

論文 バイオマス灰と石炭灰を用いたセメント硬化体に石膏が及ぼす影響

高木 亮一*1・久保田 雅也*2・神村 幸弥*2・斎藤 豪*3

要旨: 本研究では、バイオマス灰と石炭灰を大量かつ混合使用したセメント硬化体の諸物性について、石膏が圧縮強度に及ぼす影響に着目した検討を実施した。その結果、バイオマス灰を単独で使用、または石炭灰と混合した多くの水準では、石膏を使用しない方が石膏を使用した場合よりも圧縮強度は高く、石膏を使用しないことで製造管理上優位になると考えられた。更に、バイオマス灰を使用した方が石炭灰を使用するよりも C-S-H がより多く生成された可能性が示唆された。また、特に石膏を使用しない場合においては、C-S-H 生成量の増加が圧縮強度の増加に影響を及ぼしたものと考察した。

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

1. はじめに

現在、世界は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。しかし、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。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³⁾。ASEAN は 2015 年に経済統合を開始し、日本工学会アカデミーを中心として、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⁴⁾。日本でも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。

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、そこから発生するバイオマス灰(以下、BFA)を大量に有効活用するために、石炭灰原粉(以下、FA)に適用してき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⁵⁾。第 6 次エネルギー基本計画の中で、バイオマス発電は年間発電量を 2019 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おり、石炭火力発電ではその量がそれぞれ 3277 億 kWh と 1775 億 kWh である⁶⁾。バイオマス発電は今後需要が拡大すると考えられるが、その量は石炭火力発電

と比べると小さいため、発生するバイオマス灰の量も少なく、安定供給といった課題がある。供給面の課題は、AC に従来適用してきた FA を BFA と混合して使用することで解決できると考えているが、著者らは BFA と FA では硬化体の空隙構造や生成される水和物に違いがあることなどを確認している⁵⁾。そこで本論文では、BFA を用いた AC の実用化を見据え、AC で BFA と FA を混合して使用する際の石膏の有無の影響について着目して検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1 に、灰の特性を把握するために実施

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	2.27	石炭火力発電所 石炭灰原粉
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:WP=50:50

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
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 とする水粉体比を算出
XRF	蛍光 X 線分析装置 JSX-1000s (日本電子社) を使用、FP 法による半定量分析
XRD	粉末 X 線回折装置 Mini FlexII (Rigaku 社) によるリートベルト解析、内部標準試料として α-Al ₂ O ₃ (コランダム) 使用

*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 新潟大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻

*3 新潟大学 工学部工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

表-3 灰の化学成分

記号	化学成分 (%)								ig.loss (%)	NBO/T	CaO/SiO ₂
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	FeO	TiO ₂			
FA	22.08	58.65	5.34	0.42	0.99	0.84	2.21	1.16	4.4	0.10	0.091
BFA	4.22	34.44	27.30	0.51	6.79	4.37	1.46	0.32	9.2	2.21	0.793

した灰の試験項目および試験方法を表-2 に、灰の化学成分を表-3 に、灰のSEM (走査型電子顕微鏡) 観察結果を写真-1 に示す。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ことをコンセプトとしており、水、セメント、大量の灰、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⁷⁾。FAを用いた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観点から高炉セメントB種を用いている⁸⁾。一方で、BFAを用いた場合、石膏を使用しない場合の方が圧縮強度は高くなることを確認している⁹⁾。BFAを用いたACでは、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硬化体の圧縮強度に高い正の相関関係があることが確認しており¹⁰⁾、本試験ではBFAの中でも比較的NBO/Tの高いBFAを用いた。なお、このNBO/TはXRFの試験結果より算出した。

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

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

Wf140はACの配合設計時に用いる指標であり、FAは31.8%、BFAは39.1%であった。

灰のXRDの試験結果から、FAは石英(SiO₂)、ムライト(2Al₂O₃・SiO₂)、生石灰(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)、石膏(CaSO₄・2H₂O)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-4に示す。ここでの各配(調)合の記号は、材齢28日における目標強度レベル(N/mm²)-石膏の有無-バイオマス灰混合率(%)の順で表記した。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⁸⁾。本試験ではこの配(調)合設計手法を用い、GSを使用したFAのみ

