

産業副産物の活用に関する取組みと最近の動向

坂井 悦郎*

セメント製造において原・燃料として大量に産業副産物が利用されている現状を述べ、産業副産物活用におけるセメント産業の重要性を指摘した。また、高炉セメントなどとして利用が進んでいる高炉スラグおよび比較的大量な副産物となる石炭灰、とくにフライアッシュについて、それらをコンクリートへ利用する際に重要と思われる化学的な特性や反応などについて概説した。また、高炉スラグやフライアッシュをコンクリートへ使用した際の特徴を述べるとともに、使用に際して留意すべき事項についてまとめた。さらに、高炉スラグに関しては、高炉スラグ高含有セメントについて紹介し、材料設計上留意すべき事項など記述した。フライアッシュについては、その欠点である初期強度を改善する方法などについて紹介した。

キーワード：セメント製造、高炉スラグ、フライアッシュ

1. はじめに

産業副産物のコンクリートへの利用は、古くから多くの研究がなされており、本特集でもいくつかの実用化されているあるいはされつつある事例が紹介されている。コンクリートの低炭素化や耐久性向上と関連して、その利用は進んで行くと思われるが、まだ、量的な観点からは限定されている。産業副産物のコンクリートへの活用のために、産業副産物が関連した多くの JIS も制定されている。セメントとしては高炉セメント、フライアッシュセメントおよび一般廃棄物の副産物の利用となるエコセメント、また、混和材としては、高炉スラグ微粉末、フライッシュおよびシリカフュームが、さらに、コンクリート用スラグ骨材として高炉スラグ骨材（細骨材、粗骨材）、フェロニッケルスラグ骨材（細骨材）、銅スラグ骨材（細骨材）、電気炉酸化スラグ（細骨材、粗骨材）の JIS が制定されており、産業副産物がコンクリートに活用できるようになっている。しかし、製鉄所の副産物である高炉スラグは、高炉セメント B 種、混和材や細骨材として利用されているが、他の産業副産物の利用は進んでいない。2016 年のセメント生産量では、ポルトランドセメントが 76.4 %、とくに普通ポルトランドセメントが 69.2 % と主体で、高炉セメントは 20.9 % であり¹⁾、フライアッシュセメントやエコセメントの生産量は限定されている。

また、混和材としての高炉スラグやフライアッシュの利

用も、現状では非常に限定されている。韓国ではレディーミクストコンクリート工場で、大手では高炉スラグ 20 % およびフライアッシュ 10 % 程度がセメントと置換して利用され、中小を含めると高炉スラグ 35 ~ 40 % およびフライアッシュ 15 ~ 20 % 程度がセメントと置換されコンクリートが製造されているとされている。経済性からの理由が大きい、結果としてアルカリ量の高い韓国のセメントでは、耐久性対策と CO₂ 削減となっている。これは商流やレディーミクストコンクリート工場のサイロなど混和材の利用しやすい環境が整っているためで、わが国とは異なる。なお、最終的に品質はだれが責任をとっているかなど疑問を呈する声もあり、セメントタイプとして欲しいという要望もあるようである。シリカフュームもシリコンやフェロシリコン製造時の産業副産物である。それらの産業は電力多消費型であり、シリカフュームは諸外国で製造され、輸入されている。2015 年の輸入量は 5 万 t 程度で、コンクリート用としては 3 000 から 5 000 t 程度が高強度コンクリートなど特殊なコンクリートに利用されている²⁾。

産業副産物のコンクリートへの有効利用拡大については、経済性、性能、商流、レディーミクストコンクリート工場の設備などいろいろな問題があり、どのようにすべきかを一概に論じることは難しい。とくにいくつもの商品が流通し、それを経済的に使用することは非常に困難な状況である。本特集号では、実用化された事例が紹介されているので、それらを参考にして、今後の展開について考えて行く必要がある。本稿では、産業副産物の有効利用に役立っているセメント原・燃料への利用の現況を紹介するとともに、比較的多量に副生し、すでに利用されている高炉スラグと現在その利用が検討されているフライアッシュについて、コンクリートへ利用した場合の特性や高炉スラグとフライアッシュの化学的性質や使用上の留意点などの一般的な事項についてまとめた。また、これら産業副産物をより大量に利用した低炭素型セメントも多く提案がなされているが、本特集号の他の記事で取り扱われていることもあり、また、すべてを包含することは難しいので、高炉ス



