

炭酸ガス排出配慮型コンクリート構想

ウイグナラージャ シバクマラン*¹

Keywords : concrete, portland cement, CO₂ emissions, global warming, unit cement content, supplementary cement materials(SCM)

コンクリート, セメント, 炭酸ガス排出, 地球温暖化, 単位セメント量, 補助的セメント物質

1. はじめに

近年、天然資源の枯渇、地球温暖化、産業副産物処分場の確保困難などの地球環境問題が顕在化し、循環型社会への構築が急務になっている。このような流れの中で、環境に配慮した様々な種類のコンクリートが開発され利用されている。環境配慮型コンクリートには、①産業や農業副産物の有効利用を目指すもの（例えば、フライアッシュコンクリート、使用済み発泡スチロール混入コンクリート、もみ殻灰混入コンクリート、ガラスカレット入りコンクリート板）¹⁻⁴⁾、②天然資源の保全を目的とするもの（例えば、廃コンクリートから分離した再生骨材を利用したコンクリート、熔融スラグを骨材として利用したコンクリート）^{5,6)} や③コンクリート自体に環境浄化作用を付与させることを目的としたもの（例えば、生物や植物の付着・棲息が可能なポーラスコンクリート、予め種や栄養素等を入れ込んだ緑化コンクリート）^{7,8)} などがある。また、ポルトランドセメントの製造過程で炭酸ガスが大量排出されることから、炭酸ガス排出量の少ないプロセスで製造されたセメント類を使用した環境配慮型コンクリートの開発も続いている^{9,10)}。

本稿では、コンクリートの単位セメント量を大幅に減らすことにより炭酸ガス排出量削減に貢献できるという独自のコンセプトのもとでカナダで開発された環境配慮型コンクリート（商品名：“EcoSmart” Concrete）の現状について調査した結果を述べる。

2. セメントの生産と炭酸ガス排出の関係

2.1 世界のセメント生産量の推移

図-1 に全世界のセメント生産量の推移を示す。終戦

時の 1945 年に 5 千万トン以下であったセメントの生産は現在その 40 倍以上の 20 億トンにも迫っている。

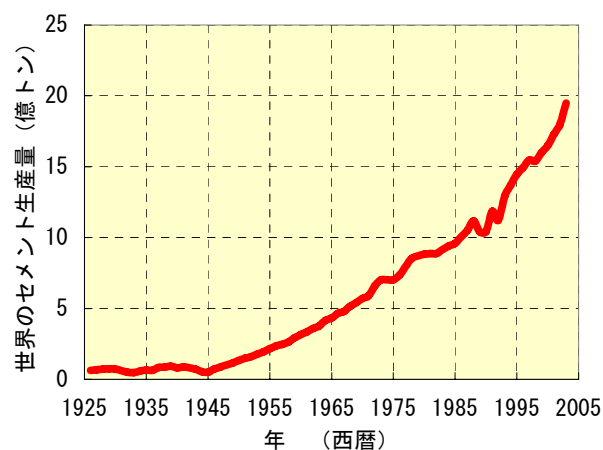


図-1 世界のセメント生産量の推移 (1926~2003年)¹¹⁾
World cement production from 1926 to 2003¹¹⁾

2.2 セメント製造に必要なエネルギー

石灰石や粘土などの原料を 1,450℃という高温焼成して作られるポルトランドセメントの製造過程で大量のエネルギーが使われている。セメント 1 トンの製造の使われる化石燃料の燃焼エネルギーと電力エネルギーを表-1 に示す¹²⁾。

表-1 ポルトランドセメントの製造に必要なエネルギー¹²⁾
Energy use in the production of Portland Cement¹²⁾

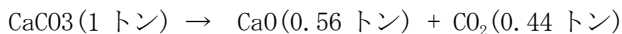
	ポルトランドセメントの製造方法	
	ロータリーキルン	シャフトキルン
化石燃料エネルギー (GJ/ton)	2.9~5.9	3.7~6.6
電力 (kWh/ton)	22~30	
合計 (GJ/ton)	3.5~6.2	3.7~6.6

* 1 技術センター建築技術開発部建築生産技術開発室

消費エネルギーは、製造方法や国、地域などによって異なるが、3.5～6.6 ギガジュール(GJ)/トンである。

2.3 セメント製造に伴う炭酸ガス排出量

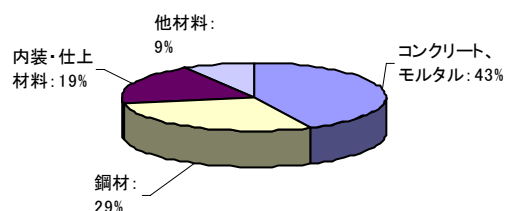
セメントの焼成過程では、主原料である石灰石の熱分解が起こるため、炭酸ガスが大量に発生する。



