加熱改質処理をしたフライアッシュの特性と品質変動について

VARIATIONS IN QUALITY CHARACTERISTICS OF FLY ASH MODIFIED BY THERMAL PROCESSING

佐藤嘉昭 — * 1 大谷俊浩 — * 2
秋吉善忠 — * 3 清原千鶴 — * 4

Yoshiaki SATO — * 1 Toshihiro OTANI — * 2
Yoshitada AKIYOSHI — * 3 Chizuru KIYOHARA — * 4

キーワード：
加熱改質フライアッシュ, 未燃カーボン, 強熱減量, 品質変動

Keywords:
Modified fly ash (MFA), Unburned carbon, Loss on ignition, Variation in quality characteristic

Modified fly ash (MFA) is defined as FA treated by thermal processing. It is well known that excessive unburned carbon adversely affects the air entrainment performance of concrete. MFA has a consistent LOI of 1% or less. First, the characteristics of unburned carbon in FA and the quality of FA before and after thermal processing were studied, and then, the quality variation of MFA collected periodically were investigated. It was found that MFA with uniformity of characteristics can be produced stably, and one of the obstacles in the promotion of effective utilization of FA seems to have been overcome.

1. はじめに

石炭専焼火力発電所で生産される石炭灰の大半を占めるフライアッシュ (Fly Ash, 以下 FA) はコンクリートの品質向上に寄与する混和材料として古くから認知されている^{1)~3)}。FA をコンクリートに混和した場合, 最も効果が期待できるのはポゾラン反応で, 非常にゆっくりとした反応ではあるが長期間にわたって継続し, コンクリート組織が緻密化される。FA を混和していないコンクリート (以下, 基準コンクリート) と比較して長期強度や耐久性は向上し, FA はコンクリートを経年強化する混和材料と言える。このように, FA は耐久性のある長寿命のコンクリート構造物を建造する場合は非常に魅力的な混和材料の1つで, JIS 規格 (JIS R 5213「フライアッシュセメント」, JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」) が制定されているものの, 広く一般に普及しないまま今日に至っている。その理由として, FA の特性評価, 市場能力, 規格, 仕様, 規制, 一般の認識などに関して問題があることが指摘されているが⁴⁾, その中でも FA の質と量に関する一貫性の欠如は世界共通の課題となっている。

FA の品質で特に問題となっているのは FA 中に含まれる未燃カーボン量が使用する石炭の種類や発電時における燃焼温度の影響などによって変動するため, 常時一定の品質の FA を生産できないことである。そこで, 筆者らは確実に未燃カーボンを除去できる方法について試行錯誤を重ねた末, カーボンの自然性に着目した焼成処理装置の実用化システムの開発に取り組み, JIS 規格の高品質な加熱改質フライアッシュ (Modified Fly Ash, 以下 MFA) の製造方法を確立した⁵⁾。MFA とは, FA に含まれる未燃カーボンが現在流通している JIS 規格の FA よりも少ない, 強熱減量が 1.0% 以下の高品質な FA のことである。以下では, FA に含まれる未燃カーボンの影響と加熱改質前後

の FA の品質特性並びに定期的に採取した MFA の品質変動について報告する。

2. FA の品質特性

コンクリート用 FA は JIS A 6201 に規定される試験方法により表 1 に示すように I 種から IV 種に分類されているが, ここで対象とする MFA は JIS II 種相当である。FA の品質規定項目は, 二酸化ケイ素, 水分, 強熱減量, 密度, 粉末度, フロー値比および活性度指数である。FA に含まれる未燃カーボン量については強熱減量 (Loss on Ignition, 以下 LOI) で評価するのが一般的に行われているが, 既往の国内および国外の文献データから得られた LOI と炭素の関係を図 1 に示す。炭素量は, 炭素分析装置を用いて測定された値である。この図によれば, 両者には良い相関性があり, 炭素量は図中に示す直線式で表すことができる。LOI は炭素量よりも 2 割程度高い値を示しているが, これは, LOI が有機炭素の燃焼によるものだけでなく, 無機炭酸塩の脱炭酸, 物理的・化学的に結合した水の脱離, 硫酸や鉄鉱物の酸化などの他の反応によるもので, LOI は有機炭素の量を過大評価する可能性

