特集≫≫　地球温暖化対策，環境対策

乾燥スラッジ微粉末を用いた低炭素コンクリートの開発

百　瀬　晴　基・大　川　　憲・笠　井　哲　郎

戻りコンクリート起源のスラッジを効率良くコンクリート製品に再利用できる技術として，コンクリート製造からスラッジ処理完了までの時間を短縮することで，未水和セメント分を多く残し水和活性を高めたことを特徴とする乾燥スラッジ微粉末と，これをセメント代替の混和材として用いた低炭素コンクリートを開発した。乾燥スラッジ微粉末の製造方法および概要，乾燥スラッジ微粉末を用いた低炭素コンクリートの概要，これらを用いた資源循環システムについて紹介する。

キーワード：戻りコンクリート，乾燥スラッジ微粉末，スラッジ

1. はじめに

建設産業に関わる主要な建設副産物として，レディーミクストコンクリート（以下，生コンと称す）工場で発生する戻りコンクリート（以下，戻りコンと称す）がある。この戻りコンは，国土交通省の調査によると，平成17年時点で生コン出荷量の約1.6%とされ，年間100万 m^3 超が廃棄されている。近年，産業廃棄物処分場の建設が一層厳しくなる中，処分場の残余容量が減少傾向にあることから，生コンクリート業界においても廃棄物削減とリサイクル促進は喫緊の課題である。また，パリ協定を受けた日本の約束草案を受け，地球温暖化防止策として各分野で二酸化炭素（CO_2）排出量の削減に向けた動きが活発化している。建設産業に着目すると，特にセメント関連の CO_2 排出量が大きく，日本全体の CO_2 排出量の約4%を占める。これは，高温焼成により製造されるセメントは CO_2 排出量原単位が約766 kg/トンと極めて大きいことに起因しており，使用するセメント量を低減し CO_2 負荷を抑制したコンクリートに用いるセメントを低炭素材料に代替する技術への期待は大きい。

筆者らは，生コンスラッジの利用促進に資する技術として，戻りコンのスラッジケーキを乾燥粉砕し，生コン製造からスラッジ処理完了までの時間を短縮することで，未水和セメント分を多く残し水和活性を高めた乾燥スラッジ微粉末（以下，DSPと称す）を開発した。DSPは，水和活性を高めることで，普通ポルトランドセメント（以下，OPCと称す）に代わり結合材として使用することが可能であり，DSPの CO_2 排出量原単位は，OPCの1/8の程度であることから，コンクリートの低炭素化が大いに期待できる。