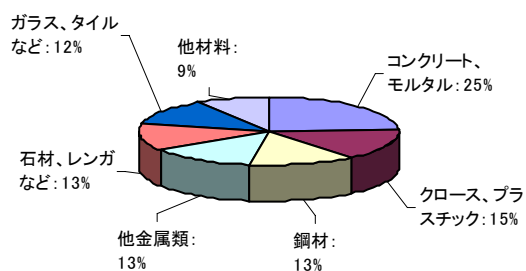
このため、製造過程で消費されるエネルギーから換算した炭酸ガス排出量と石灰石の熱分解に伴う炭酸ガス排出量をあわせると、ポルトランドセメント1トンの生産により800～1200kgの炭酸ガスが排出されていると試算されている¹²⁻¹⁵⁾。世界のセメント生産による炭酸ガス排出量は18億トン超で、世界の総炭酸ガス排出量の7～8%にのぼる。

2.4 コンクリートの「内在的CO₂排出値」

生産されたセメントの殆どが建設業の主資材であるコンクリートや他セメント製品に使用されているので、結果的にはセメントコンクリートやモルタルの生産が大量の炭酸ガス排出の主要因子の一つであることになる。例として、スポーツ施設及び個人住宅に使用される主な資材の生産に伴うCO₂排出量(“Embodied CO₂ emission intensity”、“内在的CO₂排出値”と呼ばれる)の割合を試算した結果を図-2に示す。何れの場合もコンクリートのCO₂排出量は他の資材より多いことが分かる。



a) 建物に使用される材料の炭酸ガス排出量の割合 (大型スポーツ施設の例)



b) 住宅に使用される材料の炭酸ガス排出量の割合

図-2 建築資材の内在的CO₂排出量の比較
Embodied CO₂ of materials in buildings

3. 炭酸ガス排出配慮型「EcoSmart Concrete」コンクリートの概要

3.1 炭酸ガス排出配慮型コンクリートのコンセプト

上記に述べたことを背景に、カナダのCANMET (Canada Center for Mineral & Energy Technology)のMohan Malhotra博士らがコンクリート中の単位セメント量を大幅に削減することによりコンクリートの内在的CO₂排出量を減らす構想を提案し、十数年以上にわたって研究開発を進めてきた¹⁷⁻¹⁹⁾。開発されたコンクリートは、現在「EcoSmart Concrete」と呼ばれ、その実用化が進んでいる。EcoSmart Concreteの基本的なコンセプトは以下の通りである。

- ・必要な強度及び耐久性を損なわずに、コンクリートの単位セメント大幅に削減する。セメントの削減目標は30～60% (重量%)の範囲である。
- ・削減されたセメントの代わりに、補助的セメント性物質 (Supplementary Cementitious Materials、以下、SCM) を使用する。また、必要な強度を確保するために、単位水量を低く調整し、高性能減水剤や硬化促進材などの混和剤を併用することがある。

SCMとしては、産業及び農業副産物であるフライアッシュ、シリカヒューム、高炉スラグ、もみがら殻灰などがあげられている。副産物であるSCMは内在的CO₂排出値がセメント(800～1200kg/ton)に比べて極めて小さい。例えば、フライアッシュの内在的CO₂排出値は5kg/tonで、高炉スラグは26kg/tonである²⁰⁾。

なお、カナダ国内での入手の容易さ、コストなどの理由から、現時点ではEcoSmart Concreteに使用されているSCMは殆どフライアッシュのみである。

EcoSmartコンクリートの一例として、セメントの50%をフライアッシュに置き換えたものの調合の概要を表-2に示す。このコンクリートは、カナダのToronto市に2001年に竣工したビル(York University Computer Science Building)に実際に使われたものである²¹⁾。

表-2 EcoSmartコンクリートの調合例²¹⁾
An example of the mix proportions of EcoSmart concrete²¹⁾

セメント	フライアッシュ	水	バインダー ー/水比	設計基準強度 (56日) MPa
kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	
170	170	135	40	30