表 1 JIS A 6201 におけるフライアッシュの品質

	I 種	II 種	III 種	IV 種
二酸化ケイ素 (%)	45.0 以上			
水分 (%)	1.0 以下			
強熱減量 (%)	3.0 以下	5.0 以下	8.0 以下	5.0 以下
密度 (g/cm ³)	1.95 以上			
粉末度	45μm 以下の残 (%) (編みふるい方法)	10 以下	40 以下	40 以下
	比表面積 (cm ² /g) (ブレン方法)	5000 以上	2500 以上	2500 以上
フロー値比 (%)	105 以上	95 以上	85 以上	75 以上
活性度指数 (%)	材齢28日	90 以上	80 以上	60 以上
	材齢91日	100 以上	90 以上	70 以上

¹⁾ ㈱ゼロテクノ 代表取締役 (大分大学 名誉教授)・工博
(〒870-0024 大分市末広町1丁目5-16 ユナイテッド末広ビル4F)

²⁾ 大分大学理工学部創生工学科建築学コース 教授・博士 (工学)

³⁾ 大分大学理工学部創生工学科建築学コース 助教・博士 (工学)

⁴⁾ 東京理科大学工学部建築学科 助教・博士 (工学)

¹⁾ President of Zerotechno Co., Ltd. (Emeritus Prof. of Oita Univ.), Dr.Eng.

²⁾ Prof., Division of Arch., Dept. of Innovative Eng., Faculty of Science and Technology, Oita Univ., Dr.Eng.

³⁾ Research Assoc., Division of Arch., Dept. of Innovative Eng., Faculty of Science and Technology, Oita Univ., Dr.Eng.

⁴⁾ Research Assoc., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr.Eng.

図1 強熱減量と未燃カーボン量の関係

図2 平均粒径とブレン比表面積の関係

図3 空気量に及ぼす強熱減量の影響

表2 未燃カーボンの除去方法の比較

方法	概要
空気分級 (Air Classification)	- 遠心力を使用して灰分の粗い粒子を除去しFAの細かさを選択的に分離，分離効率はFA中の未燃カーボンの粒度分布に大きく依存 - LOIの低減には常に効果があるわけではなく，一貫性は低い - 高炭素含有量の粗い灰を生成，多くの場合埋立て処理が必要 - 比較的資本コストが低く，メンテナンスコストが低い
静電分離 (Electrostatic Separation)	- 炭素粒子と他の灰粒子の間の電子親和性の違いを利用，粒子の帯電は「粒子間接触」または「摩擦帯電」によって達成 - 原料FAのLOIは5～15%，目標とする改質FAのLOIは2～5% 25%以上の廃棄物を生成，廃棄処理が必要 - 効率は湿気によって影響を受け，プロセスへの供給には乾燥が必要 - 熱処理と比較して設備関係のコストは低い
泡沫浮選 (Froth flotation)	- 原理は気泡が特定の粒子表面に選択的に付着する能力に基づく - 炭素質粒子の浮遊性を向上させるために使用される集塵剤，発泡剤，分散・減圧剤，促進剤などの試薬が必要 - 新生灰だけでなく埋立て地に貯留されている既成灰にも適用可 - ボゾランとして使用する場合は，処理したFAの熱乾燥が必要
熱処理 (Thermal Processing)	- FAからUCを除去する最も効果的な方法，熱処理の過程でアンモニアを脱着 - FAの細粒化や均一性を向上，LOIが低い灰を生成 - 投入されたFAのすべてが資源化 - FAに含まれる未燃カーボンの自然温度に到達した後は補助燃料は必要ないが，設備規模にもよるが除去技術の中で最も高価

が示されている⁶⁾。

図2は既往の文献で報告されているFAの平均粒径とブレン比表面積の関係を整理したものである⁷⁾。平均粒径が小さいほど比表面積が大きくなる傾向があることが分かる。ばらつきはあるものの，比表面積は図に示す式でほぼ表すことができる。なお，図中には後述する方法で製造したMFAの平均粒径とブレン比表面積の関係もプロットされているが，近似曲線を用いて十分に表すことができる。

