

石灰石混合セメント

太平洋セメント株式会社 GX推進部GX推進グループリーダー 兵頭 彦次

1. はじめに

セメントは現代社会において不可欠な建設材料である一方、その製造過程で発生するCO₂排出量は世界全体の約7～8%を占めるとされ、脱炭素社会の実現に向けた対策が求められている。特に、セメントの主要成分であるクリンカーの焼成過程におけるCO₂排出が最も大きな課題とされている。その削減策の一つとして、混合セメントの利用が世界的に拡大している。

混合セメントとは、高炉スラグ、フライアッシュ、天然ポゾラン、焼成粘土、石灰石微粉末、リサイクルコンクリート微粉などの副産物や天然鉱物をクリンカーと組み合わせたものである。これにより、CO₂排出量の低減が可能となる。特に欧州や北米では、石灰石を混合材として活用する石灰石混合セメントの普及が進んでいる。

石灰石混合セメントの利点は以下のようなものがある。

- ・CO₂排出削減：クリンカー比率を下げることで、製造時のCO₂排出量を削減できる
 - ・製造の容易さ：石灰石はセメント原料として使用されるため、高炉スラグやフライアッシュに比べて入手しやすく安定供給できる
 - ・コンクリートの性能向上：適切な粒度と配合により、流動性や施工性が向上し、初期強度や耐久性を調整できる
- 本稿では、欧米における石灰石混合セメントの導入経緯と現状、普及要因、

および今後の展望について概観する。なお、一部の記述は石灰石混合セメントに限らず、混合セメント全般に適用される。

2. 欧米における石灰石混合セメントの導入経緯

2-1 欧州における展開

石灰石をセメント成分として使用する最初の試みは1965年のドイツに遡る。1990年代には、石灰石を10～20%含む混合セメントがドイツ国内で広く普及し、フランスでは1979年にセメント規格NF P 15-301において最大25%の石灰石使用が認められた。これらの動きは、後の欧州セメント規格にも影響を与えることとなった。

イギリスでは1992年に BS 7583が整備され、最大20%の石灰石混合が規格として承認された。こうした規格の整備とともに、欧州全体で環境意識の高まり

やEU-ETS(欧州排出権取引制度)の導入準備が進む中、CO₂排出削減の必要性が強く認識されるようになった。この流れを受けて、欧州のセメント業界では石灰石混合セメントの技術開発が加速した。

1993年に発効したマーストリヒト条約により、EU(欧州連合)が創設され、Single European Market(欧州単一市場)が発足した。これに伴い、加盟国間での統一規格策定が推進され、2000年にはCEN(欧州標準化委員会)よりEN 197-1が正式に発行された。この規格には27種類のセメントが定義されたが、最大5%の少量混合成分が認められており、主に石灰石が使用された。表-1に示すCEM IIに分類される6種類のセメントには、コンクリートの暴露条件に応じて最大35%の石灰石が使用されることが可能となった。また、2021年に発行

表-1 欧州における石灰石混合セメントの名称と概要

Type	Name	Range of limestone content, mass %	Notes
CEM II/A-L	Portland-limestone cement	6 to 20	TOC*≤0.50%
CEM II/A-LL	Portland-limestone cement	6 to 20	TOC≤0.20%
CEM II/A-M	Portland composite cement	Less than 20**	
CEM II/B-L	Portland-limestone cement	21 to 35	TOC≤0.50%
CEM II/B-LL	Portland-limestone cement	21 to 35	TOC≤0.20%
CEM II/B-M	Portland composite cement	Less than 35**	

