

# 論文 都市ごみ焼却灰を用いたジオポリマー硬化体の各種性能と有害元素固定能力に関する研究

近藤 瑠星<sup>\*1</sup>・李 柱国<sup>\*2</sup>・池田 攻<sup>\*3</sup>

**要旨:** 本研究では、都市ごみ焼却灰を使用したジオポリマー(GP)硬化体の重金属固定率、強度および可使用時間について考察を行った。飛灰を使用すると、GPの可使用時間が短くなるため、飛灰は発泡体の原料の一部とし、炉底灰は非発泡体の細骨材とした。非発泡体の可使用時間は、炉底灰に含まれる石膏が多いほど短かった。また、非発泡体の強度は、水ガラスを使用すると高強度が得られたが、苛性ソーダを使用すると強度が低下した。発泡体と非発泡体のいずれも焼却灰に含まれるAl, Cr, Cu, Mn, Zn, Pbの6元素を100%近く固定することが確認された。

**キーワード:** ジオポリマー、都市ごみ焼却灰、重金属固定、可使用時間、強度、発泡

## 1. はじめに

今日、廃棄物処分場の逼迫により埋立処分量の削減が求められている。一般廃棄物の最終処分量の75%は焼却残渣であり<sup>1)</sup>、埋立処分量を削減するには、焼却残渣である廃棄物焼却灰の再利用技術の開発が不可欠である。

一般廃棄物が焼却処理されると主灰と飛灰が発生する。飛灰には有害な重金属元素が含まれているため、直接埋立処分することができない。故に日本では、熔融固化、セメント固化、キレート処理および溶媒溶出のいずれかによる中間処理が義務付けられている。しかし、熔融固化の場合は、熔融する際に多大なエネルギーを必要とし、施設の建設費は高い。また薬剤処理の場合は、使用するキレート剤が高価である。従って、飛灰のほとんどがセメントで固化され処分されているが、その重金属溶出抑制能力は他の技術より低い。一方、主灰の再生利用方法としてセメント資源化が挙げられ、普通セメントとエコセメントの製造で使用されている。

一方、セメント産業では石灰石の熱分解により大量のCO<sub>2</sub>が排出されている。エコセメントでも石灰石の使用量が約50%<sup>2)</sup>であるため、他のセメントに比べて少ないが、CO<sub>2</sub>排出量は依然として多い。

GPとはSi<sup>4+</sup>、Al<sup>3+</sup>の溶出能力に優れた活性フィラーがアルカリ溶液の刺激によって縮重合反応を生じ硬化する非晶質のものである。その硬化過程で金属を固定化することができる。また、GPを結合材としたコンクリートのCO<sub>2</sub>排出量はOPCコンクリートの30~60%である<sup>3)</sup>。

既往研究では、焼却主灰と飛灰の両方を使用したGPは、飛灰に含まれる消石灰の影響で凝結時間が短くなり、銀紙由来の金属アルミニウム(Al)がアルカリ環境で発泡

を生じ強度が低下することが分かった<sup>4)</sup>。

発泡反応が生じる飛灰の用途として軽量多孔質GPが考えられる。田らの研究<sup>5)</sup>によって、GP多孔質硬化体の作製はGPの発泡時間と凝結時間をほぼ一致させることが重要であり、また発泡剤としてAl粉末を使用した時の発泡反応は速いことが分かった。故にAl粉末を使用したGP発泡体のフィラー材料として凝結時間の短い飛灰は適していると考えられる。更に飛灰に含まれるAlも発泡反応に寄与するため、発泡剤添加量の削減が期待できる。そこで本研究では、飛灰を使用したGP発泡体と主灰を使用したGP非発泡体をそれぞれ作製し、それらの性能と重金属固定率について考察を行った。

表-1 各種焼却灰の化学組成と密度

灰の種類	BA(2,3月)	BA(6月)	BA(8月)	BA(10月)	GF	
化学組成 (mass %)	SiO <sub>2</sub>	25.88	40.26	31.12	40.06	7.59
	TiO <sub>2</sub>	1.33	1.50	1.71	1.58	1.42
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.29	15.96	17.79	16.03	1.57
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.03	4.24	5.23	4.77	1.29
	MnO	0.21	0.14	0.31	0.22	0.12
	CaO	37.55	24.70	30.00	23.96	37.85
	MgO	1.51	1.68	1.93	1.89	0.36
	Na <sub>2</sub> O	3.22	3.88	4.47	4.17	1.52
	K <sub>2</sub> O	1.61	2.49	1.76	2.22	6.08
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.63	3.30	2.69	2.87	2.27
	SO <sub>3</sub>	0.55	0.34	0.42	0.39	8.39
	Cl	1.15	0.64	0.71	0.66	30.10
	微量元素	1.03	0.88	1.86	1.19	1.56
	Total	99.99	100.01	100	100.01	100.12
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.05	1.95	2.13	2.14	2.42	

