

# シリカフュームを混和材として用いたコンクリート

吉澤啓典（エルケムジャパン）

## 1. まえがき

シリカフュームは二酸化珪素の超微粒子として一般に知られており、特に近年では高強度コンクリートの施工性および強度発現性の改善における効果的な混和材として認識されるようになった。シリカフュームは元々、電気炉によるフェロシリコンや金属シリコンの精錬過程で発生する副産物であり、工場煙突より廃棄されていた産業廃棄物であった（写真1）。しかし、工場周辺的环境改善の要求が高まる中、1940年代より回収技術と再利用の研究が北欧で始まった。回収技術は電気炉を開発したNorwayのElkem社を中心に研究され、1970年代に現在普及している形が出来上がった。

日本でも1990年代前半までは数千トン以上の発生量があったが、フェロシリコン・金属シリコンは電気依存型の生産品のため諸外国とのコスト競争に対抗できなくなり撤退を余儀なくされた。現在は他のプロセスから回収されるシリカフュームもあるが発生量は限定されている。

今日ではシリカフュームは建材、耐火材、肥料、プラスチック・ゴム関係など多様な分野で使用されるようになった材料であるが、最も一般に普及している分

野はコンクリート関係である。セメントは社会基盤に必要な不可欠な素材であり日本だけでも年間約6千万トン近く生産されているが、製造過程でCO<sub>2</sub>を発生させる代表的な素材でもある。シリカフュームはこのセメントの置換材になり、しかも、コンクリートの性能向上に寄与する、耐久性に優れた構造物の実現に必要な材料として高く評価されつつある。

## 2. シリカフュームの製造

電気炉中では以下に示す反応により原料の珪石（SiO<sub>2</sub>）が炭素により還元され珪素（Si）が生成する。この過程で中間物質のSiO（ガス）が炉外に漏れ、空気中の酸素と再び結び付きSiO<sub>2</sub>に再酸化される。この酸化は反応炉内の高温度（2000℃以上）から一気に冷却されながら起こるために、シリカフュームは超微粒子（平均0.15 μm）の球体でアモルファスの硬い状態となる。

- (1)  $\text{SiO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{SiO} + \text{CO} \uparrow$
- (2)  $\text{SiO} + \text{C} \rightarrow \text{Si} \downarrow + \text{CO} \uparrow$
- (3)  $2\text{SiO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$ （シリカフューム）

シリカフュームは炉内の粉塵や炭素の燃えカスなどと共に炉外に排出される。このガスを熱交換器で冷却しサイクロン等の粗粒子除去装置に送られる。微粒子であるため捕集技術がいろいろ提案されてきたが、濾布法と電気集塵が一般的である。最も普及しているのは濾布タイプである。

ガスは集塵機に到達するまでに十分な冷却が必要であるが、濾布の保護のために150℃以下が理想的である。濾布の材質は高温に耐え得るテフロン系が推奨される。電気集塵は大型化が難しく、電炉ガスによる腐食が進行しやすい。

捕集されたフレッシュなシリカフュームの嵩密度は



写真1

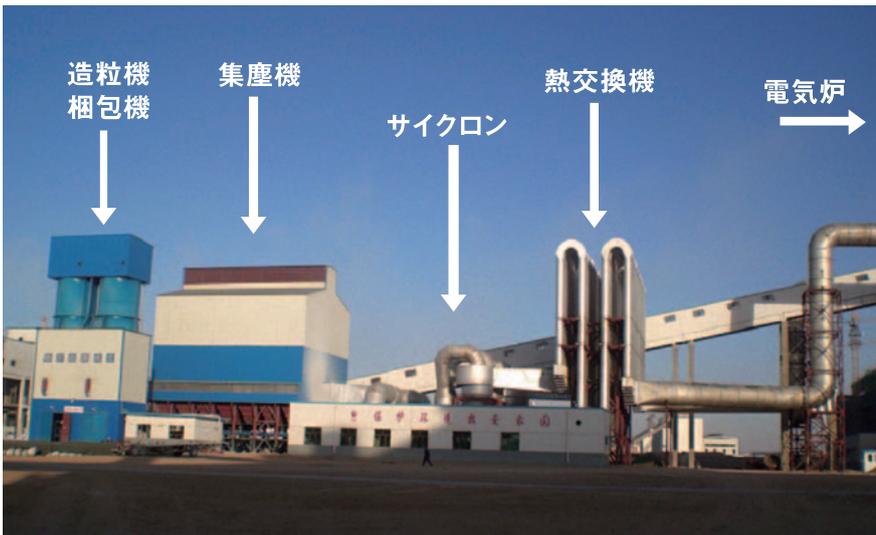


写真2 典型的なシリカフェーム製造工場（中国 内モンゴル自治区）

100kg/m<sup>3</sup>以下であるが、ハンドリングを容易にするために造粒機により嵩密度を上げてから出荷する。微粒子で凝集しやすい性質（分子間力）を利用し機械攪拌や空気攪拌により嵩密度を上げている。一般に普及しているシリカフェームの嵩密度は300kg/m<sup>3</sup>前後である。最も高いもので800kg/m<sup>3</sup>前後（顆粒品）である。製造工場の外観（写真2）を示す。