*TOC: 使用された石灰石に含まれる全有機炭素量

**Portland composite cement: クリンカー以外の主成分を1種類以上含み、CEM II/A-MおよびCEM II/B-Mでは、それぞれ質量比で12-20%または21-35%

表-2 欧州セメント規格の基本的な物理特性

Strength Class	Compressive Strength, MPa				Initial setting time min	Soundness (expansion) mm
	Early strength		Later Strength			
	2days	7days	28days			
32.5N	—	≥16.0	≥32.5	≤52.5	≥75	≤10
32.5R	≥10.0	—				
42.5N	≥10.0	—	≥42.5	≤62.5	≥60	
42.5R	≥20.0	—				
52.5N	≥20.0	—	≥52.5	—	≥45	
52.5R	≥30.0	—				

されたEN 197-5では、新たに5種類の混合セメントが追加され、そのうち3種類のセメントで石灰石を最大20%使用可能となり、利用範囲がさらに拡大した。なお、EN197で定義されるセメントは、表-2に示す3つの強度クラス(32.5、42.5、52.5)に分類され、一般に石灰石混合セメントは42.5あるいは32.5クラスに属する。

図-1に、2000年以降の欧州におけるセメント種類の市場割合¹⁾を時系列で示す。CEM I(ポルトランドセメント)が2割程度であるのに対し、CEM II(主に石灰石混合セメント)は40～50%の割合を占めていることがわかる。

2-2 北米における展開

北米では欧州に比べて石灰石混合セメントの導入が遅れたものの、1990年代後半になって本格的な研究が始まった。特にカナダでは、欧州の動向を受けて石灰石混合セメントの試験導入が進められた。1983年にはカナダのセメント規格であるCSA A3000において最大5%の石灰石混合を認めていたが、2008年には最大15%の石灰石を含むLime-stone cementが承認された。

米国では保守的な姿勢が続いていたが、2004年にASTM(米国試験材料協会)規格であるC150が改訂され、最大5%の石灰石混合が認められた。2012年にはASTM C595、米国の高速道路および公共交通機関に関する規格の制定を行っているAASHTO(米国全州道路交通運輸行政官協会)のM240の改訂