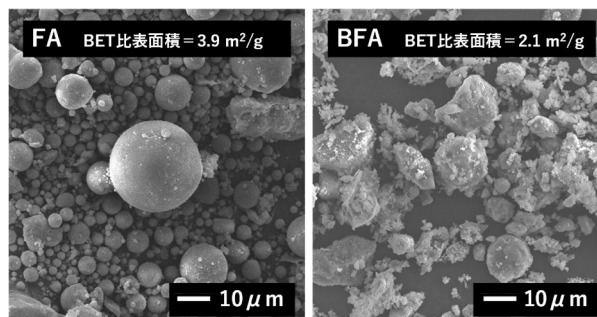


写真-1 灰のSEM (走査型電子顕微鏡) 観察結果

表-4 配(調)合

記号	W/C (%)	W/P (%)	単体量 (kg/m ³)				
			W	P			
				C	GS	FA	BFA
5-GS-0	587	36.2	447	76	38	1122	0
5-GS-25		35.5				842	305
5-GS-50		34.8				561	611
5-GS-75		34.1				281	916
5-GS-100		33.5				0	1221
5-0		36.2			0	1159	0
5-25		35.5				870	315
5-50		34.8				580	631
5-75		34.1				290	946
5-100		33.4				0	1262
10-GS-0	288	35.6	447	155	36	1066	0
10-GS-25		34.9				799	290
10-GS-50		34.3				533	580
10-GS-75		33.7				266	870
10-GS-		33.1				0	1160
10-0		35.7			0	1100	0
10-25		35.0				825	299
10-50		34.3				550	598
10-75		33.7				275	897
10-100		33.1				0	1197
15-GS-0	190	35.0	447	235	34	1008	0
15-GS-25		34.4				756	274
15-GS-50		33.8				504	549
15-GS-75		33.2				252	832
15-GS-		32.7				0	1097
15-0		35.0			0	1042	0
15-25		34.4				781	283
15-50		33.8				521	567
15-75		33.2				260	850
15-100		32.6				0	1133

の配(調)合を目標強度レベルとした水準を基準とし、単体量、セメント量を一定の条件で、石膏量と灰量のみを変化させた。

表-5 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、テーブルバイブレータを 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」φ5×10, 材齢 7, 28, 91 日
空隙構造	水銀圧入ポロシメーター, 3~30000nm 材齢 7, 28, 91 日
XRD	粉末 X 線回折装置 Mini FlexII (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-5 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無い。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。なお、既往の研究結果⁵⁾で、FA や BFA を用いた場合の有害元素溶出抑制に対する環境安全性を確認していることから、本論文では有害元素溶出に関する検討は実施しなかった。

3. 試験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状および圧縮強度試験結果を表-6 に、バイオマス灰混合率と Vf20 の関係を図-1 に示す。本試験では FA を単独で使用する場合 (以下、FA 単独) の方が BFA を単独で使用する場合 (以下、BFA 単独) よりも Vf20 は大きかった。また、どの強度レベルにおいても BFA 混合率が高くなると Vf20 も小さくなり、その関係はほぼ線形で表されていた。そのため、BFA 単独と FA 単独それぞれの Vf20 から、BFA と FA を混合して使用した場合 (以下、混合使用) の Vf20 を予測することが可能であると考えられる。また、石膏の有無によるフレッシュ性状の違いは確認できなかった。

3.2 圧縮強度

バイオマス灰混合率と圧縮強度の関係を図-2 に示す。すべての強度レベルにおいて、材齢 7 日の時点では BFA の混合率および石膏の有無が圧縮強度に及ぼす影響は少なかった。それに対し材齢 28 日以降で石膏を使用しない場合 (以下、石膏無し), BFA 単独の方が FA 単独よりも圧縮強度は高かった。特にセメント使用量の少なかつ