[注] BA: 主灰, GF: 飛灰

\*1 山口大学大学院 創成科学研究科 大学院生 (学生会員)

\*2 山口大学大学院 創成科学研究科 教授 博士(工学) (正会員)

\*3 山口大学 名誉教授 理学博士

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

#### (1) 焼却灰

本研究では、一般廃棄物焼却施設から排出された炉底灰(BA)と飛灰(GF)を使用した。BA を使用する前に、開き目の寸法が 4.75 mm のふるいにかけて粗い残渣を除去した。GF は 2018 年 4 月に採取したもの(比表面積 9051 cm<sup>2</sup>/g)を使用し、BA は 2019 年 2, 3, 6, 8, 10 月にそれぞれ採取したものであった。2 月と 3 月に採取した BA は少量であったため、その 2 ヶ月分をよく混合して使用した。表-1 に各種灰の化学組成と密度、表-2 に微量元素、図-1 に結晶化合物の分析結果を示す。化学組成は蛍光 X 線分析装置(XRF)、結晶化合物は X 線回折装置(XRD)によって分析した。また、図-2 に BA の粒度分布を示す。

図-1 より BA の結晶化合物は、ピークの高さにばらつきがあるが、排出時期に拘わらず、石英、曹長石、石膏および加藤柘榴石のピークが見られた。11°C 付近の石膏のピークは、排出時期が古い順に高く、含有量が多いことが分かった。また GF の主要な結晶化合物は、カリ岩塩や岩塩、塩化水酸化カルシウムおよび消石灰由来の Ca(OH)<sub>2</sub> であることが分かった。

#### (2) 活性フィラー

活性フィラーとして高炉スラグ微粉末(GGBFS)と石灰灰(CA)を使用した。GGBFS は JIS 規格 4000 級(密度 2.9 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 4279 cm<sup>2</sup>/g), CA は JIS 2 種フライアッシュ(密度 2.31 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 4392 cm<sup>2</sup>/g)であった。XRF による化学組成の分析結果を表-3 に示す。

#### (3) アルカリ溶液(AA)

本研究では、JIS 1 号ナトリウム系水ガラスを水で 1:1 の体積比で希釈した水溶液(以下、WG と記す)、モル濃度が 10 M の苛性ソーダ水溶液(以下、NH と記す)、WG とモル濃度 14.3M の苛性ソーダ水溶液を体積比 7:3 で混

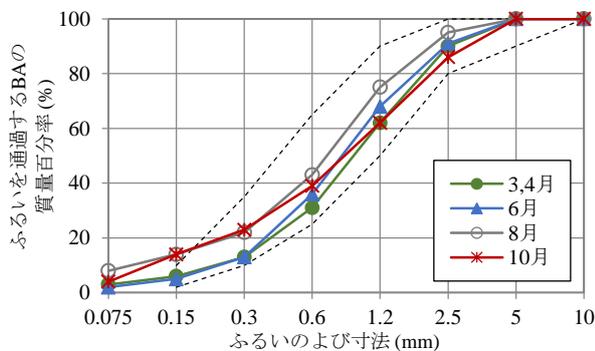
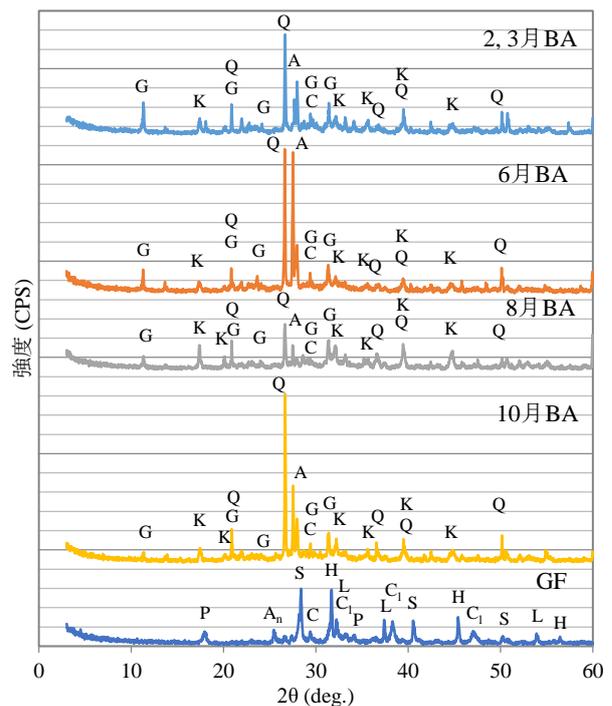