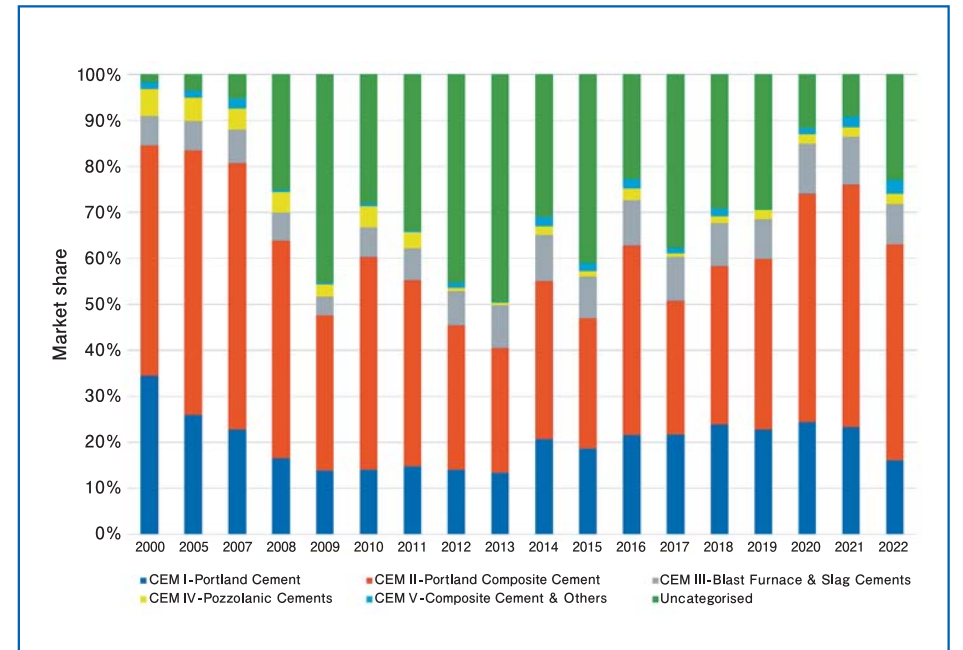


図-1 欧州におけるセメント種類の市場割合

により、石灰石を最大15%混合した Type IL(Portland limestone cement)が規定され、北米における普及が進む大きな契機となった。

北米で規格化された石灰石混合セメントの石灰石混合割合は最大で15%であり、欧州のセメント規格が最大35%の石灰石混合を認めているのに比べて少ない。これは、欧州ではセメントが強度クラス別に規定され、低強度セメントも許容されているのに対し、北米では石灰石混合セメントに既存のポルトランドセメントと同等の強度性能を求めているためである。図-2は、石灰石の混合割合とモルタルの圧縮強度および空隙量の関係を、実験結果と計算値により示したもの²⁾であり、北米でのコンセプトをよく表している。石灰石混合割合が2%程度までは、

カーボアルミネート水和物系の生成により空隙量は減少し強度が増加している。一方、それ以上石灰石の混合割合が高くなると強度が低下し、15%程度で石灰石を添加しない場合とほぼ同等の強度になることがわかる。

Type ILが米国で規格化されたのは2012年であるが、その普及には時間を要した。これは、連邦政府や地方自治体の政府機関の基準や仕様書に、Type ILが含まれていなかったため、多くの建設プロジェクトで検討されることが妨げられていたからである。その後、セメント業界は州の運輸局などの主要ユーザーに受け入れられるよう、対話やさらなる研究データ、フィールドテストの実績を積み重ね、10年の歳月を経て一般化するに至った。図-3は、米国におけるセメント消費量

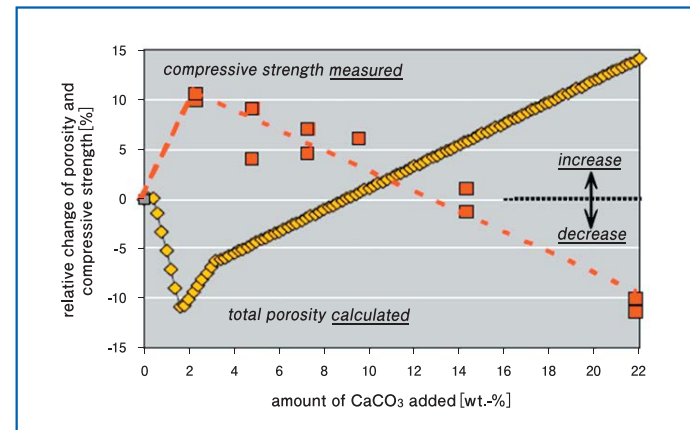


図-2 石灰石の混合割合とモルタルの圧縮強度および空隙量の関係

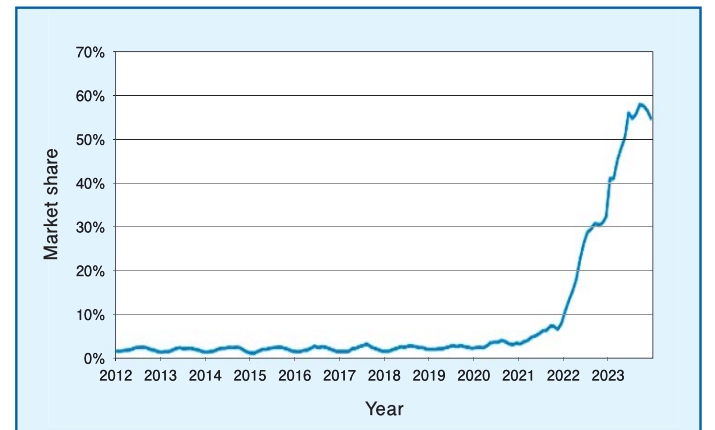


図-3 米国における混合セメントの市場割合

に占める混合セメントの割合の推移³⁾を示したものである。2021年以降、急激に混合セメントの割合が高くなっていることがわかる。米国の混合セメントの95%以上が Type II であると推定されており、Type II は2023年中ごろには米国で最も多く消費されるセメントとなった。

