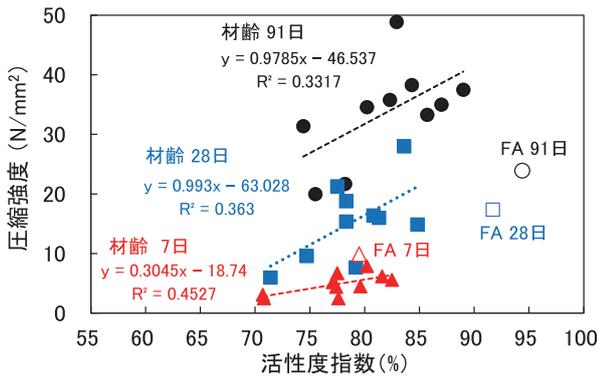


図-6 灰の活性度指数と圧縮強度の関係

はACの配合設計手法に用いていた指標であり、BFAを用いた場合においても問題なく適用が可能であった。

3.2 有害元素溶出量

硬化体の材齢28日における有害元素溶出量は、FA1は、砒素とセレンが0.001 mg/L，ほう素が0.2mg/L，B3はほう素が0.2mg/Lで、それ以外の項目は全て検出下限値以下で、土壤環境基準値をすべて満足しており、環境安全性が確認できた。

3.3 圧縮強度

圧縮強度試験結果を表-9および図-5に、灰の活性度指数と圧縮強度の関係を図-6に示す。硬化体の圧縮強度はFAに比べBFAを用いた場合、材齢7日ではすべての水準で小さく、材齢28日ではBシリーズ以外は小さく、材齢91日ではS2およびS3以外ではすべて大きくなっていた。BFAは材齢の経過による強度の増加が顕著であった。フライアッシュを置換したコンクリートでは、フライアッシュの活性度指数とコンクリートの圧縮強度の間に相関関係がある¹⁹⁾が、本試験では灰の活性度指数と硬化体の圧縮強度には明確な関係性を確認できなかった。

3.4 空隙構造

空隙構造試験結果を表-10に、圧縮強度と空隙量の

表-10 空隙構造試験結果

記号	空隙量 (mL/g)					
	3~50nm			50~100000nm		
	7日	28日	91日	7日	28日	91日
FA1	0.118	0.160	0.169	0.156	0.138	0.111
T1	0.099	0.155	0.199	0.143	0.107	0.016
T2	0.108	0.163	0.217	0.147	0.107	0.028
T3	0.112	0.174	0.188	0.154	0.097	0.023
T4	0.103	0.166	0.199	0.161	0.099	0.026
S1	0.090	0.143	0.192	0.173	0.135	0.034
S2	0.090	0.149	0.197	0.186	0.128	0.059
S3	0.065	0.101	0.156	0.203	0.160	0.098
B1	0.116	0.166	0.153	0.148	0.088	0.044
B2	0.131	0.211	0.174	0.112	0.051	0.024
B3	0.113	0.178	0.191	0.139	0.086	0.030

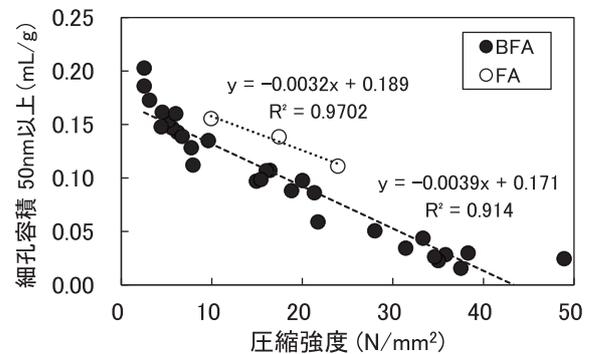


図-7 圧縮強度と空隙量の関係

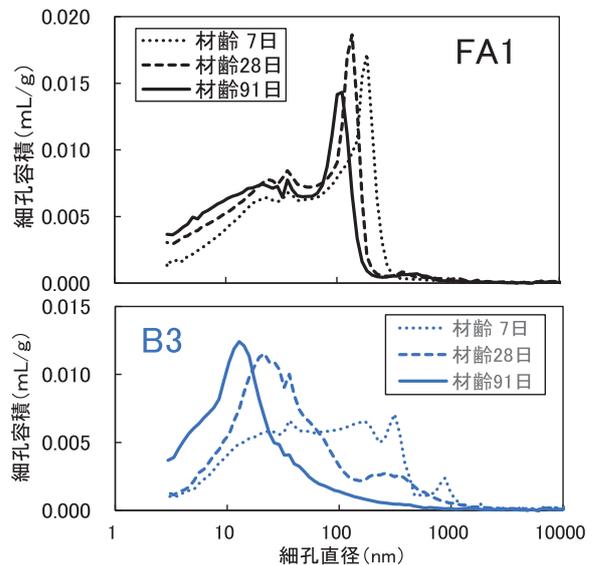


図-8 細孔直径と細孔容積の関係 (FA1、B3)