図-2 各種 BA の粒度分布

表-2 各種焼却灰の微量元素 (mass %)

	BA(2,3月)	BA(6月)	BA(8月)	BA(10月)	GF
F	-	-	0.1800	-	-
Cr	0.0447	0.0299	0.0660	0.0367	0.0160
Co	-	0.0051	0.0055	-	-
Ni	0.0112	0.0094	0.0189	0.0129	-
Cu	0.1151	0.0932	0.2540	0.1865	0.0890
Zn	0.3628	0.2895	0.5707	0.3639	0.7759
Ga	-	-	-	0.0018	-
As	-	-	-	-	0.0070
Br	-	-	-	-	0.1227
Rb	0.0075	0.0074	0.0049	0.0065	0.0024
Sr	0.0697	0.0491	0.0558	0.0512	0.0467
Y	0.0109	-	0.0124	-	-
Zr	0.0080	0.0101	0.0104	0.0078	0.0058
Mo	-	-	-	-	0.0317
Nb	-	0.0017	-	0.0020	-
Sn	0.0162	0.0164	0.0362	0.0155	-
Sb	-	-	0.0159	0.0115	-
Ba	0.1396	0.1628	0.2123	0.2050	-
Pb	0.0557	0.0481	0.0837	0.0741	0.1956
Th	-	-	0.0282	0.0049	-

[注] -: 未検出, BA: 主灰, GF: 飛灰



[注] Q: Quartz, SiO<sub>2</sub> 石英; G: Gypsum, Ca(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O) 石膏; K: Kaotito, (CaO)<sub>3</sub>(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>1.75</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>3.75</sub> 加藤柘榴石; C: Calcite, Ca(CO<sub>3</sub>) 方解石; A: Albite, NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> 曹長石; P: Portlandite, Ca(OH)<sub>2</sub> 消石灰; An: Anatase, TiO 鋭錐石; S: Sylvite, KCl カリ岩塩; H: Halite, NaCl 岩塩; L: Lime CaO 酸化カルシウム; Ci: Calcium Chloride Hydroxide, CaCl(OH) 塩化水酸化カルシウム

図-1 各種焼却灰の X 線回折分析の結果

表-3 活性フィラーの化学組成 (mass %)

成分	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	ZnO	PbO	Others
GGBFS	32.68	45.14	13.71	0.37	0.30	4.92	0.63	-	-	-	-	2.25
CA	57.41	3.91	26.06	5.57	1.62	1.10	1.49	0.02	0.01	0.02	0.01	2.78

[注] -: 未検出

表-4 GP 発泡体の調査

シリーズ	N	Z
養生方法	H	
AA	73号	
AA/P	0.5	0.6
GGBFS/P	0.3	
CA/P	0.6	
GF/P	0.1	
Al/P	0.02	
ZS/P	0.00	0.03

[注] H: 高温養生, Al: アルミニウム粉末,  
P: 粉体(GGBFS + CA + GF)

合した水溶液(73号液と略称)のいずれかを使用した。

## 2.2 供試体の作製と養生

本研究では、GFを使用したGP発泡体と、BAを使用したGP非発泡体を作製した。BAは細骨材として使用した。いずれの場合にも、強度試験および溶出試験のため4×4×16 cmの角柱供試体を作製した。またGP発泡体は熱伝導率の測定のため、30×15×16 cmの板状供試体も作製した。

GP硬化体の練り混ぜ方法としては、粉体をモルタルミキサーに投入して60秒間混合し、AAを加え低速で60秒間混合した後に高速で90秒間練り混ぜを行った。

GP発泡体の練混ぜを行う際、整泡剤であるステアリン酸亜鉛(ZS)を使う場合は粉体と一緒に混合し、発泡剤であるアルミニウム(Al)粉末は、AAを加えて60秒混合した後のタイミングで投入した。練り混ぜ直後、型枠に充填し、テーブルバイブレータで締め固めた。