3. 石灰石混合セメントの普及要因

セメント業界におけるCO₂削減は単なる環境対策ではなく、カーボンプライシング、公共調達の優遇措置、市場での競争力強化といった経済的インセンティブと密接に関連している。石灰石混合セメントの導入は、企業にとつての環境負荷低減とコスト削減の両面からのメリットを提供し、欧米市場での採用拡大を後押しした。

3-1 CO₂排出削減政策

(1)EU-ETSの影響

EU-ETSは、CO₂排出量の多い産業に対して一定の排出枠を設定し、その枠を超過した分の排出に関しては市場で排出権を購入することを義務付ける制度である。2005年に導入され、2020年代に入ってさらに厳格化される中で、セメント業界はこの制度による排出コストの増加に直面してきた。このような背景から、クリンカー使用を抑えた混合セメ

ントを導入することで、排出枠購入の負担を軽減する戦略がセメントメーカーの間で広がった。

図-4は、ドイツにおけるセメント種類の市場割合の推移を示したものの⁴⁾であり、このことを顕著に裏付けるものである。EU-ETSが導入された2005年以降、それまで6割近くあったCEMI(ポルトランドセメント)のシェアが3割程度まで急激に減少し、代わりにCEM II(主に石灰石混合セメント)やCEM III(高炉セメント)といった混合セメントが7割を占めることとなった。

(2)カーボンプライシング

EU-ETS以外にも、世界的にカーボンプライシングの導入が進んでおり、これが低炭素セメントの市場形成を加速させている。EU-ETSのような排出量取引制度だけでなく、炭素税の形で直接課税する政策も各国で導入されている。北米では、カリフォルニア州やカナダのブリティッシュコロンビア州でカーボンプライシングが進められている。特にカリフォルニア州では、炭素市場を活用し、建設業界においてCO₂排出量が少ない製品の選択を促す政策が取られており、従来のポルトランドセメントよりも混合セメントが相対的にコスト優位になるケースもある。