3. 未燃カーボンの影響

コンクリートの良好な作業性や空気連行剤の添加量はFAの未燃カーボン量の影響を受ける。図3は筆者らが実施したFAのLOIがコンクリートの空気量に及ぼす影響に関する実験結果を示している。基準コンクリートの目標空気量を4.0%として，同一の調査，すなわち，AE減水剤や空気連行剤の使用量を同一にして，強熱減量を調整したFAをセメント質量の10%混和した場合の空気量を測定した結果である。使用した原粉FAは強熱減量がFA-1:7.7%，FA-2:5.1%，FA-3:3.9%，FA-4:7.92%の4種類で，それぞれマッフル炉を使用して強熱減量を適当に調整した。図によれば，未燃カーボンがAE減水剤や空気連行剤を吸着するため，強熱減量が多いFAを混和したコンクリートは空気を連行しにくく，強熱減量が1～3%の間で空気量は大きく変動すること，一方，1%を下回るようになれば空気量の変動も小さくなり，0.5～0.8%であれば安定した値を示すようになる。このことから，強熱減量が高くても常に一定の範囲内にある強熱減量のFAを用いることができれば問題ないが，強熱減量が5%以下と規定されているJIS

規格品のFAであっても，未燃カーボン量の僅かな変動が空気量の管理を困難にしていることは明らかである。このような傾向について，R. L. Hillら⁸⁾も同様な実験結果を引用しているが，同じLOIでもFAが異なると必要な空気量の生成に関連するパフォーマンスも異なる可能性があること，そして，より微細粒子の未燃カーボンを含む場合はLOIが低くても空気の連行に大きな影響を与える可能性があることを示唆している。また，川上らの研究⁹⁾によれば，FA中の未燃カーボン量が増加するほど分散剤吸着量は直線的に増加することやFAを500℃で3時間熱処理すればほとんどの未燃カーボンを除去できること，脱炭素処理したFAを混和したセメントペーストの流動性は向上することが報告されている。このように，強熱減量を1%以下にすれば，図1の関係から分かるように，FAに含まれる未燃カーボン量はかなり低減されて，コンクリートの空気量の変動にほとんど影響を与えないと考えられる。

牧田ら¹⁰⁾はFAの未燃カーボン量がコンクリートのスランプと空気量の経時変化に及ぼす影響に関する実験を行い，スランプについても，基準コンクリートと比較して，FAに含まれる未燃カーボン量が多いほどスランプロスが大きくなる傾向を示すことを報告している。

一般に，微細でよく分散された空隙システムはコンクリートの凍結融解抵抗性を確保するために必要とされているが¹¹⁾，それだけではなく，空気量はワーカビリティの改善やブリーディングの抑制，単位水量や単位セメント量の低減のために必要である。また，FAを混和したコンクリートのアルカリシリカ反応において空気量が膨張量に及ぼす影響に関する実験結果が示されているが¹²⁾，アルカリシリカ反応による膨張に対する空気連行の影響を研究したA. D. Jensenら¹³⁾は約4%の空気を連行することで，平均して膨張率が約40%減少したことを報告しており，適切な空気量はアルカリシリカ反応による膨張量の抑制に必要なことが分かる。

4. 未燃カーボンの除去方法

4.1 除去方法の比較

FAから未燃カーボンを除去する方法として様々な技術が提案されているが，空気分級，静電分離，泡沫浮選および熱処理の4つの技術が商業規模のアプリケーションに適したものとされている^{14)～18)}。それぞれの長所と短所をまとめて示したものが表2である。その他に，回分式振動流動層による密度分離¹⁹⁾や破碎分級・自然灰還元法²⁰⁾などが提案されているが，実用化には至っていない。

4.2 MFA製造のための加熱改質装置

図4 加熱改質装置の概要

原粉	1000℃	950℃	900℃	850℃	800℃	750℃	700℃
FA1(LOI:7.61%)							
FA2(LOI:5.95%)							
FA3(LOI:3.90%)							