* Etsuo SAKAI

東京工業大学
物質理工学院 特任教授

ラグ高含有セメントやフライアッシュセメントの欠点を改良した高 C₃S クリнкаを用いたフライアッシュセメントなど、筆者らの研究を中心に紹介した。なお、産業副産物の利用や低炭素型セメント系材料として、ジオポリマーやアルカリ活性スラグセメントなどについても世界的に多くの研究者が取り組んでいる³⁾。

2. セメント製造における副産物利用

セメント製造における副産物使用量を表 - 1 に示した¹⁾。

表 - 1 セメント生産量と副産物使用量

年度	セメント生産量(万 t)	副産物利用量(万 t)	副産物使用量(kg/t セメント)
2012	5 931	2 852	481
2013	6 224	3 027	486
2014	6 096	2 921	479
2015	5 907	2 805	475
2016	5 911	2 800	474

毎年、約 3 000 万 t 近い副産物が原・燃料として利用されている。2016 年のセメント原・燃料として約 2 800 万 t 程度の副産物が利用され、セメント 1 t あたりの副産物利用量は 474 kg/t である。原料・混合材として、石炭灰 759.7 万 t、高炉スラグ 743.4 万 t が利用され、添加材として副産セッコウ 214.9 万 t など为主に利用されている。その他原料として汚泥・スラッジ 305.2 万 t、建設発生土 185.0 万 t など利用されている。

高炉スラグとしては 2016 年には徐冷スラグ 414.0 万 t、水砕スラグ 1 926.1 万 t で合計 2 340.1 万 t が生産されている⁴⁾。水砕スラグはセメント用として 1 728.6 万 t (国内 754.1 万 t、輸出 998.2 万 t)、コンクリート用として 193 万 t (内 158.3 万 t は細骨材として) が利用されている。また、2016 年の電気事業と一般産業を合わせた石炭灰の発生量は 1 247 万 t で、864 万 t がセメント原料として利用されている⁵⁾。これは新たな副産物を発生させずに全量使用するという観点からも重要である。その他、地盤改良や工事等の土木分野に 170 万 t 程度利用されている。このように大量な産業副産物がセメント製造に利用されており、産業副産物の有効利用におけるセメント産業の役割は大きい。

一方、セメント産業において、産業副産物の利用は産業の成立と関連する。セメント生産量は最盛期の半分程度であり、生産量増大が必要な装置産業において、利益の確保は困難と考えるのが一般的である。セメント産業は、産業副産物を処理し、健全な社会資本を構築する有用なセメントという資源に変える産業に変革し、生き残っているといっても過言ではない。この分野ではわが国は世界で先導的立場にある。したがって、石炭灰のように処理費の計上される産業副産物をセメント産業として利用したいのいうまでもない。さらに、この利用においては、新たな副産物を発生させないという点も重要である。また、セメントの混合材を増加させると CO₂ 発生量は削減され、混合材としての産業副産物の利用は増加するが、クリンカ製造時の

副産物利用量は減少する。したがって、性能を維持しつつセメントの組成変更などにより製造時における副産物利用量を増大する検討が今後、必要になる。なお、骨材として産業副産物が利用されると、セメント製造時での副産物の利用に関する問題は生じない可能性が高いので、耐久性を十分検討してその利用を拡大することは重要である。

3. 高炉スラグの利用

3.1 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの特性と使用上の留意事項

JIS R 5211「高炉セメント」には A、B および C 種が規定され、それぞれの高炉スラグの分量(置換率)は、5 を超え 30 mass% 以下、30 を超え 60 mass% 以下、60 を超え 70 mass% 以下であり、JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」には粉末度の異なる 3 000、4 000、6 000 および 8 000 が規定されている。しかし、高炉セメント B 種や高炉スラグ微粉末 4 000 が主に利用されている。なお、高炉セメント B 種の平均的な置換率は 40～45 mass% 程度とされている。混和材や高炉セメントとして利用する高炉スラグ微粉末(以下 BFS)の反応性は、化学組成、ガラス化率、粉末度や置換率が影響する²⁾。BFS は、CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃ を主成分とするガラスであり、わが国の BFS のガラス化率は 95% 以上とされているので、主にその化学組成の影響を受ける。これは塩基度 [(CaO+Al₂O₃+MgO)/SiO₂] により評価されており、わが国の場合には、1.8～1.9 以上程度のものが利用されている。わが国の高炉スラグの化学的な性質は、比較的安定している。BFS の反応は、図 - 1 に示したように、ポルトランドセメント(以下 OPC)の反応とほとんど同じように早い⁶⁾。また、粉末度が大きいと BFS の反応率は増加する傾向を示す。これと置換率によって BFS を用いたコンクリートの物性が変化する。なお、セッコウの種類や添加率の変化は、自己収縮、乾燥収縮や材齢 7 日程度までの初期の BFS の反応に影響するが、それ以降の反応には影響しない。また、わが国の BFS は、比較的塩基度の高いものが利用されている。塩基度が低い場合には、粉末度を大きくすると BFS の反応率は大