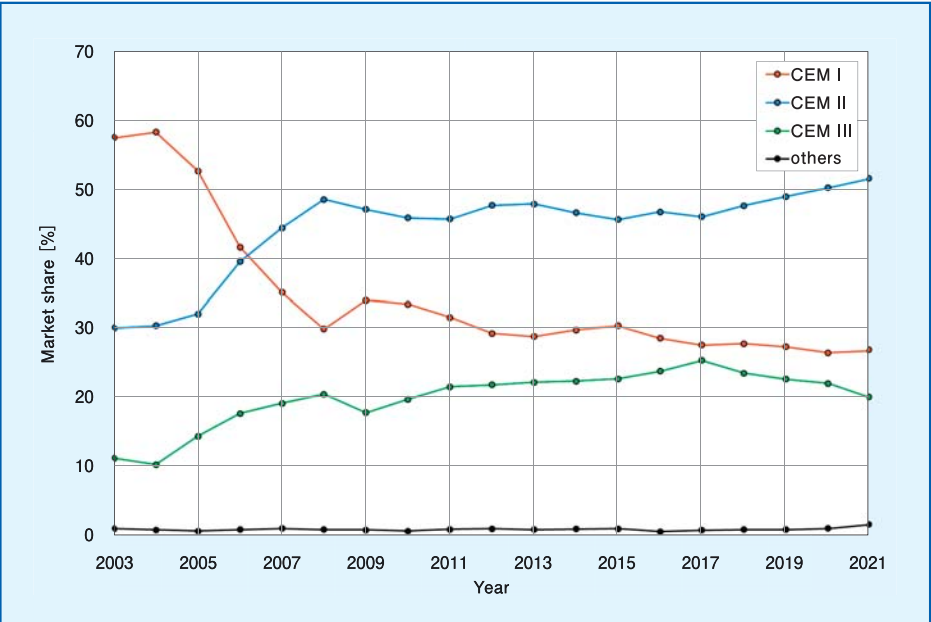


図-4 ドイツにおけるセメント種類の市場割合

3-2 グリーン購入政策と市場の変化

(1)公共調達基準の変化

政府や自治体による建設プロジェクトでは、CO₂排出量の少ない建材が優先的に採用される仕組みが確立されつつある。これは、欧州では Green Public Procurement(グリーン公共調達)、北米では Buy Clean Act として知られる政策に基づくものである。EUでは、政府調達の際に環境負荷の低い製品の使用が推奨されており、CEM II/L, LL(石灰石混合セメント)の採用を後押ししている。例えば、ドイツやフランスでは、特定の政府系インフラプロジェクトにおいて、CO₂排出量が一定基準を満たすセメントの使用が義務付けられるケースが増えている。米国のBuy Clean Actは、公共工事でのCO₂排出量を削減するため、セメントや鉄鋼の環境負荷を評価し、基準を満たすものだけを採用する仕組みである。

(2)EPD(環境製品宣言)の影響

EPD: Environmental Product Declaration は、製品ごとのライフサイクルアセスメントを通じた環境負荷を定量的に評価する仕組みであり、欧米で急速に普及しつつある。製品が生産される段階で排出されるCO₂(エンボディドカーボン)が数値化されることで、環境負荷の少ない製品が市場で選ばれやすくなる。公共調達の判断基準だけでなく、民間建築においても、LEED: Leadership in Energy and Environmental Design や BREEAM: Building Research Establishment Environmental Assessment Method などのグリーンビルディング認証制度が整備されており、認証取得にEPDが有効な手段となっている。

3-3 経済的メリットと市場競争力

(1)クリンカー代替によるコスト削減

クリンカーの製造にはエネルギーコストがかかるため、代替材を使用することで経済的メリットが生まれる。石灰石は比較的安価で供給が安定しており、セメントメーカーにとって経済性を向上させる要因

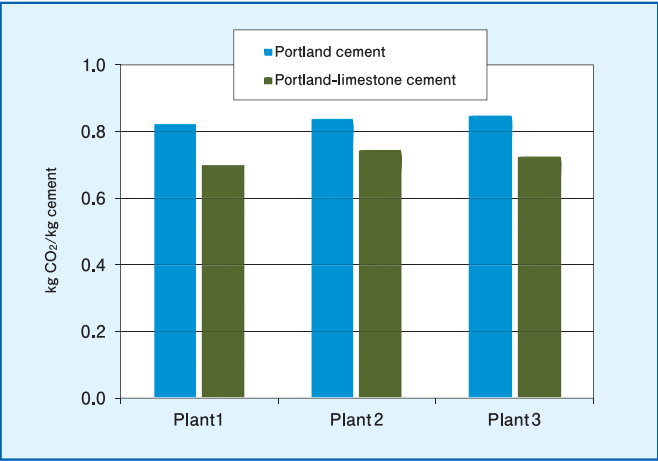


図-5 ポルトランドセメントと石灰石混合セメントの製造過程におけるCO₂排出量

となり得る。図-5は、ポルトランドセメントと石灰石混合セメントの製造過程におけるCO₂排出量を比較したものである⁵⁾。石灰石混合セメントはクリンカー含有量が少ないため、焼成時のエネルギー消費と原料由来CO₂排出量を削減できるが、一般にポルトランドセメントよりも粉砕エネルギーが多く必要となる。ただし、同図からわかるように、クリンカーが削減されることの方が総合的にはCO₂排出を削減でき、同時にエネルギー消費量も削減できるとされている。