養生は常温養生と高温養生の2つの方法で行った。前者は20°Cの養生槽における気中養生で後者は80°Cで24時間の高温養生後に20°Cの気中養生を続ける方法であった。常温養生では養生開始から24時間後に、高温養生では養生開始から3時間後に脱型を行なった。養生方法に拘わらず、全養生期間においてラップで供試体を封緘した。発泡体と非発泡体の調査を表-4、表-5に示す。

## 2.3 試験項目と方法

### (1) 発泡体の性能試験

発泡体の絶乾密度、吸水率、熱伝導率、強度および重金属固定率を28日材齢にて測定した。熱伝導率は、熱線法で測定し、強度と重金属固定率の測定は、2.3(3)および2.3(4)に記述する方法で行った。

### (2) 可使時間

室温20 ± 2°C、相対湿度55 ± 5%の条件下で非発泡GPの可使時間を測定した。練り混ぜたモルタルを試料容器に入れ、試料面を実験用ミクロスパーテルで垂直にゆっくりと突き刺し、圧痕に液の侵入が認められず、かつ圧痕が明瞭に残るまでの時間を計測し、アルカリ溶液を投入してからの経過時間を可使時間とした。焼却灰を用いたGPの凝結は速く、またGPに適した凝結時間

表-5 GP 非発泡体の調査

シリーズ	養生方法	AA	BAの排出時期	AA/P	GGBFS/P	CA/P	BA/P	
23-40-WG	H	WG	2,3月	0.6	0.4	0.6	1.5	
6-40-WG			6月					
8-40-WG			8月					
10-40-WG	A, H	WG	10月	0.6	0.7	0.3	1.5	
10-40-NH	H							NH
10-70-WG	A, H							WG
10-100-WG								

[注] H: 高温養生, A: 常温養生, P: 粉体(GGBFS + CA)

標準試験法は未だ確立されていないため、本研究ではこのような簡易法で可使時間を測定し、凝結時間の目安値とした。試料容器は、上縁の内径75 mm、下縁の内径85 mm、高さ40 mmの円柱状のものであった。

### (3) 強度

角柱供試体を28日間養生した後、万能試験機で3点法を用い、まず曲げ試験を行った。曲げ試験後、供試体の折片を用いて圧縮強度を測定した。

### (4) 重金属固定率

4×4×16 cmの角柱供試体の半分を粉碎し、20 ± 2°Cの室内で溶出試験を行った。鉄製乳鉢を用い、供試体を0.5 mm以上5 mm以下に粉碎したものをよく混合し、2.0 g採取してサンプルとした。採取したサンプルを40 mLの溶出液と一緒にビーカーに入れ、28 kHzの超音波で10分間の振とうを行った。この時、溶出液の蒸発を防ぐためにラップで上面を密封した。溶出液はフタル酸塩 pH標準液(pH 4.01)、中性リン酸塩 pH標準液(pH 6.86)、苛性ソーダ水溶液(pH 12.5)の3種類であった。超音波による振とうを行った後、JIS P 3801の3種相当で最大孔径10 ~ 15 μmの定性濾紙で濾過して検液を作製した。

超音波による溶出試験方法は、東京都環境局の簡易分析法を参考にした。溶出液に純水を使用し、サンプル質量に対する溶液体積の比(質量体積比)を1/10にして溶出試験を行った場合、pHが大きくなり塩基性に变化したため、本研究では、酸性および中性の溶出液に緩衝液を使用し、質量体積比を1/20にすることにより、pHの変動を抑えた。塩基性環境での溶出液は、溶出後も塩基性であるため、緩衝液を使用しなかった。また標準的な緩衝液である塩酸や氷酢酸などを使用する場合、局所排気装置などが必要となるため、酸性および中性の緩衝液としては前述の溶液を選定した。

検液中の重金属含有量はICP-AESを使用して定量分析した。測定元素は、アルミニウム(Al)、クロム(Cr)、銅(Cu)、マンガン(Mn)、鉛(Pb)、亜鉛(Zn)、ヒ素(As)、セレン(Se)およびカドミウム(Cd)の9元素を対象とした。原料の成分分析で、SeとCdは検出されておらず、BAの分析ではAsも検出されなかったが、環境汚染の観点からAs, Cd, Seの3元素も測定対象とした。ただし、XRFで