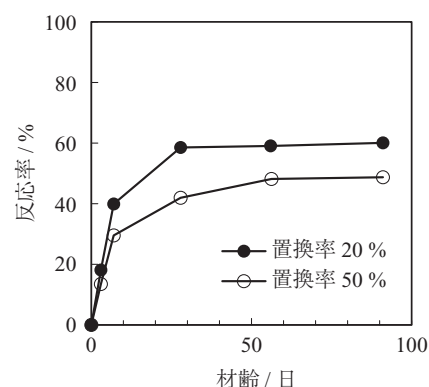


図 - 1 高炉スラグ微粉末の反応

(材齢 28 日程度までに BFS は反応し、OPC と同等の反応を示す; BFS の塩基度: 1.89, 粉末度: 4 200 cm²/g, 20 と 50% は置換率)

きくなるが、水酸化カルシウム生成量は、塩基度の影響を受け、粉末度を大きくしても減少する²⁾。

このような BFS を利用したコンクリートとしては、CO₂ 削減効果の他に、以下のような特性を有している。

- 1) 塩化物イオンの固定化や細孔構造により塩化物イオンのコンクリート内部への浸透を抑制する。
- 2) アルカリ骨材反応を抑制する。
- 3) 六価クロムなどの固定化能力に優れている。
- 4) 硫酸塩環境などにおける化学抵抗性を有する。

アルカリ骨材反応に関しては、高炉セメント C 種相当にしないと防止できない骨材もあるとされている。また、高炉スラグ細骨材の利用でもアルカリ骨材反応は防止できる²⁾。なお、水和熱が小さく温度ひび割れに対する抵抗性に優れているといわれていたが、実際の高炉セメント B 種を利用した場合には異なった結果となった。これは初期強度を確保するために、BFS の粉末度が大きくなる傾向があり、4 500 cm²/g 以上となっている場合が多く、高炉セメントとしても 3 800～4 400 cm²/g 程度と OPC に比べても大きな値を示している⁷⁾。同一工場における高炉セメントの圧縮強度は年代とともに増加する傾向をしており、材齢 28 日強度は、OPC とほとんど同じである²⁾。なお、表 - 2 のように高炉セメントなど混合セメントでは、湿潤養生期間を長くすることが標準とされている⁸⁾。

高炉セメントの水和熱は OPC より小さいが、コンクリートの断熱温度上昇量は、OPC の場合とほとんど同じ傾向を示す。これはコンクリートの温度が上昇すると BFS の反応が促進されるためである。また、高炉セメントの自己収縮は、他のセメントに比べて大きく、また、養生温度が高くなるほど大きくなる傾向を示す。しかし、高炉セメントで問題となる自己収縮については、膨張材の併用により著しく性能は改善されるので、それらの利用も積極的に考えるべきであろう。

欠点を解決した低熱・低収縮高炉セメントなども実用化されている。通常使用されている高炉セメントの粉末度は

表 - 2 湿潤養生期間の標準

日平均気温	普通ポルトランドセメント	混合セメント B 種	早強ポルトランドセメント
15℃以上	5 日	7 日	3 日
10℃以上	7 日	9 日	4 日
5℃以上	9 日	12 日	5 日

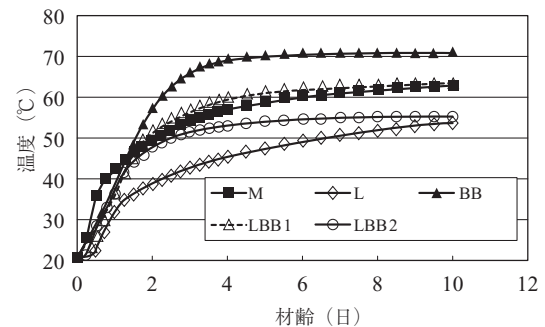


図 - 2 各種セメントのコンクリートの断熱温度上昇特性 (M: 中庸熱, L: 低熱, BB: 高炉, LBB1 と LBB2: 低熱・低収縮高炉, すべてのコンクリート: W/C=50%, C=340 kg/m³)