表-6 フレッシュ性状および圧縮強度試験結果

記号	Vf20 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)		
		7 日	28 日	91 日
5-GS-0	296.0	5.5	8.6	10.1
5-GS-25	270.5	3.8	13.4	16.1
5-GS-50	247.0	3.3	18.2	23.5
5-GS-75	200.5	3.2	20.9	25.7
5-GS-100	177.5	3.6	16.1	27.3
5-0	288.0	2.7	4.8	6.3
5-25	257.5	4.4	12.8	16.6
5-50	228.5	4.0	22.0	27.2
5-75	206.0	3.2	24.8	33.4
5-100	157.0	3.1	25.2	30.3
10-GS-0	278.0	9.9	17.4	23.9
10-GS-25	266.0	8.2	25.8	35.0
10-GS-50	240.5	6.2	29.9	41.4
10-GS-75	206.5	6.3	31.2	42.4
10-GS-100	195.0	6.7	21.3	38.3
10-0	270.0	7.8	13.3	19.6
10-25	266.0	10.3	26.8	33.2
10-50	240.5	9.4	30.6	38.6
10-75	206.5	8.1	31.3	40.6
10-100	193.0	7.6	33.0	46.7
15-GS-0	296.0	13.9	31.7	39.0
15-GS-25	271.0	13.5	37.1	44.6
15-GS-50	244.5	10.8	40.5	48.4
15-GS-75	224.5	9.2	37.3	56.3
15-GS-100	186.0	9.5	25.0	51.0
15-0	273.0	11.8	28.0	29.6
15-25	258.0	14.3	37.8	40.2
15-50	240.5	14.7	44.1	50.7
15-75	204.0	12.9	41.9	52.6
15-100	184.0	11.3	40.0	59.3

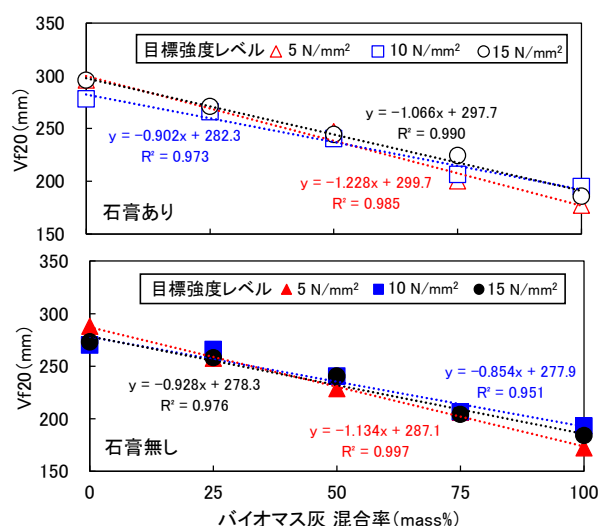


図-1 バイオマス灰混合率と Vf20 の関係

た目標強度レベル 5 N/mm² の水準ではその傾向が顕著であった。これは BFA に多く含まれている CaO が水和物の生成に寄与したことが影響したと考えられ、生成した水和物に関する詳細は後述する。また、多くの水準で BFA の混合率の増加に伴い、圧縮強度も高くなっていた。