図5 加熱温度によるFAの色の变化

図6 FAのカーボンブリーディング

図7 FAの明度並びにa*と強熱減量の関係

図8 加熱改質前後のSEM画像

図4は筆者らが開発した加熱処理装置の概略図と写真である。原粉FAは加熱処理によってMFAへと改質される。加熱改質装置は、加熱帯・均熱帯・冷却帯の3つのゾーンを有していることが特徴であり、加熱帯で未燃カーボンが自燃するまで加熱（約600℃程度）し、この自燃作用を利用して焼成を行う。自燃とは、「点火された可燃物が補助燃料なしで燃焼を持続する現象」と定義されており、自燃開始後は加熱する必要はなく、むしろ、800～900℃の温度範囲にコントロールすることが重要となり、熱暴走を防ぐ必要がある。1000℃以上になるとFAは軟化を始め、また、FAが備えている最も優れた特性の1

つであるボゾラン反応性が失われることが指摘されており（後述の図10参照）、900℃を超えるような高温領域まで加熱しないように冷却帯を備えている。最終的に強熱減量が1.0%以下に低減されたJIS規格のⅡ種灰に相当するMFAを製造することが可能で、投入した原粉FA中のFA全量をMFAとして再資源化できることになる。

図5は原粉FAを700℃から1000℃まで所定の温度で加熱した時の色の变化を示している。強熱減量の違いによって原粉FAの色はかなり異なることが分かる。FA-1に比べてFA-2とFA-3は少し赤みを帯びた色になっているが、これはFAに含まれる鉄分の量が影響している²¹⁾。

4.3 加熱処理のメリット

図6は、FAに含まれる未燃カーボンが卓上パイプグラの加振によって表面に浮き上がってくる様子を示したものである。基準モルタルと原粉FA（強熱減量5.23%）および強熱減量が0.79%のMFAを混和したモルタルの場合の比較であるが、基準モルタルとMFAモルタルの場合は未燃カーボンの浮きは認められないが、原粉FAを混和した場合は多くの未燃カーボンが表面に浮き上がっていることが分かる。この現象はカーボンブリーディングと呼ばれている²²⁾。

図7は原粉FAとMFAの色を色差計を用いて測定した結果である。L*は0（黒）から100（白）までの明度（白さ）を表し、a*はプラス側の値になれば赤っぽい色を示し、マイナスの場合は緑っぽい色を示す。L*の図からは、MFAに含まれる未燃カーボンが少なことから明度としては大きな値を示し、白っぽくなっている。a*については加熱処理後の方がプラス側の値となり、少し赤みかかった色を示すようになる（図5参照）。コンクリート製品の場合は特に表面の色の白さが求められることが多く、MFAの混和によって、混和量にもよるが、色が白くなることが期待できる。なお、FA中の未燃カーボンが多い場合、その色は黒いと考えられてきたが、未燃カーボン量とFA全体の色とは必ずしも単純には結びつかず、FAの色は未燃カーボンの粒度分布や存在状態によって決まることが明らかにされている²³⁾。

加熱処理のメリットはFA中の未燃カーボン量の低減だけではない。FAの搬送や貯蔵の際にFAが徐々に固化し、場合によっては排出が困難になるという事例が報告されていて、この原因はFA中に存在するSO₃で、この量が多くなると固結しやすくなることが明らかになっている^{24), 25)}。後述するように、FAの加熱処理によって硫黄分が除去されることから固結は発生しにくくなる。また、火力発電所から発生する窒素酸化物（NO_x）の抑制対策としてアンモニアが利用されることが多いが、過剰のアンモニアがFAに吸着され（アンモニアスリップという現象）、このようなアンモニアに汚染されたFAをコンクリートに混和した場合、コンクリートからはアンモニアが発生する。高温でFAを処理することによってアンモニアは脱着されることが確認されており^{26), 27)}、加熱処理にはコンクリートからのアンモニア臭を低減する効果が期待できる。

5. 加熱改質前後のFAの品質特性

加熱処理前後のFAの品質特性を比較するため、JIS規格に準じて試験を行った。同時に、SEM画像の撮影、レーザ回折式粒度分布測定装置による粒度分布の測定および蛍光エックス線分析装置による化学成分の特定を行った。