4 000 cm²/g 程度であり、SO₃ 量は 1.9～2.3 % 程度である。これに対して、高炉スラグの粉末度を 3 300 cm²/g 程度と小さくし、無水セッコウ添加により SO₃ 量を増加させた高炉セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇量を測定すると図 - 2 のようになる⁹⁾。BFS の置換率は 40 % (図中 LBB1) と 58 % (図中 LBB2) である。BFS で 40 % 置換したものが、中庸熱ポルトランドセメントと同等であり、58 % 置換したものが低熱ポルトランドセメントと同等の断熱温度上昇特性を示す。また、SO₃ 量の増加により、水和初期には若干膨張する傾向を示し、自己収縮も通常の高炉セメントを用いた場合の半分程度に低減される。この高炉セメントはアルカリ骨材反応抑制効果も示す。

硫酸塩環境においては、エトリンガイトを生成して、コ

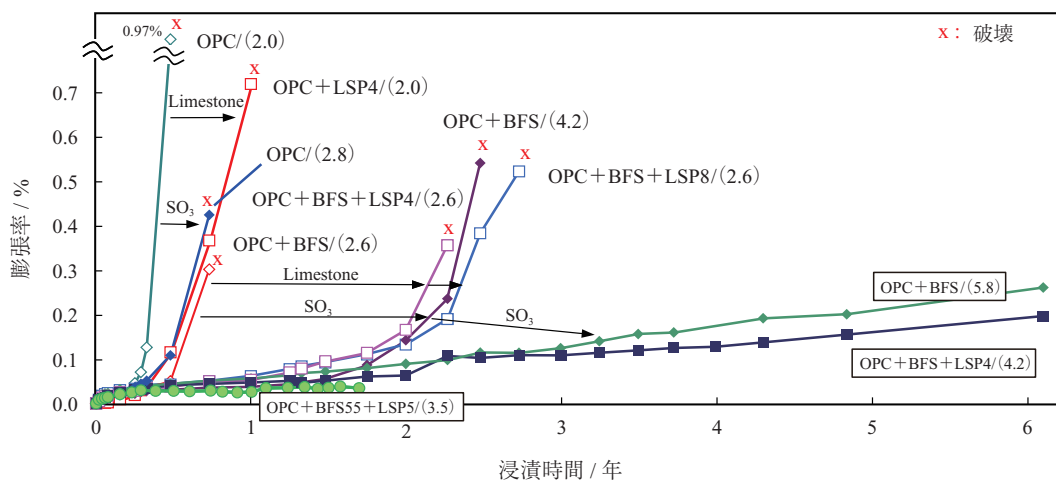


図 - 3 耐硫酸塩抵抗性

(ASTM C1012 に準拠し、5% Na₂SO₄ 溶液に浸漬し、膨張量を測定: 膨張率の大きいものは耐硫酸塩性が低い。OPC: 普通ポルトランドセメント, BFS: 高炉スラグ, LSP: 石灰石微粉末 - 数値は添加量 %, カッコ内の数値はセッコウ量 %, すべての試料で OPC 60 mass % で、残りが混合材, なお, OPC+BFS55+LSP5/(3.5) は BFS は 55%)

ンクリートは膨張破壊する。 C_3A の少ない耐硫酸塩ポルトランドセメントなどが利用されているが、耐硫酸塩抵抗性は十分ではない。硫酸塩抵抗性について高炉セメントC種の範疇では一般に優れているとされているが、BFSの混和量が30～40 mass%では耐硫酸塩性を示さない場合もある。とくに諸外国に比べて、わが国の高炉スラグ中の Al_2O_3 量が高いためである。図-3に示すように硫酸塩に対する抵抗性を向上させるには、セッコウ添加量の増加や石灰石微粉末の添加により、エトリンガイトが安定して生成するように調整し、その後のエトリンガイトの生成の原因となるモノサルフェートやカルシウムアルミネート水和物の生成を抑制する必要がある¹⁰⁾。