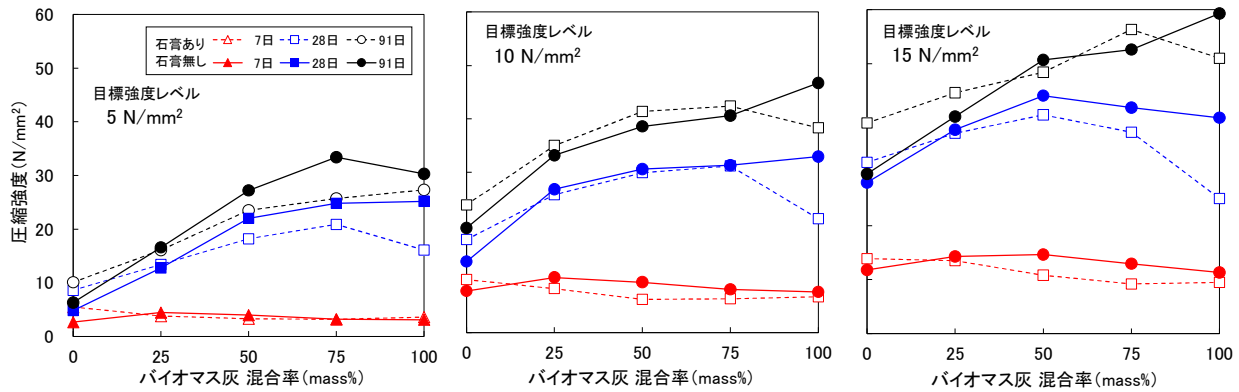


図-2 バイオマス灰混合率と圧縮強度の関係

表-7 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
5-GS-0	0.079	0.086	0.097	0.249	0.222	0.208
5-GS-25	0.112	0.130	0.142	0.184	0.154	0.135
5-GS-50	0.104	0.159	0.176	0.178	0.114	0.089
5-GS-75	0.099	0.175	0.198	0.165	0.067	0.053
5-GS-100	0.106	0.156	0.196	0.151	0.080	0.041
5-0	0.078	0.087	0.088	0.252	0.238	0.235
5-25	0.119	0.149	0.146	0.194	0.142	0.150
5-50	0.113	0.189	0.190	0.192	0.097	0.074
5-75	0.097	0.197	0.193	0.200	0.060	0.036
5-100	0.094	0.198	0.189	0.192	0.071	0.046
10-GS-0	0.118	0.160	0.169	0.156	0.138	0.111
10-GS-25	0.118	0.195	0.213	0.154	0.097	0.053
10-GS-50	0.107	0.198	0.215	0.153	0.078	0.031
10-GS-75	0.109	0.195	0.213	0.140	0.066	0.031
10-GS-100	0.113	0.178	0.191	0.139	0.086	0.030
10-0	0.136	0.152	0.171	0.167	0.124	0.118
10-25	0.166	0.225	0.184	0.123	0.056	0.022
10-50	0.142	0.220	0.210	0.125	0.026	0.030
10-75	0.118	0.213	0.188	0.126	0.041	0.030
10-100	0.131	0.195	0.104	0.129	0.018	0.008
15-GS-0	0.177	0.221	0.218	0.088	0.026	0.016
15-GS-25	0.168	0.198	0.181	0.080	0.018	0.016
15-GS-50	0.146	0.191	0.176	0.091	0.019	0.016
15-GS-75	0.137	0.187	0.170	0.095	0.021	0.013
15-GS-100	0.132	0.181	0.155	0.065	0.038	0.014
15-0	0.200	0.218	0.199	0.083	0.046	0.017
15-25	0.205	0.238	0.166	0.059	0.025	0.012
15-50	0.181	0.211	0.154	0.076	0.018	0.013
15-75	0.153	0.205	0.148	0.104	0.019	0.013
15-100	0.141	0.188	0.130	0.106	0.022	0.013

一方で、材齢 28 日以降で石膏を使用した場合（以下、石膏あり）、BFA の混合率が 50~75% までは FA 単独よりも圧縮強度が高くなっていましたが、それ以上 BFA の混合率が増加すると急激に圧縮強度が低くなっており、石膏無しとは異なる傾向を示した。以上の結果から、石膏を用いた場合では、材齢 28 日以降において一部の水準

