

## フライアッシュのコンクリートへの有効利用 (その 1)

小山, 智幸  
九州大学人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://hdl.handle.net/2324/20279>

---

出版情報 : 建設物価. 1106, pp.40-43, 2011-12-01. 建設物価調査会  
バージョン :  
権利関係 :

連載 素晴らしいコンクリート④

Wonderful Concrete

# フライアッシュのコンクリートへの有効利用 (その1)

九州大学大学院 人間環境学研究院 都市・建築学部門 准教授 小山智幸

## はじめに

建築・土木を含む建設生産という行為の特徴のひとつは、他の工業生産、例えば家電製品の生産と比較するとわかるように、一度の生産行為において使用される資材の量が、体積や重量という意味で、きわめて大きいということである。したがって、生産された建設物は、将来、大量の廃棄物の源となるリスクを負っているが、反面、他の生産分野で発生する副産物の受け入れ先としての大きなキャパシティを有している。例えば生コンの生産量はピーク時から半減したとはいえ約1億m<sup>3</sup>あり<sup>1)</sup>、現在でも多くの副産物を利用しながら製造がなされている。この意味でもコンクリートは、循環型社会における重要な役割を担うことのできる「素晴らしい」材料と位置づけられる。当然、副産物の不適切な混合によりそのインフラとしての「素晴らしさ」を低下させてはならないわけで、研究者や技術者の責任も大きい。今回のテーマであるフライアッシュは、高炉スラグとともに、コンクリートに用いられる代表的な副産物であり、コンクリートの性能を向上させることのできる、優れた物質である。連載の第4回、第5回はフライアッシュのコンクリートへの有効利用について記述させていただく。筆者は今回の連載の担当者の中で唯一建築系に所属しており（といっても建築にそれほど詳しいわけではないが）、建物を意識しながら話をしていきたい。

## 火山灰とコンクリート

人類がコンクリートを最初に使用したのは、今から9千年も前の新石器時代のことであるといわれている（年代に関しては異論もあるようである）。このコンクリートは、結合材として石灰石

を起源とするセメント、骨材として砕いた石灰石を用いたもので、住居の床と壁に使われていたとのことである<sup>2)</sup>。

その後もセメントとして石こうを用いたモルタルが5千年前（紀元前2,700年）頃の古代エジプトでピラミッドに用いられており、さらに古代ギリシャ、古代ローマの時代へと受け継がれている。

建築分野では近代建築の三大材料、すなわちその材料の普及以前と以後とで建築を大きく変える契機をもたらした材料として、コンクリートと鉄とガラスが挙げられる。このように、コンクリートというと近代文明を支える新しい材料のように思われがちであるが、コンクリートは古くから人とともにあり、その時代ごとに最適な結合材と骨材を選択しながら、文明の礎として存在し発展してきたといえる。

特筆すべきは、古代ローマの構造物は、パンテオンやガール県の水道橋など、現在も使用されているものも多いことである。パンテオン（写真1）はご存知のように、内径約43mのコンクリート製ドームで構成されており、その後2千年近くも世界最大のコンクリート構造物であり続けた。もちろん無筋コンクリートである。

読者の中には詳しい方も多いと思われるが、ローマ時代のコンクリートには、結合材として石灰や石こうだけでなく、火山灰が用いられている。火山灰は、火山の火口から溶融もしくは半溶融の状態ですばやく噴出した比較的微小な粒子が、空中で急冷されてガラス質を含有する粉体となったものである。この火山灰は、石灰が気硬性であるのに対し、水硬性（水と化学反応を生じて硬化する）を示し、現在と比較しても遜色のない強度のコンクリートを実現することができた。ローマ建築の基本的な性格の一つに恒久性が挙げられる<sup>3)</sup>が、それを支えるのに火山灰を用いたコンクリートの果たした役割はきわめて大きい。