高炉セメントA種は、ほぼ普通ポルトランドセメントと同等のフレッシュコンクリートの性状や硬化コンクリートの特性を示し、 CO_2 削減効果は発現するが、逆に上述の高炉セメントに期待する性能は発揮されない。なお、混合セメントにおいて、初期の湿潤養生期間が必要とされているが、初期強度を改善する方法も提案されており、高エネルギークリンカを利用すると初期強度は、OPCの場合とほとんど変わらず、湿潤養生期間の短縮につながる。

3.2 高炉スラグ高含有セメント

建築学会や土木学会ではJIS R 5211「高炉セメント」の高炉セメントC種の範疇になる高炉スラグ高含有セメントの実用化も検討されている。また、より混合材を大量に使用したコンクリートの指針などの検討も進んでいる。

高炉スラグの混和量を60～70%程度としたセメントを用いたコンクリートは CO_2 削減効果が大きく、化学的抵抗性や塩化物イオン浸透抵抗性など高炉セメントの特徴を顕著に発揮し、水和熱抑制効果も示す。高炉スラグの刺激剤としては、多くの検討がなされ、セメント、軽焼マグネシア、セッコウ、生石灰、水酸化カルシウム、水酸化ナトリウムなどが知られている²⁾。セメント使用量の少ない系としては、高硫酸塩スラグセメントがある。しかし、製造上の制御が難しいなどの問題点がある。たとえばBFS-無水セッコウ-OPC系で、OPCの添加量を変化させると、OPC1%程度で、もっとも高炉スラグの反応は促進するが、OPCの添加量がわずかに増加すると、急激に反応は抑制される²⁾。また、減水剤などを利用すると凝結遅延が著しくなり、現代のコンクリートには不向きである。OPCを30%程度とすることと、ポリカルボン酸系分散剤の吸着特性やスランプ保持性などを調整することでこの高炉スラグ高含有セメントの性能は改善される²⁾。また、自己収縮や乾燥収縮に関しては、無水セッコウなどの添加により改善される。通常の高炉セメントC種では、コンクリートの自己収縮や乾燥収縮は大きい。しかし、無水セッコウ添加量や石灰石微粉末の添加量の調整により、自己収縮や乾燥収縮は減少する。これは初期の水和物としてエトリンガイト(Aft)を生成させることによっている。しかし、図-4に示すように、養生温度などが高いとBFSの反応が促進し、モノサルフェート(AFm)も生成するため、収縮特性が変化する¹¹⁾。エトリンガイトの生成の観点からはセッコウ添加量の増加や石灰石微粉末の添加は必要となる

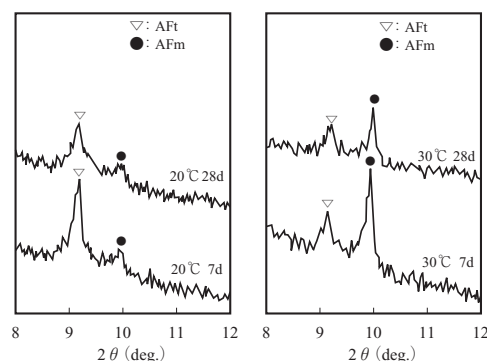


図-4 養生温度の異なる高炉スラグ高含有セメントの水和生成物のX線回折パターン

(OPC:BFS:無水セッコウ=30:65:5;水粉体比0.4, 養生温度が高いとBFSの反応が促進し、エトリンガイト(Aft)だけではなくモノサルフェート(AFm)も生成)

が、これは耐久性も考慮して決定する必要がある。実用化されている高炉セメントB種での性能の差は少ないと思われるが、高炉セメントC種の領域になると上述のようにコンクリートの性能は、セメントの材料設計の影響を著しく受ける。

現在の規格体系には属さないが、OPCを利用せず、BFS、膨張材、消石灰および石灰石微粉末を利用した環境配慮型コンクリートも提案されている。高炉セメントC種同様に高炉セメントを利用した特性は、より顕著となり低発熱である。 CO_2 排出量はOPCを利用したコンクリートの約1/4になるとされている²⁾。