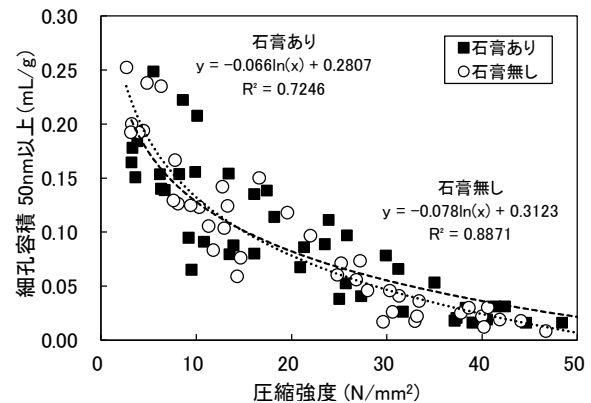


図-3 圧縮強度と空隙量の関係

で FA 単独の方が BFA 単独よりも圧縮強度は高くなっていてのに対し、石膏無しでは、すべての水準において BFA 単独の方が FA 単独よりも圧縮強度は高くなっていました。また、FA 単独では石膏ありの方が石膏無しよりも圧縮強度は高くなるのに対し、BFA 単独では石膏無しの方が石膏ありよりも圧縮強度が高くなる逆の結果となり、多くの水準でバイオマス灰を混合すると、石炭灰単独で確認された石膏による強度増加の効果はほとんど見られなかった。そのため、BFA 単独や混合使用では石膏を用いない方が望ましいと考えられる。実施工の際には取り扱う材料が少ない方が、設備や品質管理も少なく済むため、製造管理の観点から優位になると考えられる。

3.3 空隙構造

空隙構造試験結果を表-7 に、圧縮強度と空隙量の関係を図-3 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¹¹⁾ことが知られている。本試験でも強度レベルや材齢の違いに関わらず全ての水準で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負の相関関係が確認できた。この傾向について、石膏の有無による違いは確認できなかった。そのため、水和物生成量、特に C-S-H 生成量の影響によって圧縮強度に違いが生じたと考えられたため、細孔構造や XRD の試験結果から水和物に関する考察を進めた。なお、材齢 7 日では圧縮強度試験結果に

有意な差が見られなかったことから、以降の検討は材齢 28 日および 91 日について実施した。

細孔直径と細孔容積の関係を図-4 に示す。すべての水準で材齢の経過とともに小さい径の空隙へとシフトしており、水和の進行が伺えた。目標強度 10N/mm² の水準では、FA 単独で 100~数 100nm 程度の毛細管空隙¹²⁾ と考えられる空隙量が大きかった。一方で、BFA 単独で使用した場合、すべての水準で FA 単独とは異なった空隙分布を示していた。混合使用では、BFA の使用量が増えるほど FA 単独よりも小さい径の空隙量が大きくなっていった。この空隙径は数~数 10nm 程度であり、Jennings が提唱する CM-IIモデルにおける、3~12nm の 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¹³⁾ といった空隙径と同じ領域であった。そのため、BFA の使用によって FA を使用した場合よりも、C-S-H が多く生成されていた可能性が示唆された。

BFA 単独では石膏無しの方が石膏ありよりも空隙径が小さくなっていったのに対し、FA 単独では石膏ありの方が石膏無しよりも空隙径が小さくなっており、BFA 単独と FA 単独で逆の傾向を示していた。混合使用では、石膏の有無に関わらず空隙径の分布は同等程度となっていた。空隙分布を比較した各水準で空隙径が小さくなっていることで圧縮強度は高くなる傾向が確認できた。また、この傾向は石膏の有無を比較した場合にも同様であったため、石膏の有無が硬化体の水和生成に影響を及ぼしていたと考えられる。

3.4 XRD

XRD の試験結果を図-5 および表-8 に示す。灰由来と考えられる鉱物として、FA 単独使用の場合では石英、ムライト、BFA 単独使用の場合では石英、オケルマナイトが確認できた。多くの水準でエトリンガイト(C₃A・3CaSO₄・32H₂O) (以下、AFt)、ハイドロカルマイト(C₃A・CaCl₂・10H₂O) (以下、HC) や水酸化カルシウム(Ca(OH)₂) (以下、CH) といった水和物の生成が確認できた。AFt は材齢 28 日で石膏ありではすべてのバイオマス灰混合率で生成がほとんど確認できなかったが、材齢 91 日ではすべての水準で AFt の生成が確認された。BFA 単独で石膏ありの水準のみ HC の生成が確認できなかった。また、CH の減少により HC が増加していることが確認できた。これは、C₃A と CH の反応¹⁴⁾ によって HC が生成されたと考えられる。