検出されなかった元素は固定率を計算できないため、溶出量のみで考察を行った。表-6 に重金属分析の検出下限値を示す。検出下限値は作成した検量線をもとに計算したものである。検出下限値以下の測定値は信頼性が低いため、参考値として使用した。2.0 g の GP 硬化体に含まれる重金属元素量に対する検液中の重金属元素量の割合(百分率)を溶出率とし、100 との差を固定率とした。GP 硬化体中の重金属量は、XRF の測定結果を基に得られた原料中の重金属含有量および各 GP の割合により算出した。

GP 硬化体の脱型と強度試験時に水分が蒸発するため、2.0 g の GP サンプル中の原料割合は、供試体作製時と溶出試験時で若干変化すると考えられる。このため、GP サンプル中の水分が全く蒸発しない場合と、完全に蒸発した場合の重金属固定率をそれぞれ求めた。実際の固定率はこの2つの値の間にある。故に、2つの固定率の中間値によって考察を行った。また、蒸発の有無による固定率の差はいずれの元素においても0.5%未満であった。

### 3. 発泡体性能の実験結果および考察

作製した GP 発泡体の実験結果を表-7 に示す。シリーズ N の密度は、0.498 g/cm<sup>3</sup> であった。ALC などの軽量

多孔質建材の密度は一般的に 0.5 g/cm<sup>3</sup> 以下であるので、密度に関してシリーズ N は、軽量多孔質建材として適している。整泡剤を使用したシリーズ Z は密度が若干高かったが、熱伝導率は小さかった。強度は、両シリーズほぼ同じであった。

シリーズ N の重金属固定率を図-3 に、溶出量を図-4 に示す。Al, Mn, Cu, Pb, Zn では、中性、塩基性環境下の溶出は少なく、固定率は 99.5 % 以上であった。しかし、酸性溶液での溶出は増加し、固定率は若干低下した。Cr は、塩基性溶液での固定率は高かったが、酸性、中性環境では固定率が低下した。As は、塩基性環境下で固定率が 90 % 程度であり、pH が小さくなるほど溶出が増え、酸性溶液では 86 % であった。

整泡剤を使用した発泡体でも、上記の重金属の固定率と溶出率は同じ傾向であったため、紙の都合でその記述を省略させて頂く。

## 4. 非発泡体性能の実験結果および考察

### 4.1 可使用時間

各調査の可使用時間を図-5 に示す。使用した BA 排出時期によって可使用時間が異なることが分かった。GGBFS を粉体の 40 % 使用し、アルカリ溶液に WG を使用した場

表-6 重金属分析の検出下限値 (ppm)

元素	検出下限値	元素	検出下限値
Al	0.079	Mn	0.008
As	0.132	Pb	0.243
Cd	0.007	Se	0.422
Cr	0.016	Zn	0.017
Cu	0.012		

表-7 GP 発泡体の実験結果

シリーズ	N	Z
絶乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	0.498	0.577
吸水率(%)	71.48	96.78
熱伝導率(W/mK)	0.266	0.226
強度(MPa)	曲げ <sup>a</sup>	0.64
	圧縮	1.25