なお、高炉スラグ高含有セメントは、中性化には配慮が必要であり、地下構造物など中性化の問題とならない適用構造物を選定することも重要である。

4. フライアッシュの利用

4.1 フライアッシュを用いたコンクリートの特性と使用上の留意点

JIS R 5213 フライアッシュセメントにはフライアッシュセメントA、B、C種が規定されている。A種はFAの分量が5を超え10 mass%以下、B種はFAの分量が10を超え20 mass%以下、C種はFAの分量が20を超え30 mass%以下であり、現在利用が検討されているのはB種および相当品である。また、混和材としてはフライアッシュ(以下FA)は、粉末度や強熱減量からJIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」には、I～IV種の4種類が規定されている。II種は、従来から使用されてきたFAに相当するものであり、I種は粉末度も大きく、強熱減量も小さいため、高強度化や高流動化などに適しているとされている。これに対して、III種は強熱減量が8%と大きく、IV種は粉末度が1500以上と小さいので、材料分離抵抗性の向上や骨材代替などとしての利用が考えられるが、品質の変動や化学混和剤との相互作用などに注意が必要である。いずれにしてもどのようなFAが定常的に確保できるかなども重要な問題である。現在、利用が検討されているのは、II種あるいはその相当品である。

水酸化カルシウムとFAとのポズラン反応は、フライアッシュ中のガラス相によるものであり、ムライト ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) や $\alpha\text{-SiO}_2$ は常温ではほとんど反応しない。したがって、FAのポズラン反応性は粉末度、これが同じ場合は、図-5のようにガラス化率とその組成により決定される¹²⁾。わが国のFAのガラス化率とムライト量の関係は図-6のようであり、かなり品質の異なるものが副生している¹²⁾。また、FAのポズラン反応は材齢56日程度以降から顕著に進行する。したがって、材齢28日から材齢91日での強度増進率を加味して、材齢28日の基準強度を決める発注法などの提案もある¹³⁾。

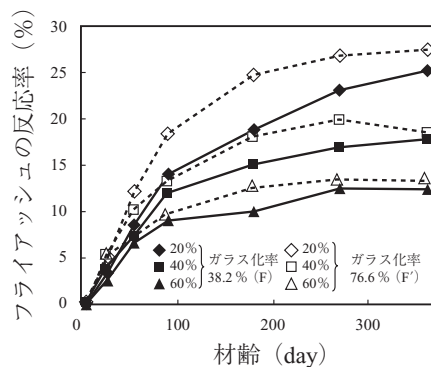


図-5 フライアッシュの反応

(ガラス化率の大きなものほど初期に反応性が大きく、長期では、ほとんど影響しない。FAは材齢28日以降顕著に反応する)

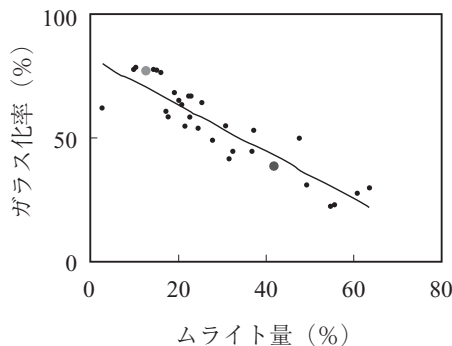


図-6 フライアッシュの構成化合物⁵⁾

(結晶相のムライトが多いとガラス量は低下する。山本、金津の電中研報告(小さな丸)に新たなデータ(大きな丸)を加え作成)

フライアッシュを用いたコンクリートの一般的な特徴は以下のようである。

- 1) 施工性能の向上、単位水量の低減や材料分離抵抗性が向上する。
- 2) 低混和量でアルカリ骨材反応を抑制する(比表面積 2500 g/cm^2 以上、強熱減量 5.0% 以下のFAだと予防保全的な対策など15%以上、高いレベルの対策だと20%以上の混和量が推奨されている¹³⁾)。
- 3) 組織の緻密化、遷移帯の改善や細孔構造により塩化物イオンのコンクリート内部への浸透を抑制する(高炉スラグ、シリカフュームを混和した場合と同

等かそれ以上)。なお、内部への浸透を抑制するので、表面付近の塩化物イオン濃度は上昇する。

- 4) 水密性が向上する。
- 5) 水和熱抑制効果大きい。
- 6) 長期材齢での強度が増進する。

FAのとくに優れた特徴は、15~20%程度の少量の混和でアルカリ骨材反応の抑制が可能ということである。FAのガラス部分のポズラン反応により水密性の向上などが確保され、水和熱の低減や長期強度増進が期待され、無混和の場合に対する圧縮強度の比(セメント有効係数)は材齢とともに増加する¹³⁾。なお、品質変動が大きいことにより、この性能が完全に発揮されない場合もある。一般的には硫酸塩抵抗性はFAII種の混和により改善される。FAのガラス中の Al_2O_3 が低い場合には、無水セッコウや石灰石微粉末の添加により向上するが、多い場合には、高炉スラグの場合と異なり、逆に硫酸塩抵抗性が低下する場合もある⁹⁾。