本論では，DSPの製造方法および概要，DSPを用いた低炭素コンクリートの概要，これらを用いた資源循環システムについて報告する。

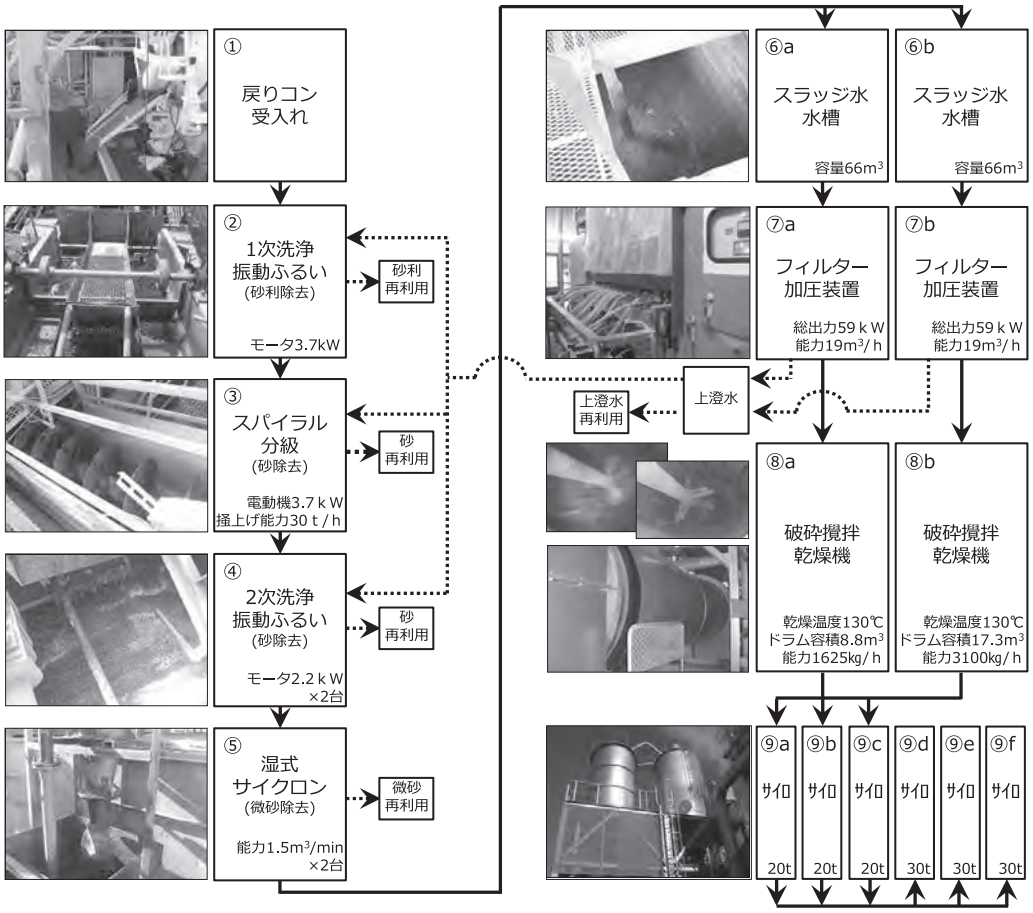
2. 乾燥スラッジ微粉末（DSP）の概要

(1) DSPの製造方法

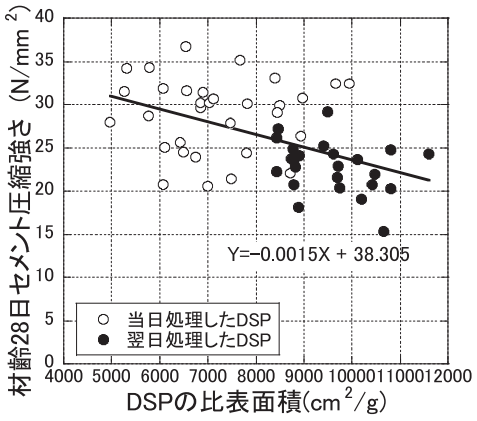
DSPの製造工程を**図―1**に示す。DSPは，戻りコンから骨材を分級し，残余のスラッジ水をフィルター加圧装置で脱水した後，破砕撹拌乾燥機（乾燥温度：120～130℃）を用いて含水率が1～2%程度となるまで乾燥・粉砕処理して製造したものである。この処理を戻りコンが発生してから翌朝までに素早く行うことにより，未水和セメントの含有率を高くすることができ，OPCの5割程度の強度発現性を有した高品質のDSPが得られる。また，戻りコン発生からDSP製造の処理を少しでも早く行うことが高品質化の鍵であり，**図―1**に示す様に，スラッジ水製造以降のラインを2ライン設けることで，高品質のDSPを選別して製造することが可能となる。