図8は加熱改質前後のSEM画像で、多孔質の未燃カーボンが除去

図9 粒度分布

図10 FAのガラス化率

図11 加熱処理前後の強熱減量と密度の変動

図12 加熱処理前後のFAの品質特性

図13 加熱処理前後の強熱減量とSO₃量およびFe₂O₃量の関係

図14 加熱処理前後の平均粒径とレーザ比表面積の関係

されて球状の粒子となっていることが分かる。図9は加熱改質前後の粒度分布の測定結果を示している。これによれば、加熱改質前後で大きな差はなく、累積表示50%の位置での平均粒径は15μm程度で、

MFAの方が若干小さくなっている。図中には普通ポルトランドセメントの粒度分布も示しているが、MFAはそれよりも若干小さい。

図10はXRD回折/リットベルト解析により得られた各試料の鉱物組成の測定結果の一例である。MFAの非晶質成分の測定結果で、800℃で焼成した場合と1000℃で焼成した場合の結果も併せて示している。非晶質の定量値がガラス化率に相当する。これによると原粉FAよりもMFAの方がガラス化率は高く、加熱処理によって失透することはない。また、焼成温度が高くなるにつれてガラス化率が小さくなることが分かる。1000℃の場合のガラス化率は原粉FAよりも小さく、高温になると非晶質成分が失われるようになる。

図11は強熱減量と密度の変動を試料ごとに示した図である。強熱減量は全て1%以下に制限されている。加熱処理後の密度は多孔質の未燃カーボンが除去されるため若干大きくなっていることが分かる。

図12は加熱処理前後のフロー値比と活性度指数との関係を示している。フロー値比は加熱処理によって若干大きくなっていることから流動性が改善されていることが分かる。活性度指数については材齢28日の場合、両者はほぼ同じような値を示しているが、材齢91日では加熱処理前のFA(原粉FA)の方が若干大きくなった。

図13は化学成分であるSO₃とFe₂O₃を強熱減量との関係で示している。前述したように、SO₃は貯蔵時の固結に影響するもので、加熱処理によって大きく低減されている。また、加熱処理することによってFe₂O₃の量が若干大きくなり、これはFAの色に影響を与えている。

図14は平均粒径とレーザ比表面積の関係を示している。これによると、両者の関係は加熱処理の有無にかかわらずほぼ1本の曲線で表すことができる。

6. 加熱改質フライアッシュ(MFA)の品質変動

強熱減量1%以下のJISⅡ種相当のMFAを定期的に採取し、その品質変動の状況を調査することにした。なお、MFAの原材料であるFA原粉は大部分市内の同一の石炭火力発電施設で産出されたものを使用しているが、常に同じ炭種の石炭を使用している訳ではない。

図15は、JISの規格値であるSiO₂、強熱減量、密度、ブレン比表面積、フロー値比および活性度指数について、ある2年間の各月における代表値を示している。図中にはそれぞれの規格値の値も示されているが、MFAとしての規格値は強熱減量についてのみ1.0%以下としている。これらによると、SiO₂は55.7~73.6%、強熱減量は0.4~1.0%、密度は2.19~2.35g/cm³、ブレン比表面積は3810~4890cm²/g、フロー値比は98~111%、活性度指数は材齢28日で80~85%、材齢91日で91~100%、の範囲にあった。若干の変動はあるものの、十分に品質の安定したMFAを製造できることが分かる。

活性度指数について、全国の火力発電所のFAⅡ種品の出荷データを調査した石川ら²⁸⁾は、材齢28日の活性度指数の平均値は84%で80~83%の間に全データの5割以上が集中した分布となっていること、すなわち、JIS規格外品が半数以上存在していたことが推察される左側に偏った分布をしていること、一方、91日の場合の平均値は97%でほぼ正規分布をしていることを報告している。MFAの活性度指数の分布を図16に示すが、材齢28日の活性度指数の平均値は82%、91日は96%で、分布形状は上記とほぼ同じような傾向を示していることが分かる。このような現状から、28日活性度指数のJIS規格値については今後見直しが必要であると考えられる。