写真1 ローマのパンテオン（左、右上）とコロッセウム（右下）（いずれも東海大学渡邊道治教授提供）

## 人工ボランとしてのフライアッシュ

石炭火力発電所ではタービンを回転させる蒸気を作るための燃料として、石炭が使用される。石炭は通常、微粉末状に加工したものが使用され、これが炉内で燃焼する際に、もとの石炭の質量比10%余りの灰が発生する（写真1）。この石炭灰は、炉底に落下し粒状となるクリンカアッシュと、炉の上部から排出されて煙突に達する前に捕集される、粉体状のフライアッシュに大別される。火山灰と同様に空気中で急冷、固化されたフライアッシュはガラス質の物質となっている。また溶融時に表面張力のため球形のものが多い（写真2）。石炭灰の発生量は年々増加の一途をたどっており、国内で一千万トンに達しようとしている<sup>5)</sup>。

セメントの定義として、例えば、「水と練り混ぜて放置しておく、（単なる乾燥といった物理的な変化ではなく）何らかの化学反応を生じて固まる（硬化する）粉体状の物質」を採用す

ると、水と練り混ぜただけでは硬化しないフライアッシュはセメントとして位置づけることはできない。しかしフライアッシュは、ポルトランドセメントとともに練り混ぜると、ポルトランドセメ

### 石炭灰ができるまで

石炭火力発電所では、ボイラーの中で石炭を燃やしており、その結果石炭灰が発生します。石炭灰は燃焼後の形状で、クリンカアッシュとフライアッシュに分類されます。なお、クリンカアッシュとフライアッシュは、約1:9の割合で発生します。

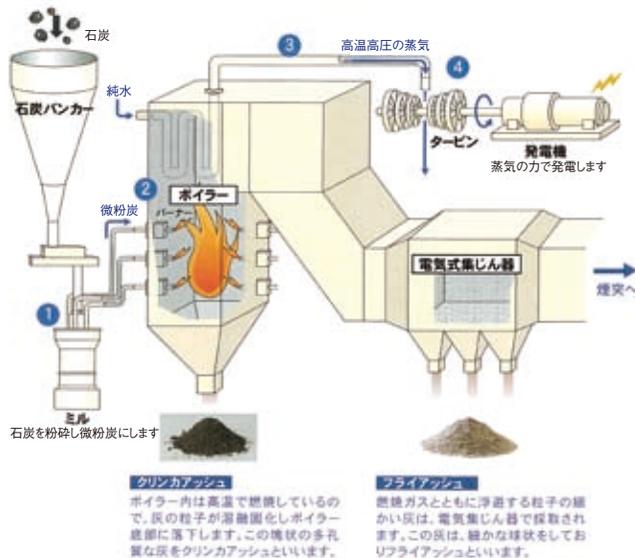


図1 石炭火力発電所におけるフライアッシュの発生工程<sup>4)</sup>

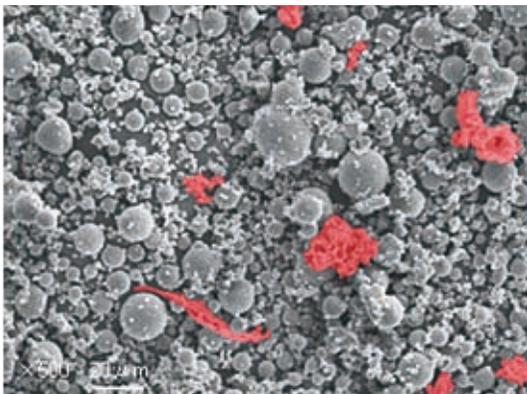


写真2 フライアッシュの電子顕微鏡写真

セメントの水和で生じた水酸化カルシウムを使って一種の水和反応を生じて固まる性質がある。この反応はポゾラン反応と呼ばれ、このような性質を持つ材料はポゾランと総称される。これらの名称は先に述べたイタリアの火山灰を産する地名 Pozzuoli に由来している。火山灰が天然のポゾランであるのに対し、フライアッシュは人工のポゾランとして位置づけられる。