(2)建設業界の受容性

石灰石混合セメントの普及には、建設業界における受容も重要な要素であり、材料コストや施工性などが求められる。セメントに石灰石を混合することにより、次のような3つのメカニズムを通じて、コンクリートの特性に影響を及ぼす。

- ・フィルター効果: 石灰石微粉末は一般にセメントの粒度分布の幅を拡げ、充填性を高める
- ・核生成効果: 水和物生成の起点となることにより、セメントの水和反応がわずかに加速される
- ・化学反応: カーボアルミネート系水和物が生成され、空隙量が減少する

一方、これらの要素がコンクリートの特性に及ぼす影響は、高炉スラグやフライアッシュなど他の混合材を用いた場合に比べると小さく、使用量がそれほど多くない範囲においては、従来のポルトランドセメントを用いた場合とほぼ同じ施工性

(流動性、分離抵抗性、ポンプ圧送性、仕上げ性など)が得られる。これらが実績として積み上がり、建設業界で受け入れられた。また、厳しい凍結融解抵抗性などが求められる環境においても、適切な混合材と組み合わせることによって、従来と同様の耐久

性が得られることが確認されている。

近年、環境配慮型の建築が広がる中、建設業界もCO₂排出量の少ない材料の選定を求められている。LEEDやBREEAMなどの環境認証を取得するためには、低炭素製品の使用が不可欠である。ESG投資の増加に伴い、建設会社やデベロッパーも環境対策を強化している。その一環として、持続可能な建築設計に石灰石混合セメントを採用する動きが進んでおり、企業のブランド戦略としての側面も持ち合わせている。

4. おわりに

本稿では、欧米における石灰石混合セメントの導入経緯と、その普及を後押しした要因について概観した。セメントは古くから人々の暮らしを支え続けてきた建設材料であり、今後も不可欠な素材であり続けることは間違いない。しかし、持続可能な発展を遂げるためには、その製造・利用方法の転換が求められている。世界的に進行している混合セメントの普及は、この流れの一環である。

一方で、セメント産業の変革は、単にセメント業界内の取り組みにとどまらず、建設業界、不動産デベロッパー・自治体、学術機関、規制機関・政策立案者、エンドユーザー、さらには社会インフラを利用する全ての人々を含む、多様なステークホルダーとの協力が重要である。そのため、混合セメントの導入が広く受け入れられるには、セメント規格の改訂にとど

まらず、設計コードや仕様書への記載、業界全体の意識改革、そして社会的な受容の促進が不可欠であることを欧米の事例をもって本稿の中で示した。

また、経済性の確保も大きな課題であり、環境負荷の低減とコスト競争力のバランスを取ることが求められる。特に日本では技術開発によってクリンカー製造時に多くの副産物や廃棄物を活用し、資源の有効利用を図ってきた歴史がある。混合セメント化の進展に伴って、これまでの運用の在り方にも変化が求められ、経済的な持続性の確保が課題となる。そのため、低炭素化を推進しつつ、安定した事業運営を維持する仕組みを構築することが重要である。それぞれのステークホルダーが協力し、知恵を結集させることで、環境と経済の両立を図りながら、持続可能な建設産業の発展に貢献していくことが求められる。

【参考文献】

- 1) CEMBUREAU: Key fact & figures, 2024.6
- 2) Matschei, T., et.al: Relationships of Cement Paste Mineralogy to Porosity and Mechanical Properties, International Conference on Modelling of Heterogeneous Materials with Applications in Construction and Biomedical Engineering, 2007.6
- 3) U.S. Geological Survey: consumption of blended cement, based on data
- 4) Verein Deutscher Zementwerke: vdz-online, based on data
- 5) Schmidt, M.: Cement with Intergrround Additives - Capability and Environmental Relief, Zement - Kalk - Gips, Vol. 45, 1992.



ひょうどう・ひこつぐ

【著者略歴】

1998年 日本セメント株式会社
(現 太平洋セメント株式会社)入社

現在 同社GX推進部GX推進グループリーダー