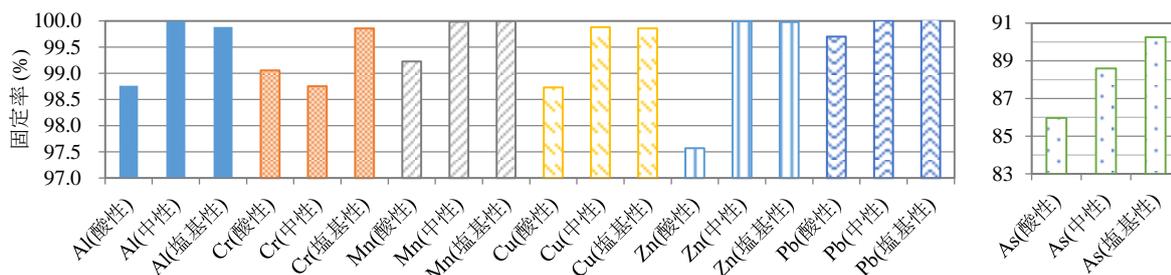


図-3 GP 発泡体の重金属固定率

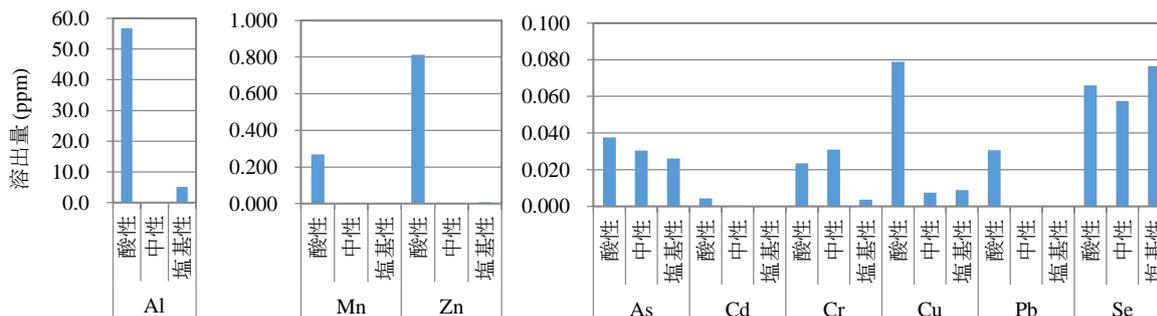


図-4 GP 発泡体の重金属元素溶出量と溶出液 pH の関係

合、BA 排出時期が 2, 3 月, 6 月, 8 月, 10 月の順に可使時間が短かった。XRD 分析結果より、BA に含まれる石膏が、可使時間が短くなった原因であると考えられる。また、GGBFS の割合が高くなるほど、可使時間が短くなること分かった。これは、強アルカリ環境では GGBFS 硬化反応の速度が速いためであると考えられる。

また、アルカリ溶液が NH のシリーズは、WG のシリーズよりも可使時間が短かった。これはアルカリ環境で、灰に含まれる銀紙由来の金属アルミニウムが発泡反応を生じ、 $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$  を生成したことにより、GP の硬化反応が促進されたためであると考えられる。

#### 4.2 強度

GP 非発泡体の強度試験結果を図-6 に示す。アルカリ溶液に WG を使用し、GGBFS を粉体の 40% 使用したシリーズを比較すると、使用した BA の排出時期によ

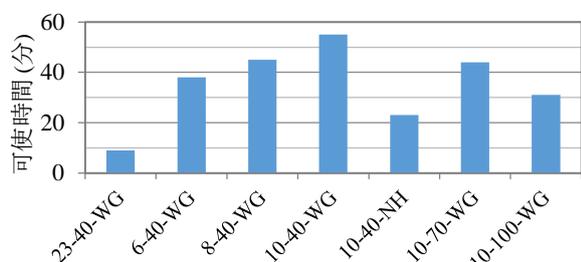


図-5 BA を使用した各 GP 非発泡体の可使時間

って強度が異なった。排出時期が 2, 3 月および 6 月のシリーズでは 35 MPa, 8 月のシリーズでは 44 MPa, 10 月のシリーズでは 50 MPa であり、排出時期が遅いほど強度が大きくなること分かった。可使時間の長短と類似した傾向がみられるが、排出時期により強度が異なった原因については引き続き検討が必要である。

また、GGBFS の混合率の増加につれて強度は増加し、常温養生より高温養生の方が強度は高かった。ただし、GGBFS の混合率が 100% の場合、養生方法による差は小さかった。なお、図-6 に示すように、曲げ強度と圧縮強度の変化傾向はほぼ同じであった。