セメントには C₃A の活発な水和を抑制し、凝結を制御する目的で粉碎工程において石膏を添加しており¹⁵⁾、その量は SO₃ 量換算で 2.2mass%程度との試算がされている¹⁶⁾。そのため、石膏無しでも、セメント中の石膏の影響で AFt や HC が生成していたものと考えられる。一方で、石膏ありの水準、特に灰自体にも石膏が含まれ

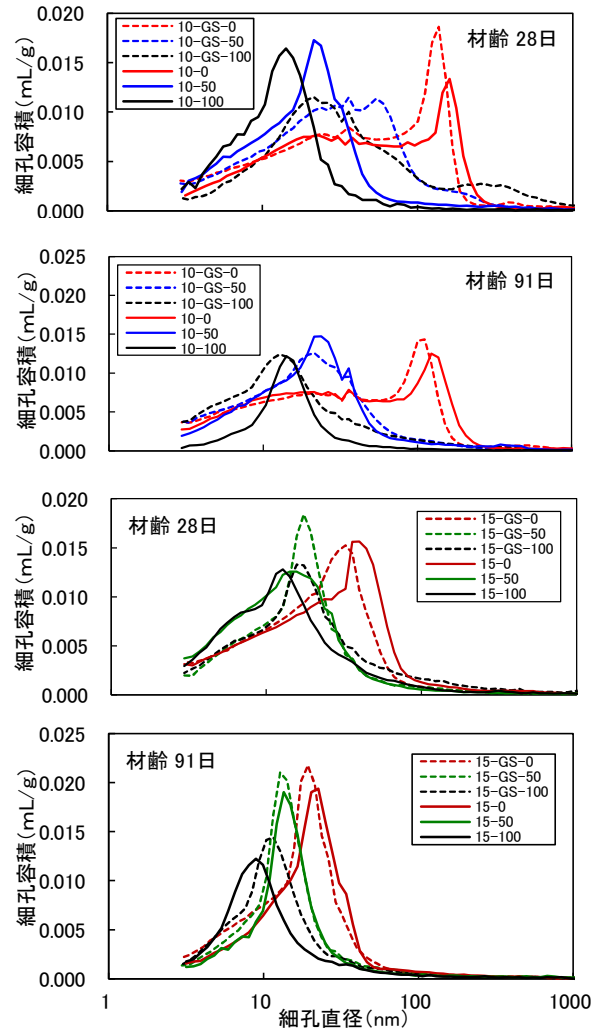


図-4 細孔直径と細孔容積の関係

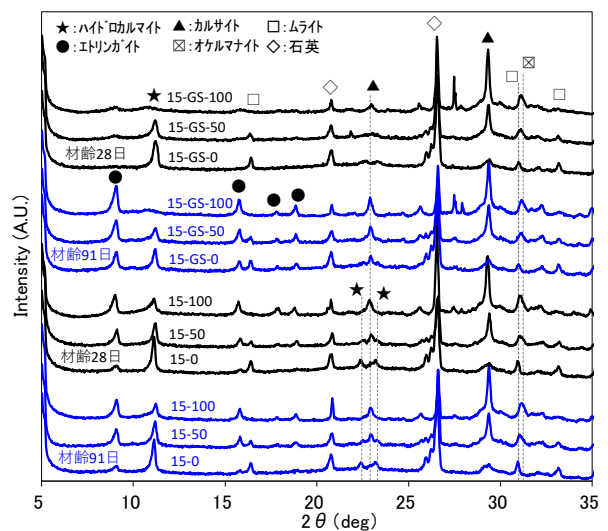


図-5 XRD の試験結果

ている BFA 単独では石膏が過剰となり、水和物の反応が遅れた可能性が考えられる。また、石膏無しではすべての水準で材齢の進行による水和物 (AFt, HC, CH) のピークの変化は無く、ほぼ同等であった。そのため、前述の空隙構造試験結果から材齢の進行とともに C-S-

表-8 XRD の試験結果

石膏	材齢	バイオマス灰混合率(%)					
		0			100		
		0	50	100	0	50	100
		エトリンガイト			ハイドロカルマイト		
あり	28日	—	—	—	○	○	—
	91日	○	○	○	○	○	—
無し	28日	△	○	○	○	○	○
	91日	△	○	○	○	○	○