### フライアッシュのセメント・コンクリート分野への有効利用

フライアッシュは大きく分けて以下の3つの方法によりセメント・コンクリート分野で再利用される。

1つ目はセメントの原料としてである。ポルトランドセメントの原料は石灰石や粘土、珪石などであるが、フライアッシュを構成する元素の組成は粘土と非常に良く似ており珪素を多く含んでいる<sup>5)</sup>。したがって、セメント原料である粘土の代替としてフライアッシュは大量に利用されている。

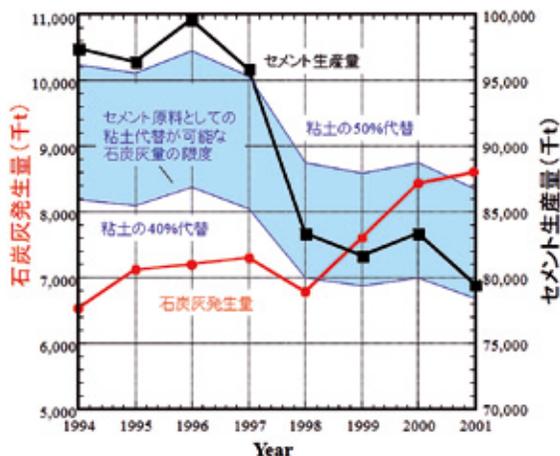


図2 国内のセメント生産量と石炭灰発生量<sup>7)</sup>

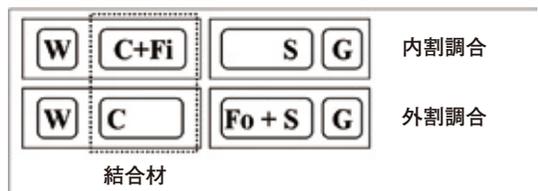
表1 混合セメント中の混和材の混合量の規格置換率(%)

	置換率 (%)		
	A種	B種	C種
高炉セメント	5を超え 30以下	30を超え 60以下	60を超え 70以下
フライアッシュセメント	5を超え 10以下	10を超え 20以下	20を超え 30以下
シリカセメント	5を超え 10以下	10を超え 20以下	20を超え 30以下

セメントを1トン作るために約200kgの粘土が必要となるが、最大でその半分までをフライアッシュで代替することができる<sup>6)</sup>。しかしセメントの生産量は減少傾向にあり、粘土の代替だけでは発生するフライアッシュの全てを消費することはできない(図2)。

2つ目はセメントの一部としてであるが、さらに細かく分けると、フライアッシュセメントとしてあらかじめセメントに混合してコンクリートに用いる場合と、混和材として必要な量を混合する場合とがある。前者の場合、先に述べたようにフライアッシュは成分が粘土と似ており、ポルトランドセメントとは成分が異なるので、あまり大量に混合するとセメントの性質が大きく変化してしまう。例えば使用したコンクリートの初期強度が低くなる、中性化が速くなるなどである。このためJIS R 5213「フライアッシュセメント」におけるフライアッシュセメント中のフライアッシュの量は最大でも30%である(表1)。ちなみに高炉セメント中に含有される高炉スラグの量は同じくJIS R 5211「高炉セメント」で70%である。これは、高炉スラグの成分がポルトランドセメントに近いことも一因である。

混和材として使用する場合、フライアッシュを加えた分だけセメント量を減らす内割混合と、セメントを減らさずにフライアッシュを加える外割混合とがある(図3)。内割混合ではフライアッシュを結合材の一部として用いることになり、セメント使用量の低減が期待できる。外割混合では必ずしもポゾランとしての反応性を期待して用い



W:水, C:セメント, Fi, Fo:フライアッシュ, S:細骨材, G:粗骨材

図3 フライアッシュの内割混合と外割混合

るわけではないが、単位セメント量を減じないため、無混合の場合と比較してフライアッシュを混合した分の性能向上が期待できる。

ポゾラン反応は、ポルトランドセメントの水和反応と比較して速度が遅いこと、フライアッシュの粒形が球状のものが多いことなどから、フライアッシュを混和したコンクリートは、ポルトランドセメントだけの場合に比べて、