また、アルカリ溶液が NH のシリーズでは、WG のシリーズに比べて強度が大きく低下した。これは、灰中の

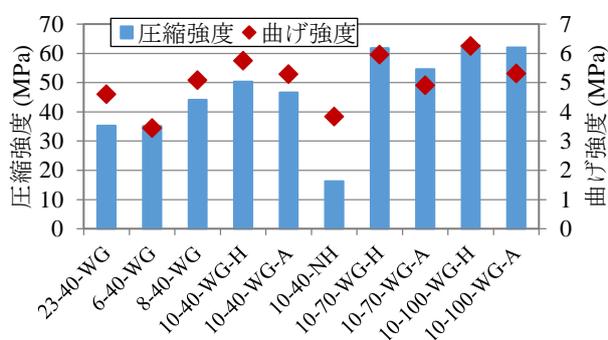


図-6 各 GP 非発泡体の強度

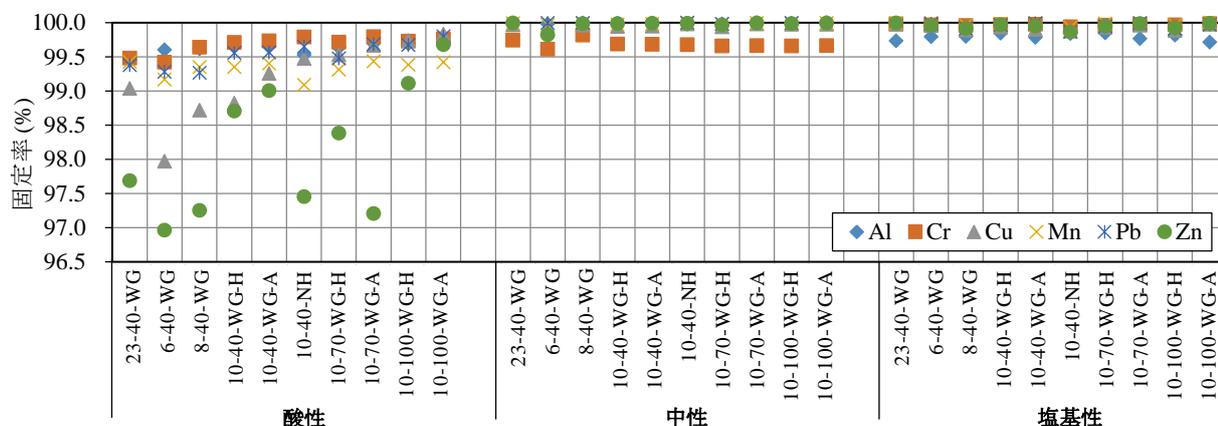


図-7 GP 非発泡体の Al, Cr, Cu, Mn, Pb, Zn 固定率

表-8 GP 非発泡体の Al, As, Cd, Cr, Cu 溶出量 (ppm)

元素 溶出環境 シリーズ	Al			As			Cd			Cr			Cu		
	酸性	中性	塩基性	酸性	中性	塩基性	酸性	中性	塩基性	酸性	中性	塩基性	酸性	中性	塩基性
23-40-WG	22.018	0.366	10.587	0.022	0.004	0.007	0.003	0.000	0.000	0.065	0.032	0.002	0.303	0.010	0.008
6-40-WG	16.287	0.787	8.448	0.025	0.008	0.000	0.001	0.000	0.000	0.050	0.034	0.003	0.522	0.023	0.011
8-40-WG	16.670	0.326	8.753	0.030	0.000	0.004	0.002	0.000	0.000	0.066	0.033	0.008	0.868	0.026	0.074
10-40-WG-H	14.433	0.449	6.332	0.022	0.005	0.009	0.002	0.000	0.000	0.031	0.033	0.003	0.591	0.028	0.033
10-40-WG-A	14.426	0.308	8.871	0.022	0.001	0.005	0.001	0.000	0.000	0.028	0.033	0.002	0.373	0.025	0.051
10-40-NH	19.222	1.047	6.541	0.034	0.016	0.019	0.001	0.000	0.000	0.022	0.034	0.006	0.261	0.010	0.061
10-70-WG-H	13.780	0.734	5.739	0.018	0.009	0.005	0.001	0.000	0.000	0.029	0.035	0.004	0.234	0.030	0.034
10-70-WG-A	11.602	0.094	8.910	0.008	0.005	0.002	0.001	0.000	0.000	0.021	0.034	0.003	0.166	0.010	0.020
10-100-WG-H	10.818	0.401	6.464	0.020	0.001	0.006	0.000	0.000	0.000	0.026	0.033	0.003	0.128	0.012	0.055
10-100-WG-A	9.504	0.104	10.054	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.023	0.032	0.001	0.082	0.011	0.013

表-9 GP 非発泡体の Mn, Pb, Se, Zn 溶出量 (ppm)