(2) DSPの基礎物性

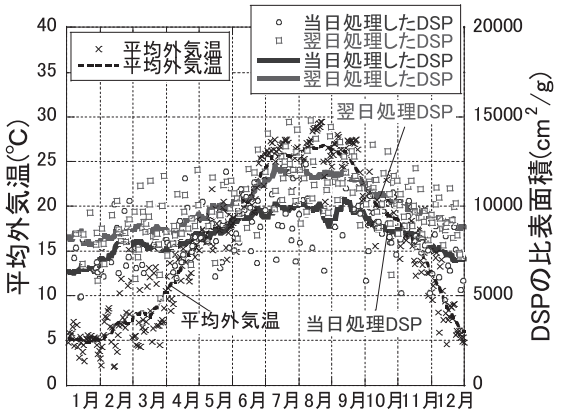
図―2は，DSPの比表面積と，セメント圧縮強さ試験結果の関係について，過去3年間に計測した結果を示したものである。**図―2**から，DSPの比表面積と圧縮強さは相関があり，比表面積が低いほど圧縮強さが高い傾向にある。また，生コンを当日処理した



図―1　DSP の製造工程



図―2　DSP の比表面積とセメント強さ試験結果の関係

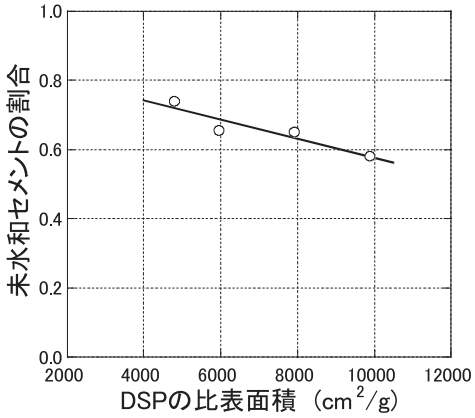


図―3　DSP の比表面積と平均外気温の関係

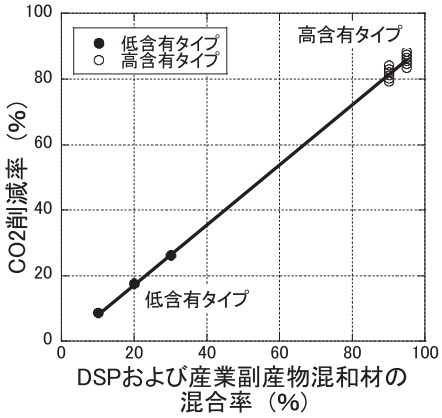
DSP は翌日処理したものに比べて，比表面積が小さく，圧縮強さが大きくなることが分かる。

DSP の比表面積と平均外気温の関係を**図―3** に示す。DSP の比表面積は破砕乾燥処理を行うまでの水和反応の程度で変動し，夏季は大きく，冬季は小さい傾向にあり，当日処理した DSP の平均値の年間変動幅は 6000 ～ 10000 cm^2/g 程度である。これは，平均外気温の相違により，DSP の原料である戻りコンに含有するセメントの水和反応の進行度合いに差が生じ，未水和セメントの残存量は気温が低いほど多くなっていると考えられる。

DSP の比表面積と未水和セメント量の関係を**図―4** に示す。**図―4** から，DSP の比表面積が大きくなるに従い未水和セメント量が減少する傾向を確認している。**表―1** は，DSP と OPC の主要な化学成分表であり，DSP は各成分とも OPC に比べ小さく，ig.loss が大きい結果となっている。DSP 中の砂や水和生成物の存在により，セメントの主要な化学成分が減少し，ig.loss が大きくなっていると推測される。



図―4　DSP の比表面積と未水和セメント量の関係



図―5　低炭素コンクリートの CO_2 削減効果

表―1　DSP と OPC の主要な化学成分表

種類	化学組成（%）						密度 (g/cm³)	比表面積 (cm²/g)
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	ig.loss		
DSP	18.96	5.14	2.68	53.11	1.75	12.01	2.70	6810
OPC	20.68	5.28	2.91	64.25	2.10	1.80	3.16	3220