関係を図-7に示す。硬化体の圧縮強度と細孔直径50nm以上の細孔容積は関連が高い²⁰⁾ことから、全ての試験材齢でこれらの関係性を確認した。その結果、既往の結果と同様に圧縮強度と細孔直径50nm以上の細孔容積の間には強い負の相関関係が確認できた。また、BFAとFAを使用した場合、その傾きは同様であるが、BFAの方が

細孔容積に対する圧縮強度は小さいことが確認できた。

細孔直径と細孔容積の関係 (FA1, B3) を図-8に示す。FA1では100～数100nm程度の毛細管空隙²¹⁾と考えられる空隙量が大きく、材齢の進行とともに小さい径の空隙量が大きくなっていった。一方、B3はFA1と異なった空隙分布を示しており、材齢の進行とともに数～数10nm程度の空隙量が大きくなっていった。なお、B3以外のBFAにおいても同様の空隙分布の傾向を示していた。Jenningsが提唱するCM-IIモデルでは、3～12nmの空隙としてC-S-Hの凝集体が形成するスモールゲルポアやラージゲルポアが存在すると考えられている²²⁾。この空隙径はBFAで材齢の進行とともに空隙量が大きくなっていった範囲とほぼ一致しており、BFAを用いた場合、C-S-Hがより生成されていた可能性が示唆された。

3.5 XRD

XRD試験結果を図-9に示す。灰由来と考えられる鉱物として、FA1では石英、ムライト、B3では石英、炭酸カルシウム、塩化カリウム、オケルマナイトが確認できた。FA1ではすべての材齢でハイドロカルマイト(3CaO・Al₂O₃・CaCl₂・10H₂O)が生成されていた。これは既往の結果とも一致しており¹¹⁾、石膏の影響によるものと考えられる。一方、B3では材齢7日では水酸化カルシウムが確認されたが、それ以降の材齢では確認できず、材齢の経過とともに消費されたと考えられる。B3はFA1よりもより多くのC-S-Hが生成されていた可能性が高く、後述するNBO/Tの影響も含め、灰の成分が異なることから生成物される水和物に違いが生じていたと考えられる。

3.6 圧縮強度とNBO/Tに関する考察

灰のNBO/Tと圧縮強度の関係を図-10に示す。BFAを用いた場合、すべての材齢でNBO/Tと圧縮強度には正の相関関係が確認できた。特に管理材齢となる28日では高い相関関係であった。一方、FAを用いた場合のNBO/Tと圧縮強度の関係は、BFAとは違った挙動を示しており、これは前述した水和物の生成状況が異なっているためと考えられる。BFAはCaOやK₂Oは大きく、Al₂O₃は小さいといった特徴があるため、反応性を示す指標であるNBO/Tの値もFAに比べ高く、圧縮強度との相関関係も高かったことから、灰のポテンシャルを推定するための指標として利用できる可能性が高いと考えられる。従来のACの配合設計でも、BFAのNBO/Tを測定することで圧縮強度を推定することが可能であると考えられ、他の補助セメント材料(SCMs)と同様、管理指標として用いることができる可能性が示唆された。

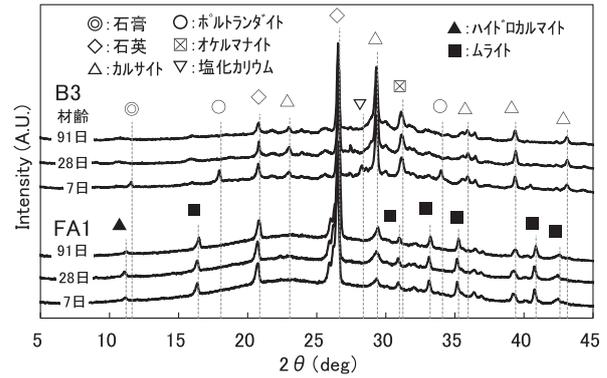


図-9 XRD 試験結果

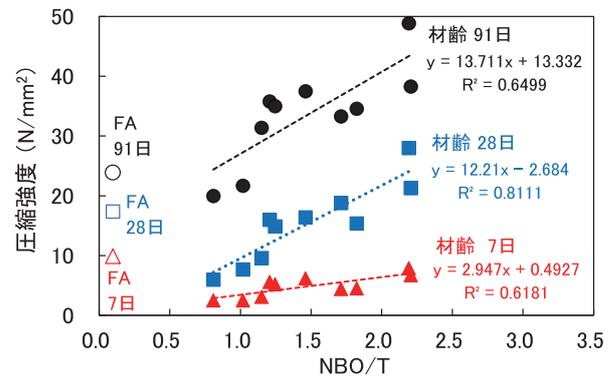


図-10 灰のNBO/Tと圧縮強度の関係

4. まとめ

本論文では、バイオマス灰を大量に用いたセメント硬化体の諸物性について、灰の化学的な指標であるNBO/Tが硬化体に及ぼす影響に着目した検討を実施した。以下に得られた結論をまとめる。