使用上の留意点としては、品質変動や初期強度発現性に劣る(表-2のように湿潤養生期間の確保が必要)、中性化が大きい、さらに図-7に示すように、未燃カーボン量により減水剤やAE剤の使用量が影響されるなどがあげられる¹⁴⁾。なお、品質変動に対応するため表-3に示すような多くの品質評価試験方法も検討されている¹³⁾。API法は、80℃、18時間でFAにより消費される Ca^{2+} 濃度を測定しFAの反応性を評価し活性度指数の指標として利用しようとするもので、適用の可能性は高いとされている。しかし、これら品質評価試験方法が、必ずしも十分とはい

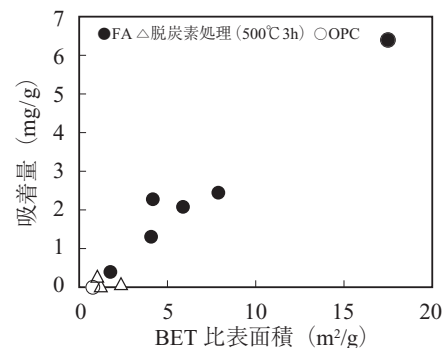


図-7 ガス吸着法によるFAの比表面積とポリカルボ酸系分散剤の吸着量

(未燃カーボンによりガス吸着法の比表面積が増加すると混和剤の吸着量が増加する。500℃程度の加熱処理で未燃焼カーボンは除去され、FAの比表面積は減少し、混和剤の吸着量も減少する。)

表-3 有望なフライアッシュの品質評価試験法

区分	試験方法および試験項目
ポズラン活性評価	SiO_2 含有量、粉末度、API法、ポズラン活性迅速定量試験
流動性評価	Pロート法、簡易モルタル試験のフロー値比
混和剤要求量の評価	メチレンブルー吸着量、密かさ試験、炭素量測定
製造に必要な条件	湿分、密度

難く、今後のさらなる検討が望まれる。

中性化抵抗性が低いことや初期の湿潤養生が必要であることが問題とされているが、フライアッシュは、20%程度の少ない置換率でアルカリ骨材反応を抑制するので、骨材事情の悪化などからは非常に重要な混和材である。なお、細骨材の一部と置き換えて利用する方法も提案されている¹²⁾。その利用に際しては、品質の良好なもので変動の少ないものを選定するなど品質管理や検査が重要となる。今後、石炭火力発電所の重要性が増加すると想定され、良質の炭種の入手が困難となることも予想される。したがって、多くの炭種が利用される可能性があり、石炭灰の品質の変動も予想され、品質を確認したうえで有効に利用する必要がある。その意味では、セメントとしての利用が望ましい。

4.2 高 C₃S クリンカを用いたフライアッシュセメント

FA セメントの欠点として、初期強度発現性が OPC と比べて劣ることと、そのため湿潤養生期間を長くする必要があることや中性化抵抗性に劣るなどが指摘されている。現状では、経済性を考慮した場合に、FA の材齢 28 日以前の反応を向上させる対策はない。そのため FA セメントの初期強度を改善するためには、FA セメント用に用いるクリンカの組成を変更する必要がある。

友澤のモデルを拡張して、粒度分布や鉱物組成を組み込んだ水和モデルに基づき、混合セメント用のクリンカの組成を検討した結果では、材齢 7 日の反応率を OPC (C₃S 量 59%) と同じにするためには、クリンカ中の C₃S 量を 65% 程度以上に増加する必要がある結果となる¹⁵⁾。図 - 8 に示すように、このクリンカを用いると FA 20% 混和した FA セメントでも OPC と同等の反応を示している¹⁵⁾。なお、初期材齢での FA の反応は、粉末度を大きくしても FA セメントの反応率に寄与する影響は小さい。実際に製造した高 C₃S クリンカ (C₃S 量 69%, 粉末度 4 800 cm²/g) を利用した FA セメントで置換率 20% としたコンクリートの圧縮強度は、材齢初期では OPC (C₃S 量 59%, 粉末度 3 500 cm²/g) の場合とほぼ同等となる¹⁶⁾。なお、高 C₃S ク