3.2 EcoSmart Concrete の特徴

EcoSmart Concrete は重量比でセメントの 30~60% をフライアッシュ置き換えて作られるものである。セメントの一部をフライアッシュのような SCM に置換したコンクリートは古くから知られており、多くの実績がある。例えば、フライアッシュは米国で 1940 年代の後半にはじめてコンクリートに使用され、その後各国でフライアッシュコンクリートが広く使用されるようになった。通常のフライアッシュコンクリートに比べると EcoSmart Concrete は下記の異なった性格がある。

(a)使用目的：通常のフライアッシュコンクリートは、石炭火力発電所で副産されるフライアッシュの有効利用、フレッシュコンクリートの性状改善、コンクリートの硬化熱改善や乾燥収縮緩和などの目的で使われる場合が多い。これに対して EcoSmart Concrete は、コンクリートに使用されるセメント量の削減を通じて、コンクリートによる CO₂ 排出量を削減するという目的を強調している。

(b)セメントの置換率：30~45%のセメントをフライアッシュに置換した一部の例（マスコンクリートなど）を除けば、通常は、10~30%の置換率のフライアッシュコンクリートが使用されていることが多い。EcoSmart Concrete は、30~60%という高い置換率を目指している。

地球温暖化防止対策が急務になっている現在、EcoSmart Concrete は、CO₂ 排出量の削減に貢献できるコンクリートであることを顧客、設計者や他関係者に強くアピールできる特徴を持っている。

4. EcoSmart Concrete コンクリートの適用

4.1 EcoSmart コンクリートの使用に関する制限事項

炭酸ガスの排出削減に貢献するという大きなメリットがある一方、フライアッシュを大量に使う EcoSmart コンクリートは、硬化時間が長い、強度発現が遅いという短所もある。これにより、コンクリートの仕上げの時期や型枠を外す時期が遅れることがあり、全体の作業工程に悪影響を及ぼす可能性もある。また、使用されるフライアッシュの品質（化学成分、粒度分布、粒子の形状、未燃カーボン含有量など）によってフレッシュコンクリートの性状や耐久性が変わる場合もある。さらに、国や地域によっては、コンクリート中のフライアッシュ量の上限が規制されている場合もある。

従って、EcoSmart コンクリートを利用しようとする場合は、建築工程、経済性、コンクリートに関する規制など様々なことを考慮しながら、EcoSmart コンクリ

ート使用可能な部位を特定し、その部位に適した配合や打設計画を綿密に策定する必要がある。

4.2 EcoSmart コンクリートの適用例

2000 年以降、カナダでは数十件の建物に EcoSmart コンクリートが使用され、その数が順調に増えているようである。表-3 に EcoSmart コンクリートが使用された物件の例を示す。また、図-3 には EcoSmart コンクリートが適用された大型物件で、2001 年に完成した高層マンションの写真を示す。

表-3 EcoSmart コンクリートが使用された物件の例
Some examples of buildings where EcoSmart Concrete was used

物件概要	完成時期	フライアッシュ置換率	使用部位	備考
3 階建てオフィスビル、Liu Center, British Columbia 州	2000 年	33 ~ 50%	床スラブ	全体で、セメントの使用量を 35% 削減
30 階建て高層マンション、Vancouver 州。延べ床面積= 18,000m ²	2001 年	45%	フーチング	
		33%	耐震壁	
		33%	16F までの柱	
3 階建て教育/研究施設、York University Computer Science Building, Toronto 市	2001 年	50%	フーチング、基礎壁、耐震壁、柱。梁、床スラブなど	
改築工事：2 階建て会議場、Whistler Conference Center, British Columbia 州	2002 年	35 ~ 40%	床スラブ	

5. おわりに

カナダでは、フライアッシュのような SCM の使用を推進するため、EcoSmart Foundation という NPO が 2000 年に設立された（ホームページ：http://www.ecosmart.ca/index.cfm）。この NPO は、施主、設計者、施工者や生コンクリートプラント業者に対しての PR、技術支援な

どを通じて、単位セメント量を減らしたコンクリート使用の促進を図っている。また、新しい SCM（例えば、メタカオリンのような鉱物）の使用によるコンクリート単位セメント量の削減や物性改善についての研究活動も行っている。このような活動により、国内での SCM の使用量の平均値を 10%（対セメント使用量）から 25% まで引き上げることができ、カナダの炭酸ガス排出量を 150 万トン減らすことが可能であるとしている²²⁾。また、技術の展開を中国や他の国へ拡大することについても検討しているようである。