### 3. シリカフェームの性状とコンクリートへの効果

シリカフェームの一般的な性状とコンクリートへの効果を以下にあげる。

- ① SiO<sub>2</sub>純度。国際規格はほぼ共通で85%以上であるが、市場に出回っているものは90～95%の範囲が最も多い。一般にSiO<sub>2</sub>純分としてはフェロシリコン製造よりも金属シリコン製造過程から発生するヒュームの方が高い。
- ② 比表面積130,000～300,000cm<sup>2</sup>/g。150,000から200,000の間が一般的。
- ③ 密度 約2.2g/cm<sup>3</sup>。
- ④ フィラー効果。セメント粒子45μm（325mesh）に対して約100分の1以下の微粒子（0.5μm以下、写真3参照。粒度分布は図1を参照）で、強固な球体微粒子がセメントや骨材の隙間に配置される。適切な配合量を検討する一手段としてLISA（Language Independent Size Distribution Analyser）というプログラムがElkem社のwebサイトで無償提供されているので参考にされたい。

⑤ ポズラン反応性が高い。初期の段階から反応が盛んに起こり、著しい強度増加が生じ、水密性や化学抵抗性が増す。セメントの水和反応で生成する水酸化カルシウムと反応してC-S-Hの強固な結晶体を生成する。

⑥ ベアリング効果。強固な球体がセメント中でベアリングのように働く。これにより水セメント比を20%以下まで下げることができ、コンクリートの圧縮強度向上に貢献する。フィラー効果、ポズラン反応などの作用も合わさり緻密な構造が実現され塩化物イオンの移動を抑制する。

⑦ 乾燥収縮。水和反応およびポズラン反応の進行に伴う水分消費がおこるが、シリカフェームを混ぜたコンクリートは緻密であるがゆえに水分移動が起こり難い。従って硬化体内部で自己乾燥状態となり自己収縮が起こり易くなる。膨張材の併用が必要となる。

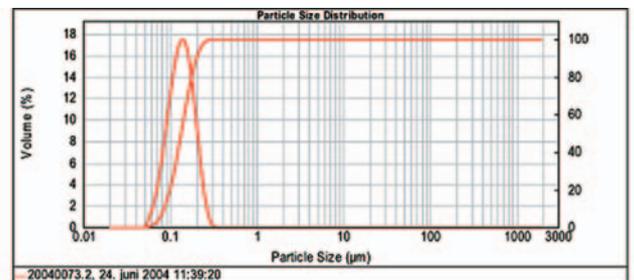


図1 シリカフェームの粒度分布

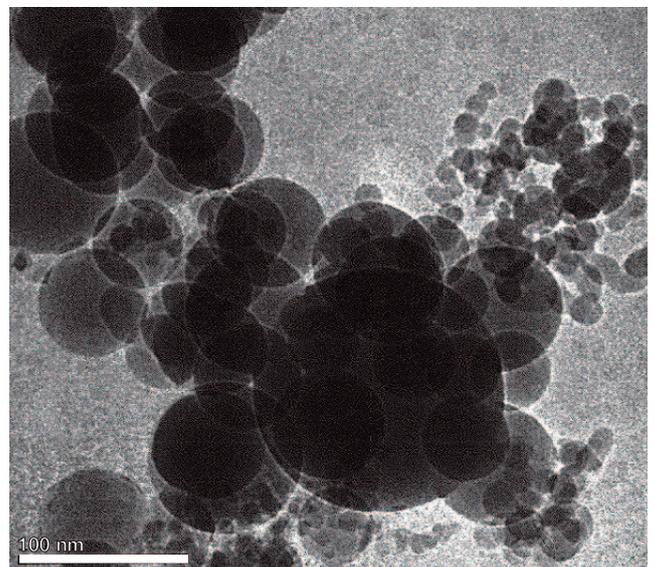


写真3 シリカフェームの電子顕微鏡写真