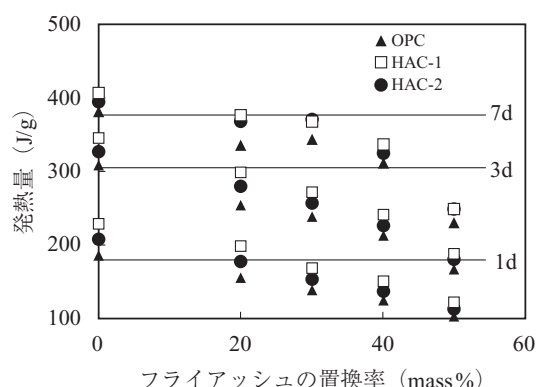


図 - 8 FA 置換率と水和熱

(水和による発熱量は反応率と関連、FA 置換率 20% 程度まで高 C₃S クリンカ利用すると実線の OPC とほぼ同等; C₃S 量; OPC: 58.7, HAC-1: 68.6, HAC-2: 71.1, 粉末度; OPC: 3 460 cm²/g, HAC-1, HAC-2: 4 760 cm²/g, OPC: 普通ポルトランドセメント, HAC-1 と HAC-2 は高 C₃S セメント)

リンカを用いると材齢 28 日での強度増進が期待できないが、石灰石微粉末を添加して FA やビーライトの反応を促進させることにより、長期強度発現性は改善される¹⁷⁾。なお、C₃S 量、F-CaO 量や石灰石微粉末添加量などのクリンカや組成の最適化については、さらに詳細な検討が必要である。

5. おわりに

コンクリート構造物の耐久性向上や CO₂ 削減と関連して、産業副産物のコンクリートへの利用が検討されている。高炉スラグなど、その利用に関しては長い年月を要して実用化されてきた。コンクリート構造物への産業副産物の適用は、慎重に行うべきである。CO₂ 削減も重要であるが、耐久的なコンクリート構造物を構築することが使命である。産業副産物の利用で、一度失敗すると今後の利用は難しいと思った方がよい。また、CO₂ 削減はいくつかのシナリオが必要で、技術レパートリーを増やしておく必要がある。経営者の判断により決定されていくと思うが、いくつかのシナリオがないと選択することもできない。なお、新たな産業副産物も発生する可能性も高く、新たな利用技術の開発も必要となる。たとえば、バイオマスなどを利用した発電における加圧流動床の灰などは、従来の技術蓄積が役立たない。産業副産物の有効利用においては、新たな副産物をつくらないことや、環境安全品質に十分な配慮がなされていること、また、安全で使用しやすいものから利用することが重要と思われる。本稿が、産業副産物のコンクリートへの利用を考える際の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) セメント協会ホームページ <http://www.jcassoc.or.jp/>
- 2) 坂井悦郎, 大門正機編, 新・社会環境マテリアル, セメント新聞社, 2017
- 3) J.L.Provis et al., Cement & Concrete Res., 78, pp.110-125,
- 4) 鉄鋼スラグ統計年報 (平成 28 年度実績) 鉄鋼スラグ協会, 2017
- 5) 一般財団法人石炭エネルギーセンター 石炭灰全国実態調査報告書, 2017
- 6) 坂井悦郎他, セメント・コンクリート, N0.694, pp.46-53, 2004
- 7) 佐川孝広, 第 61 回セメント技術大会講演要旨, pp.52-53, 2007
- 8) コンクリートライブラリー 145, 土木学会, 2016
- 9) 二戸信和他, セメント・コンクリート, No.722, pp.10-16, 2007
- 10) 小川彰一, 東京工業大学博士論文, 2015
- 11) 坂井悦郎他, セメント・コンクリート論文集, Vol.70, pp.119-126, 2016
- 12) E. Sakai et al., Cement & Concrete Res., Vol.35, pp.1135-1140, 2005
- 13) コンクリートライブラリー 132, 土木学会, 2009
- 14) 川上晃他, コンクリート工学年次論文集, Vol.21 (2) pp.127-132, 1999
- 15) N.Shiribudhaiwan 東京工業大学博士論文 (2015)
- 16) 宮澤伸吾他, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.303-310, 2015
- 17) 安藝朋子他, セメント・コンクリート論文集, Vol.70, pp.32-39, 2016

[2017 年 9 月 15 日受付]