図-3 EcoSmart コンクリートが使用された 30 階建て高層マンション（カナダ、Vancouver 市）
A high-rise residential unit where EcoSmart concrete was used

参考文献

- 1) 伊藤憲治, 江原恭二, 辻井達也, 西田 朗, 日比野雄一, 居森基行: フライアッシュを用いたコンクリート建物基礎への適用, その1, その2, その3, 日本建築学会講演梗概集, pp. 723-728, 2002年8月.
- 2) 藤原忠司: 廃棄物の有効利用, コンクリート工学, Vol. 43, No. 1, pp. 14-16, 2005.
- 3) 田中秀男, 土屋弘志, 長瀬公一, 田端 淳, 細萱理子: 廃発泡スチロールを骨材に用いたセメント系吸音材の研究, 大成建設技術研究所報 第32号, pp. 723-728, 1999.

- 4) 和田一郎, 河野俊夫, 川上 洵: コンクリート混和用もみ殻灰の製造に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol. 53, pp. 347-353, 1999.
- 5) 早川光敬, 丸嶋紀夫: コンクリート解体材の骨材への再利用技術, 大成建設技術研究センター報 第36号, pp. 01/2-01/6, 2003.
- 6) 佐々木 肇, 喜多達夫: 廃棄物焼却灰溶融物のコンクリート骨材への有効利用技術, コンクリート工学, Vol. 40, No. 6, pp. 14-20, 2002.
- 7) 玉井元治: ポーラスコンクリート河川護岸工法の概要, コンクリート工学, Vol. 39, No. 8, pp. 10-15, 2001.
- 8) 緑化コンクリート, 日本植生株式会社のWebページ http://www.nihon-shokusei.co.jp/river/ryokakon/ryokakon_top.htmlに掲載.
- 9) 高炉セメントB種, 日鉄セメント株式会社のWebページ <http://www.nittetsu-cement.co.jp/cement01bb.htm>
- 10) Explanation on TecEco technologies, Published in Web page <http://www.tececo.com/about.technologies.php> of TecEco Pty. Ltd., Australia.
- 11) 米国内務省の地質調査部門の Web ページ <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/of01-006/cement.xls> より.
- 12) Hendricks, C.A., Price, E.W.L., Martin, N., Meida, L.O., deJager, D. and Riemer, P.: Emission Reduction of Greenhouse Gases From The Cement Industry, Paper presented at the Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Interlaken, August 30 - September 2, 1998.
- 13) Malhotra, V.M.: Making Concrete Greener With Fly Ash, Concrete International, Vol.21, No.5, pp.61-66, 1999.
- 14) Mehta, P.K.: Concrete Technology for Sustainable Development, Concrete International, Vol.21, No.11, pp.47-53, 1999.
- 15) Bouzoubaa, N. and Malhotra, V.M.: Performance of Lab-Produced HVFA-Blended Cements in Concrete, Concrete International, Vol.23, No.4, pp.29-33, 2001.
- 16) Malhotra, V.M.: Making Concrete Greener With Fly Ash, Concrete International, Vol.21, No.5, pp.61-66, 1999.
- 17) Malhotra, V.M.: Superplasticized Fly Ash Concrete for Structural Applications, Concrete International, Vol.8, No.12, pp.28-31, 1986.
- 18) Bisailon, A., Livest, M. and Malhotra, V.M.: Performance of High-Volume Fly Ash Concrete in Large Experimental Monoliths, ACI Materials Journal, Vol.19, No.2, pp.178-187, 1994.
- 19) Bouzoubaa, N., Zhang, M.H., Bilodeau, A. and Malhotra, V.M.: Mechanical Properties and Durability of Concrete Made with High Volume Fly Ash Blended Cements, Proceedings of the Sixth CANMET/ACI/JCI Conference, ACI SP-178, pp. 575-603, 1998.
- 20) Vares, S. and Hakkinen, T.: Environmental Burdens of Concrete and Concrete Products, Nordic Concrete Research Publication No. 21, 1998. <http://www.itn.is/ncr/publications/doc-21-10.pdf> に掲載.
- 21) Use of EcoSmart Concrete In York University Computer Science Building, Report by Busby Perkins + Associates Architects, http://www.ecosmart.ca/kb_viewdocumentdetail.cfm?RecordID=233 に掲載, 2001.
- 22) Action Plan 2000 presentation slides, <http://www.ecosmart.ca/kbase/filedocs/prsageapeng04.pdf> に掲載, 2004.