- ①フレッシュ時の流動性が向上する。結果として同じ流動性を得るための単位水量を低減することができる（とくに内割）
- ②スランプの経時変化が少ない（とくに内割）
- ③水和発熱を抑制する効果が大きい（内割）
- ③長期強度の増進が大きく、かつ長期間持続する（内割、外割とも）
- ④水密性が向上する（とくに外割）
- ⑤遮塩性が向上する（とくに外割）
- ⑥単位水量を低減できる場合、乾燥収縮が小さくなる（内割）
- ⑦アルカリシリカ反応による膨脹抑制効果がある（内割、外割とも）

などのメリットが得られる。

一方で、

- ①初期の強度発現が遅い（内割）
- ②中性化が速くなる（内割）
- ③未燃カーボンの含有量が多い場合、空気連行が悪くなる（内割、外割とも）

などのデメリットも生じる。

未燃カーボンとは発電所における微粉炭燃焼の際に燃え残ったものである。内割・外割に限らず、フライアッシュを用いる場合にしばしば問題となる。写真1中で不規則な形状をした粒子が未燃カーボンである（写真中ではわかりやすいように着色している）。一般にコンクリートでは流動性や空気連行性を付与するためにAE剤やAE減水剤などの化学混和剤を使用するが、これらの成分を吸着し（活性炭への吸着をイメージするとよい）、その効果を相殺してしまう。JIS A 6201（コンクリート用フライアッシュ）では、一般的に用いられるフライアッシュ（Ⅱ種）の未燃カーボン含有量を5%以下に制限している。対策としてフライアッシュ用のAE剤も市販されている。しかし生コンを生産する立場からするとJISの範囲内であっても、フライアッシュの種類が変わるごとに調合を微調整するのは煩雑である。現在、未燃カーボンを除去するための種々の方法が研究され、1%以下に低減することも可能となっている<sup>8) 9)</sup>。

3つ目は骨材としてであるが、粗骨材として用

いる場合と細骨材として用いる場合とがある。フライアッシュを粗骨材として用いる際には、造粒、焼成して、人工軽量骨材として用いられる。

細骨材としての使用は、近年川砂や海砂など天然の細骨材が入手しにくくなっていることが背景にあり、細骨材の一部としてフライアッシュが用いられている。

後半かなり網羅的になってしまい恐縮である。現状では、セメント原料として以外の利用量は少ないものの増加傾向にあり、今後のさらなる拡大が期待される。フライアッシュを有効利用したコンクリート構造物の事例について次回紹介する予定である。

#### 【参考文献】

- 1) 全国生コンクリート工業組合連合会ほか、ZENNAMA ホームページ - 統計情報 - 生コンクリート製造の概要
- 2) Roman Malinowski, Yoshi Garfinel (長滝重義ほか訳), 新石器時代にも高強度コンクリートがあった《先史時代のコンクリート》, セメント・コンクリート, No.518, 1990.5
- 3) 森川慶一著, 西洋建築入門, 東海大学出版会, 1983.5
- 4) 九州電力株式会社提供
- 5) 日本フライアッシュ協会ホームページ (<http://www.japan-flyash.com>) など
- 6) 環境技術協会・日本フライアッシュ協会編, 石炭灰ハンドブック (第4版), 2005.5
- 7) 松藤泰典, 小山智幸, 山口謙太郎, 小山田英弘, 伊藤是清, 持続可能な火力発電を実現するための電力産石炭灰の環境負荷低減処理システム, 都市・建築学研究, 九州大学大学院人間環境学研究院紀要, 第2号, pp.57-68, 2002.7
- 8) 森山伸智, 高巢幸二, 松藤泰典, 三浦和侑, 浮遊選鉱法によるフライアッシュ中の未燃カーボン除去に関する実験的研究, その1 中型未燃カーボン除去装置の開発 など, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010年, A-1 分冊, pp.753-754
- 9) 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, 2007.6, p.183-188

本誌記事を読み、学習することは「土木学会」「建設コンサルタンツ協会」のCPD教育形態の「自己学習（学会誌等の購読）」に相当し、単位を取得できます。  
※詳細は各団体により異なりますので、ご確認ください。