図 15 MFA の品質変動

図 16 MFA の活性度指数

表 3 フライアッシュの品質変動の比較

種類	品質項目	SiO ₂ (%)	強熱減量 (%)	密度 (g/cm ³)	ブレン比表面積 (cm ² /g)	フロー値比 (%)	活性度指数 (%)	
							材齢28日	材齢91日
筆者ら (MFA)	平均値	63.3	0.66	2.24	4213	104	82	96
	標準偏差	4.96	0.15	0.05	266	3.6	1.8	2.4
江藤ら ²⁹⁾	A-1 平均値	57.6	1.77	2.28	3530	108	89	105
	A-1 標準偏差	4.93	0.62	0.05	114	2.6	4.3	4.3
	A-2 平均値	59.4	2.30	2.23	3528	102	88	99
	A-2 標準偏差	6.80	0.65	0.06	415	4.5	5.2	5.2
船本ら ³⁰⁾	B-1 平均値	59.6	1.90	—	3831	105	82	97
	B-1 標準偏差	4.50	0.50	—	120	2	2	4
	B-2 平均値	60.5	1.40	2.30	3830	106	84	99
	B-2 標準偏差	4.80	0.50	0.05	175	3	3	4
黒田ら ³¹⁾	B-3 平均値	57.6	1.77	2.28	3530	108	89	105
	B-3 標準偏差	4.9	0.62	0.05	114	3	4	5
	C-2 平均値	59.1	1.3	2.33	3972	109	89	104
	C-2 標準偏差	2.6	0.34	0.03	82	1.4	2.9	4.4
砂川 ³²⁾	D 平均値	58.2	2.48	2.37	4438	106	86	99
	D 標準偏差	3.59	0.46	—	205	—	—	—
参納ら ³³⁾	E-1a 平均値	67.6	2.10	2.24	3730	100	83	95
	E-1a 標準偏差	1.90	0.40	0.05	204	1	2	3
	E-1b 平均値	57.3	2.00	2.40	4710	107	97	109
	E-1b 標準偏差	4.10	0.30	0.05	198	2	7	6
	E-2a 平均値	64.40	3.60	2.22	3780	101	82	96
	E-2a 標準偏差	3.00	0.50	0.02	225	2	2	2
	E-2b 平均値	63.60	3.50	2.29	4660	102	94	107
	E-2b 標準偏差	1.70	0.30	0.01	122	2	7	6

表 3 は国内の火力発電所で採取された FA^{29, 30), 33)} や実施に用いられた FA^{31), 32)} と MFA の品質特性 (各物性値の平均値と標準偏差) を比較したものである。図 17 では表 3 の項目の強熱減量と 91 日活性度指数について棒グラフとして示している。これらによれば、MFA の品質変動については他の FA と比較してそれほど大きく変わることはないが、MFA の強熱減量を 1% 以下に制限したことで、その変動幅は極めて小さく、安定した品質の MFA を製造できていることが分かる。

MFA の化学成分については可能な範囲で測定を行い、その結果を図 18 に示すような、SiO₂、Al₂O₃ およびその他の成分 (含む強熱減量) の三角図として示した。図中には、参考までに国内の実験データと国外の実験データ (ASTM の分類で Class F と Class C に分けて表示) をプロットしている。FA 中の成分は使用する石炭の鉱物や相、また

図 17 FA の品質変動の比較 (強熱減量と 91 日活性度指数)

図 18 MFA の化学成分 (三角図)

燃焼中および輸送・貯蔵中に新しく形成された鉱物および相に分類できることから、同一産地の石炭を用いても FA の化学組成は大きく変動することが指摘されている³⁴⁾。MFA については、主要成分である SiO₂ は 54.1~76.5%、Al₂O₃ は 14.9~28.8%、Fe₂O₃ は 1.6~6.8% の範囲にあった。

7. まとめ

原粉 FA を加熱改質処理した FA (MFA) について、加熱前後の品質を比較し、JIS 規格 (JIS II 種相当) に対する MFA の品質変動について整理した。MFA の品質については、コンクリートの空気量やスランブの安定性に最も影響を与える強熱減量を 1% 以下に制限し、それ以外の規格値については JIS に準じた。その結果、一定の品質の MFA を安定的に製造できることが分かり、FA 普及における課題の一つは克服できたものと思われる。品質の安定した MFA を用いることで、均一で品質の良いコンクリートを安定して打設することができるよう