- (1) モルタルフロー試験によって測定されるバイオマス灰のWf140とバイオマス灰を用いたセメント硬化体のフレッシュ性状(振動フロー値: Vf20)の間には負の相関関係が確認でき、Wf140は配合設計に適用可能な指標であった。
- (2) NBO/Tの高いバイオマス灰を用いたセメント硬化体の有害元素溶出量は全ての項目で土壌環境基準値を満足しており、環境安全性を確認できた。
- (3) バイオマス灰を用いたセメント硬化体では灰の活性度指数と硬化体の圧縮強度には明確な関係性を確認できなかった。
- (4) 石炭灰とバイオマス灰の成分が異なることから、硬化体では異なった水和生成物が確認できた。特にバイオマス灰を用いた場合、材齢の経過とともに数～数10nm程度の空隙量が大きくなっており、C-S-Hが多く生成されていた可能性が示唆された。
- (5) バイオマス灰を用いたセメント硬化体では、灰のNBO/Tと圧縮強度の間に正の相関関係が確認でき、この

NBO/T を圧縮強度推定の指標として用いられる可能性が示唆された。

参 考 文 献

- 1) Kalair, A., Abas, N., Saleem, M. S., Kalair, A. R., Khan, N., (2021). "Role of energy storage systems in energy transition from fossil fuels to renewables." *Energy Storage*, 3(1), e135.
- 2) International Energy Agency, *Fossil Fuels Consumption Subsidies*.
- 3) Martins, F., Felgueiras, C., Smitkova, M., & Caetano, N. (2019). "Analysis of fossil fuel energy consumption and environmental impacts in European countries." *Energies*, 12(6), 964.
- 4) International Energy Agency, *World Energy Outlook 2022*.
- 5) Saiki, T., Nishijima, A., Ohta, N., Samura, H., Sakanishi, K., Kamimoto, M., Nomura, M., Sagisaka, M., Takeuchi, K., Murakami, H., Sawa, I., Ohtake, M., Yasunaga, Y., (2022) "Development of sustainable biomass plants towards the carbon-neutral society in 2050." *Grand Renewable Energy Proceedings*, Volume2, 35
- 6) 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), 2021.10
- 7) REN21 : *Renewables Global Status Report 2023*, 2023
- 8) IEA *Bioenergy:Options for Increased Use of Ash from Biomass Combustion and Co-firing*, 2018
- 9) 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
- 10) F. F. Udoeyo, H. Inyang, D. T. Young, E. E. Oparadu: Potential of Wood Waste Ash as an Additive in Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 605 ~ 611, 2006
- 11) T. Fukasawa, A. Horigome, A. D. Karisma, N. Maeda, A. N. Huang, K. Fukui: 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
- 12) 坂本守: アッシュクリート技術の開発と展開, 安藤ハザマ研究年報, Vol. 4, 2016
- 13) 高木亮一, 坂本守, 森本良, 古川園健朗: 福島第一原子力発電所港湾関係工事における石炭灰活用の取組み, *コンクリート工学*, Vol. 58, No. 12, pp.944 ~ 951, 2020.12
- 14) 高木亮一, 林俊斉, 神村幸弥, 斎藤豪: 石炭灰を大量に用いたセメント硬化体の CO₂ 排出量削減技術の検討, *土木学会第 78 回年次学術講演会講演概要集*, V-548, 2023
- 15) 山本晃司: 循環流動層ボイラによるバイオマス発電, *NHK 技報*, No.174, pp.22 ~ 26, 2001.8
- 16) 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
- 17) 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
- 18) P. T. Durdzinski, Ruben Snellings, Cyrille F. Dunant, Mohsen Ben Haha, Karen L. Scrivener: Fly ash as an assemblage of model Ca-Mg-Na-aluminosilicate glasses, *Cement and Concrete Research*, No.78, pp.263 ~ 272, 2015.7
- 19) 土木学会: フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針 (案), *コンクリートライブラリー* 94, pp.5 ~ 6, 1999.4
- 20) P. Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro: *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, Mc Graw Hill Education, pp.30 ~ 32, 2005.9
- 21) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの自己収縮研究委員会報告書, pp.79, 2002.9
- 22) Hamlin M. Jennings: Refinements to colloid model of C-S-H in cement : CM- II , *Cement and Concrete Research*, No. 38, pp.275 ~ 289, 2007.10

Physical properties of hardened cement with large volume of biomass ash - Influence of NBO/T a chemical indicator of ash on hardened bodies -

Ryoichi TAKAGI, Toshinari HAYASHI

In this study, the physical properties of hardened cement using a large amount of biomass ash were investigated, focusing on the effect of NBO/T, a chemical index of ash, on the hardened cement. As a result, it was confirmed that Wf140 of biomass ash, measured by the mortar flow test, is an index that can be applied to mix design. In the case of biomass ash, the amount of voids of several to several tens of nanometers in the hardened product increased with the age of the material, suggesting that a large amount of C-S-H may have been produced. A positive correlation was observed between the NBO/T of the ash and the compressive strength of the hardened compact, suggesting that the NBO/T may be used as an index for estimating the strength of the mixture.