3. DSP を用いた低炭素コンクリート

(1) 低炭素コンクリートの概要

DSP を用いた低炭素コンクリートの概要を**表―2**に示す。様々な用途への適用を想定し，DSP を結合材の 20%程度に代替した低炭素コンクリート（以下，DSP 低含有タイプと称す）と，DSP と高炉スラグ微粉末などの産業副産物を併用し OPC をほとんど用いない超低炭素コンクリート（以下，DSP 高含有タイプと称す）を開発した。前者の低含有タイプは，生コンおよび積みブロック製品用途に，後者の高含有タイプは，プレキャスト（以下，PCa と称す）部材および PCa 製品用途への展開を推進している。

低炭素コンクリートの CO_2 削減効果を，**図―5**に示す。CO_2 削減効果は，OPC を用いた普通コンクリートに対し，DSP 低含有タイプで 20%程度，DSP 高含有タイプで 90%程度であり，戻りコン再利用による省資源だけでなく，低炭素化に大きく貢献することができる。

表―2　DSP を用いた低炭素コンクリートの概要

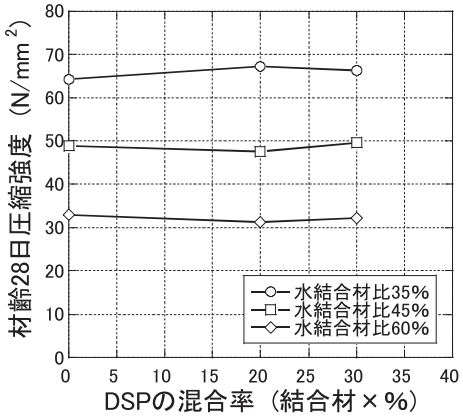
低炭素コンクリートの種類	CO_2 削減率	適用用途	結合材の構成（%）		
			OPC	DSP	産業副産物混和材
低含有タイプ	20%程度	生コン 積みブロック	80%程度	20%程度	–
高含有タイプ	90%程度	PCa 部材 PCa 製品	5～10%程度	30～85%程度	10～65%程度

＊産業副産物混和材：高炉スラグ微粉末，フライアッシュなど

(2) DSP 低含有タイプ

DSP 低含有タイプは，生コン用途と積みブロック用途として開発している。**図―6**に示す様に，DSP の混合率が結合材の 20%程度であれば圧縮強度に与える顕著な影響はなく，その他の物性も普通コンクリートと大きな差はない。生コンについては，現在，神奈川県内の 3 工場で JIS 認証の取得と供給体制の整備が整いつつあり，公共工事を含む 3 つの建築構造物において，適用している（**写真―1**）。

神奈川県の積みブロック協同組合の協力を得て積み



図―6　DSP 低含有タイプの圧縮強度

写真―1　DSP 低含有タイプ（生コン）

写真―２　DSP 低含有タイプ（積みブロック）

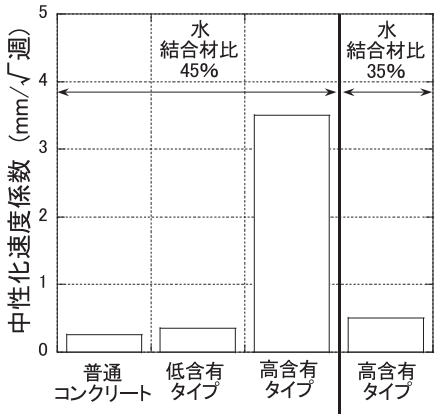
写真―３　DSP 高含有タイプ（PCa 部材）

ブロック製品の製造実験を実施している。JIS 規格を満足する製品が製造できることを確認した上で JIS 認証を取得し，JIS 製品としての積みブロックの製造を開始している（**写真―２**）。