○：高い強度を確認 △：低い強度を確認

H に起因すると考えられる小さな空隙径が増加していたことも考慮すると、材齢の進行による圧縮強度上昇は、XRD では確認できない非晶質の C-S-H の生成量に依存している可能性が考えられた。C-S-H 含め、水和物の生成についての検討には、更なるデータの蓄積が必要である。

4. まとめ

本論文では、バイオマス灰と石炭灰を大量かつ併用したセメント硬化体の諸物性について、石膏が圧縮強度に及ぼす影響に着目した検討を実施した。本試験では特定のバイオマス灰と石炭灰を使用し、その結果得られた結論をまとめる。

- (1) バイオマス灰と石炭灰を単独で使用した場合のフレッシュ性状から、バイオマス灰と石炭灰を混合利用した際のフレッシュ性状の予測が可能と考えられた。
- (2) 石炭灰を単独で使用した場合、石膏を使用した方が石膏を使用しない場合よりも圧縮強度は高かった。
- (3) バイオマス灰を単独で使用、または石炭灰と混合した多くの水準では、石膏を使用しない方が石膏を使用した場合よりも圧縮強度は高かった。
- (4) バイオマス灰を単独で使用および石炭灰と混合して使用する場合、石膏を使用しないことで製造管理上優位になると考えられた。
- (5) 空隙構造や XRD の試験結果から、石膏の有無の違いが、エトリンガイトやハイドロカルマイトの生成に影響を及ぼしていたと考えられた。
- (6) バイオマス灰を使用した方が石炭灰を使用するよりも C-S-H が多く生成された可能性が示唆された。また、特に石膏を使用しない場合において、C-S-H の生成が圧縮強度に影響を及ぼしたと考えられた。

参考文献

- 1) INTERNATIONAL ENERGY AGENCY : World Energy Outlook 2022, 2022
- 2) Kalair, A., Abas, N., Saleem, M. S., Kalair, A. R. , Khan, N. : Role of energy storage systems in energy transition from fossil fuels to renewables, Energy Storage, Vol.3, Issue.1, No.135, 2020

- 3) Renewable and Sustainable Energy Reviews : Global biomass electricity generation: current status and future prospects, 2017
- 4) Saiki, T, et al. : Development of sustainable biomass plants towards the carbon-neutral society in 2050 , Grand Renewable Energy Proceedings, Vol.2, pp.35-38, 2022
- 5) 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
- 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
- 7) Takagi, R., Saito, A., Sakamoto, M. : Introduction of mass effective utilization technology of coal ash, 4th International Symposium on Concrete and Structures for Next Generation, 2019
- 8) Sasaki, K., Nakama, S., Tian, Q., Guo, B., Wang, M., Takagi, R., Takahashi, T. : Elution characteristics of undesirable anionic species from fly ash blended cement in different aqueous solutions, Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol.9, Issue.3, No.105171, 2021
- 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水和生成物が圧縮強度に及ぼす影響, 第 77 回セメント技術大会講演要旨 2023, pp.196-197, 2023
- 10) 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
- 11) P. Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro : Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, Mc Graw Hill Education, pp.30-32, 2005.9
- 12) R.K.Nwhita, P.J.M.Monteiro : Concrete-Structure, Properties, and Materials, Prentice-Hall, 2013
- 13) 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
- 14) 田原和人, 宮口克一, 盛岡実, 武若耕司 : CaO・2Al₂O₃ を混和した種類の異なるセメント硬化体の水和挙動及び塩化物イオン固定化能力, セメント・コンクリート論文集, 65 巻 1 号, pp.427-434, 2011
- 15) W. E. Haskell : Three factors govern optimum gypsum content of cement, Rock products, pp.108-146, 1959
- 16) 山下弘樹, 山田一夫, 平尾宙, 星野清一 : Al₂O₃ 量が異なるポルトランドセメントの最適なセッコウ量に及ぼす石灰石微粉末の影響, コンクリート工学年次論文集, 18 巻 2 号, pp.103-113, 2007