になることから、ユーザーにとっては非常に扱いやすい混和材料に生まれ変わったと言える。

8. あとがき

MFA コンクリートの施工実績も徐々にではあるが蓄積されてきているが、FA や MFA の普及における障害の一つに、建設業者は FA の品質と供給の安定性に関して懸念を抱き、そして発注者は実際の構造物における限られた実績を懸念していることが挙げられる。今さらではあるが、FA を活用するためには建設業者や発注者、そして FA 製造業者の調整による統合的なアプローチの必要性を強く感じている。

また、ポゾラン活性による経年強化特性を備えている MFA やそれをさらに分級した微粒子の MFA (JIS I 種相当) は補修材料分野への展開も有望であると思われる。

最後に、本研究の一部は、JSPS 科研費 (基盤研究 (C) 平成 31~33 年度、研究代表者: 佐藤嘉昭、課題番号: 19K04691) の支援を受けて実施しました。ここに記して感謝の意を表します。また、参考文献には記していませんが、データを引用させていただいた文献の執筆者各位に厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会: フライアッシュを使用するコンクリートの調査設計・施工指針・同解説, 2007
- 2) 土木学会: 循環型社会に適したフライアッシュコンクリートの最新利用技術ー利用拡大に向けた設計施工指針試案ー, コンクリートライブラリー 132, 2009
- 3) ACI Committee 232 : Use of Fly Ash in Concrete, ACI 232.2R-96, American Concrete Institute, pp.1-41, 2002
- 4) D. Harris, C. Heidrich, J. Feuerborn : Global aspects on Coal Combustion Products, VGB PowerTech, 10, pp.25-33, 2020
- 5) 李相培, 佐藤嘉昭, 岡田秀敏, 清原千鶴: 焼成工程を備えた風力微粉砕処理システムによる石炭灰の改質, コンクリート工学年次論文集, 第 29 巻, 第 1 号, p.183-188, 2007
- 6) M. Mohebbi, F. Rajabipour, B. E. Scheetz : Reliability of Loss on Ignition (LOI) Test for Determining the Unburned Carbon Content in Fly Ash, 2015 World of Coal Ash (WOCA) Conference in Nashville, available from <http://www.flyash.info/>, (accessed 2019-07-28)
- 7) 須藤祐未, 佐藤嘉昭, 清原千鶴, 大谷俊浩: フライアッシュの品質がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響 (その 1. 文献調査), 日本建築学会研究報告九州支部, 第 43 号・1, 構造系, pp.41-44, 2004
- 8) R. L. Hill, K. J. Folliard : The Impact of Fly Ash on Air-Entrained Concrete, HPC Bridge Views, Vol. 43, Spring, pp. 5-6, 2006
- 9) 川上 晃, 李 昇憲, 坂井悦郎, 大門正機: 未燃カーボンを多量に含んだフライアッシュと高性能 AE 減水剤の作用, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.127-132, 1999
- 10) 牧田 通, 市川博康: 加熱改質フライアッシュを混和したコンクリートへの高速道路橋の壁高欄への適用, コンクリート工学, Vol.57, No.12, p.922-929, 2019
- 11) 米田恭子, 千歩 修, 長谷川拓哉: 既往の凍結融解試験データに基づくコンクリートの耐凍害性に及ぼす乾燥繰返し・暴露の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.951-956, 2008
- 12) 小林茂敏, 小野金造, 河野広隆, 肥沼年光: ASR モルタルバー膨張量に影響する要因に関する 2, 3 の考察, 第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.205-208, 1986
- 13) A.D. Jensen, S. Chatterji, P. Christensen, N. Thaulow : STUDIES OF ALKALI-SILICA REACTION - PART II EFFECT OF AIR-ENTRAINMENT ON EXPANSION, CEMENT and CONCRETE RESEARCH. Vol. 14, pp. 311-314, 1984
- 14) T. Robl, A. Oberlink, R. Jones : Coal Combustion Products(CCP's) Characteristics, Utilization and Beneficiation, ELSEVIER, 2017
- 15) J. C. Howera, J. G. Groppa, U. M. Graham, et al.: Coal-derived unburned carbons in fly ash: A review, International Journal of Coal Geology, Vol.179, pp.11-27, 2017.
- 16) N. S Dong : Reducing carbon-in-ash, IEA CLEAN COAL CENTRE, CCC/167, pp.1-64, 2010