元素 溶出環境 シリーズ	Mn			Pb			Se			Zn		
	酸性	中性	塩基性									
23-40-WG	0.343	0.005	0.005	0.099	0.000	0.000	0.035	0.032	0.033	2.239	0.005	0.007
6-40-WG	0.378	0.015	0.002	0.100	0.001	0.002	0.035	0.026	0.023	2.360	0.137	0.034
8-40-WG	0.519	0.011	0.030	0.170	0.001	0.020	0.026	0.018	0.018	4.158	0.020	0.128
10-40-WG-H	0.401	0.017	0.010	0.092	0.000	0.007	0.039	0.021	0.031	1.259	0.015	0.032
10-40-WG-A	0.370	0.012	0.007	0.090	0.000	0.002	0.047	0.008	0.025	0.967	0.010	0.051
10-40-NH	0.561	0.005	0.044	0.073	0.000	0.029	0.016	0.022	0.022	2.462	0.010	0.133
10-70-WG-H	0.458	0.015	0.011	0.105	0.003	0.012	0.038	0.021	0.018	1.557	0.031	0.052
10-70-WG-A	0.377	0.004	0.003	0.063	0.000	0.002	0.019	0.020	0.012	2.687	0.005	0.014
10-100-WG-H	0.444	0.009	0.023	0.064	0.001	0.017	0.031	0.007	0.010	0.846	0.014	0.072
10-100-WG-A	0.417	0.003	0.002	0.039	0.000	0.005	0.012	0.022	0.019	0.308	0.004	0.010

金属アルミニウムの発泡反応により、供試体の空隙率が増加したためであると考えられる。

### 4.3 重金属固定率

GP 非発泡体の Al, Cr, Cu, Mn, Pb, Zn の 6 元素の固定率を図-7 に示す。6 元素の固定率はいずれも、中性および塩基性環境では 99.5% 以上であった。酸性環境の溶出は増加し、若干固定率が低下したが、全体として 96.5% 以上であった。

重金属溶出量を表-8 と表-9 に示す。溶出液の pH による重金属元素の溶出挙動は、図-3 と図-4 で示した発泡体の溶出試験の結果とほぼ一致している。As, Se および Cd についてはいずれも表-6 に示した検出下限値以下であったため、溶出量は少なかったと考えられる。しかし、環境基準値はいずれも 0.01ppm と定められており、またセメント固化等の技術と比較するために、今後は精度高い分析が必要である。

## 5. まとめ

本研究では、廃棄物焼却炉底灰と焼却飛灰を使用したジオポリマーの可使時間、強度、重金属固定率などについて考察を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 活性フィラーの 10 % を都市ごみ焼却飛灰で置換し、金属アルミニウムの発泡剤を使用すると、GP 発泡体を作製することができる。
- (2) 細骨材として BA を使用した GP 非発泡体は、BA に含まれる石膏の影響で凝結が速い。BA 中の石膏が少ない場合でも、アルカリ溶液として苛性ソーダ水溶液を使用すると、焼却灰に含まれる銀紙由来の金属アルミニウムの発泡反応が GP の硬化反応を促進するため、凝結が速くなる。
- (3) BA の排出時期によって GP 非発泡体の強度は異なり、アルカリ溶液として水ガラスを使用した場合、強度が 35 MPa ~ 50 MPa 程度であった。しかし、BA 排出時期による強度の差異の原因については引き

続き検討が必要である。

- (4) Al, Cr, Cu, Mn, Pb, Zn の 6 元素は発泡体と非発泡体の調合に拘わらず固定率は 100 % に近く高かった。
- (5) As の固定率は、飛灰を用いた発泡体の場合、溶出環境によって異なり 86 ~ 90 % であったが、炉底灰を用いた非発泡体の場合は確認できなかった。
- (6) 溶出試験に使用する溶出液の水素イオン濃度によって、重金属元素の溶出量が異なり、Cr と Se 以外は酸性溶液を使用した場合、溶出量が増加した。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、山口大学工学部感性デザイン工学科の林舜也氏に協力して頂きました。また、三光株式会社から、焼却灰の提供をして頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 飯野成憲：「都市ごみ焼却残渣のセメント原料化の最適化に向けて」、廃棄物資源循環学会誌, Vol.29, No.2, pp.168, 2018
- 2) 飯野成憲, 小泉裕靖, 辰市祐久, 寺嶋有史：「エコセメントに関する技術情報調査」、東京都環境科学研究所年報, pp.1-2, 2017
- 3) 李柱国：ジオポリマーコンクリートの環境影響に関する定量的考察、「建設分野におけるジオポリマー技術の現状と課題」に関するシンポジウム論文集, pp.44-50, 2016.6
- 4) 近藤瑠星, 李柱国, 池田攻：廃棄物焼却灰を使用したジオポリマー硬化体に関する研究, 2018 年度日本建築学会中国支部研究報告集, Vol.42, pp.1-4, 2019
- 5) 田青, 李柱国：ジオポリマー系軽量耐火被覆材料に関する基礎研究, 2015 年度日本建築学会中国支部研究報告集, Vol.39, pp.41-44, 2016.3