(3) DSP 高含有タイプ

DSP 高含有タイプは，PCa 部材および PCa 製品用途として開発している。OPC を用いない超低炭素コンクリートとして，フライアッシュ等のシリカ成分とアルカリ溶液による固化反応を利用したジオポリマーコンクリートなどが報告されているが，中性化抵抗性が低く，鉄筋コンクリート（以下，RC と称す）部材および製品に用いることができないという課題があった。DSP 高含有タイプは，OPC の混合率は結合材の 10％以下であるが，**図―７**に示す様に，同水結合材比では普通コンクリートよりも中性化抵抗性は低いが，水結合材比の低減により普通コンクリートと同程度の中性化抵抗性を確保することができる。この様に，DSP に含まれる未水和セメントが中性化抵抗性に寄与することにより，RC 部材および製品に用いることができる超低炭素コンクリートを実現している。

PCa 部材用途については，実部材による曲げ実験，



図―７　DSP 高含有タイプの中性化抵抗性

写真―４　DSP 高含有タイプ（PCa 製品）

バルコニー部材製造実験，長期暴露実験等を行っており，実構造物に適用できる性能を有していることを確認している（**写真―３**）。PCa 製品用途は，屋上設備基礎の製造実験を行った上で，建築構造物に適用している（**写真―４**）。

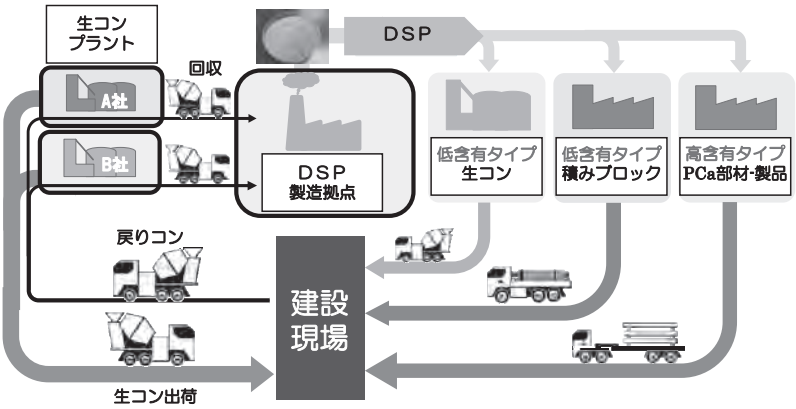
4. 資源循環システム

DSP と低炭素コンクリートの技術を軸に，**図―８**の資源循環システムを構築した。建設現場に出荷された生コンの内，使われなかった戻りコンを回収して DSP を製造し，DSP を用いたコンクリート製品として供給し建設現場で再利用するシステムである。

このような循環システムを構築する上で，①戻りコン集積スキームおよび DSP 製造拠点の増強，②安定的なリサイクル材料としての適用先の確保が重要であった。

①について，神奈川県の藤沢市および川崎市に DSP の製造拠点を整備し，周辺の生コン工場から戻りコンを集積するスキームを構築することで，DSP の供給体制を整備した。

②について，前述の様々な用途を想定した低炭素コ



図―8　資源循環スキーム

ンクリート製品を開発しており，公共工事を含む実構造物への適用実績も増えつつある。また，積みブロックについて神奈川県の県土整備局の建設リサイクル認定資材の登録を行うなど，行政による資材指定化の優先利用を積極的に働きかける活動を進めている。これらの取り組みにより，神奈川県を先行モデルとして，地産地消を原則とした資源循環システムを構築し，本技術の社会実装を実現している。

5. おわりに

本技術の普及により期待される環境負荷低減への効果は大きく，最終的に年間 100 万 m^3 超の膨大な最終処分量の抑制が期待できる。神奈川県の地産地消プロセスをプロトタイプとし，他地域に本技術の地産地消モデルを技術移転する検討を開始しており，低炭素化社会の実現に向け，本技術の普及を進めていく予定である。

JCMA

［筆者紹介］

百瀬　晴基（ももせ　はるき）
鹿島建設㈱
技術研究所　建築生産グループ
主任研究員

大川　憲（おおかわ　けん）
三和石産㈱
テスティング事業部
品質管理課長

笠井　哲郎（かさい　てつろう）
東海大学
工学部土木工学科
教授