- 17) Y. Xing, F. Guo, M. Xu, et al.: Separation of unburned carbon from coal fly ash: A review, Powder Technology, Vol.353, pp.372-384, 2019
- 18) Takasu, K., et al.: EXPERIMENTAL STUDY ON REMOVAL OF UNBURNT CARBON IN FLY ASH BY FLOTATION METHOD AND PROPERTIES OF CONCRETE WITH THE FLY ASH SLURRY, Journal of Structural and construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 79, No. 697, pp. 331-340, 2014. 3 (in Japanese)
高巢幸二, 陶山裕樹, 小山田英弘: 浮遊選鉱法によるフライアッシュ中の未燃炭素除去およびそのフライアッシュスラリーを使用したコンクリートの特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻, 第 697 号 pp. 331-340, 2014
- 19) 山田則行, 広末英晴, 安部英一: 回分式振動流動層による石炭灰中の未燃炭分の低減, 粉体工学会誌, Vol.25, No.11, 1988
- 20) 山本武志, 金津努: フライアッシュの未燃炭素除去技術ー破碎分級・自然灰還元法の開発と各種手法の適用性評価ー, 電力中央研究所報告, pp.1-17, 2003
- 21) O. K. Wattimena, A. Antoni, D. Hardjito : A Review on the Effect of Fly Ash Characteristics and Their Variations on the Synthesis of Fly Ash Based Geopolymer, AIP Conf. Proc. 1887, 020041-1-020041-12, 2017
- 22) J. M. Schrabback : Overcoming fly ash obstacles, International Cement Review, 2013.9
- 23) 早川千尋, 小方通照, 峰岸慎治, 村林真行, 松野武雄: 石炭フライアッシュ中の炭素の特性, 横浜国大環境研紀要 11, pp.53-68, 1984
- 24) 東山浩一, 神田英輝, 白井裕三, 牧野尚夫, 黒瀬良一: 石炭灰の固化現象および影響因子の解明, 粉体工学会誌, 41, pp.508-513, 2004
- 25) 内田俊一郎, 森 浩文, 山口 修, 加藤将裕, 野田英智: 石炭灰固結生成メカニズムの解明, 太平洋セメント研究報告, 第 151 号, pp.50-59, 2006
- 26) A. Michalik, J. Babinska, F. Chylinski, A. Piekarczyk : Ammonia in Fly Ashes from Flue Gas Denitrification Process and its Impact on the Properties of Cement Composites, Buildings 2019, 9, 225
- 27) I. Maj, S. Kalisz, W. Gądek : Ammonia desorption from fly ash, E3S Web of Conferences 82, 01012 (2019)
- 28) Ishikawa, Y., et al.: RESEARCH ON THE QUALITY DISTRIBUTION OF JIS TYPE-II FLY ASH, AIJ Journal of Technology and Design, No. 24, pp. 1-4, 2006.12 (in Japanese)
石川嘉崇, 嵩 英雄, 高田進治: フライアッシュ JIS II 種品の品質分布に関する調査, 日本建築学会技術報告集 第 24 号, pp.1-4, 2006.12
- 29) 江藤弘之, 赤塚 剛, 山本 晃: フライアッシュの品質変動がコンクリートに及ぼす影響について: コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.111-116, 2002
- 30) 船本憲治, 笹原 厚: フライアッシュおよびフライアッシュコンクリートの品質変動に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.227-232, 2003
- 31) 黒田泰弘, 西田 朗, 長澤達朗, 中川邦光: 博多駅ビル (仮称) 新築工事における現場練りコンクリートの製造・施工, コンクリート工学, Vol.48, No.12, pp.32-38, 2010
- 32) 砂川勇二: 沖縄県におけるフライアッシュコンクリートの利用促進について, コンクリート工学, Vol.52, No.5, pp.454-458, 2014
- 33) 参納千夏男, 宮脇英嗣, 中島隆甫, 鳥居和之: 北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの利活用を目的としたフライアッシュの品質保証と地域実装, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.233-238, 2019
- 34) S. V. Vassilev, C. G. Vassileva : A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour, Fuel, Volume 86, Issues 10-11, pp.1490-1512, 2007

[2021 年 5 月 24 日原稿受理 2021 年 7 月 28 日採用決定]