各国の製造方法および環境条件を考慮したセメントの環境影響評価

桐野裕介^{*1} 新見龍男^{*2} 河合研至^{*3} 伊坪徳宏^{*4}

^{*1} 太平洋セメント株式会社 中央研究所(〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

^{*2} 株式会社トクヤマ セメント開発グループ(〒745-8648 山口県周南市御影町 1-1)

^{*3} 広島大学 大学院工学研究科社会基盤環境工学専攻(〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

^{*4} 東京都市大学 環境学部(〒224-8551 神奈川県横浜市都筑区牛久保西 3-3-1)

要旨：各国のセメント製造において重要となる環境影響を明らかにすることを目的に、新しく開発したLIME3による統合化評価を行った。その結果、資源消費・大気汚染による環境影響および廃棄物活用による削減貢献は、国ごとに大きく異なる結果が得られた。混合材による環境負荷低減効果も同様に国ごとに大きく異なり、資源消費および大気汚染の影響が大きい国では、CO₂排出低減とのCo-benefit(共通便益)が大きく得られた。一方、クリンカ製造時の廃棄物活用による削減貢献が大きい日本では、混合材の活用によって廃棄物活用量が減少することによるトレードオフの影響が大きくなった。

キーワード：セメント、混合材、廃棄物・副産物、二酸化炭素(CO₂)、ライフサイクルアセスメント(LCA)、日本版被害算定型影響評価手法(LIME)

1. はじめに

2015年の国連サミットにて採択された、持続可能な開発目標(SDGs)の推進に向け、世界各国では多角的な目標を見据えた産業活動が求められている。環境の観点においても、地球温暖化のみならず資源消費や生物多様性等、多様な環境影響を考慮した産業活動に取り組んでいく必要がある。

セメントは、その製造過程において多くのCO₂を排出するため、地球温暖化の観点からは環境負荷の大きい材料として取り扱われることが多い。一方、日本国内で製造されるセメントは、その原料や焼成用の熱エネルギー源として、他産業から排出された多量の廃棄物・副産物を活用しているため、資源循環の観点からは環境問題の解決に大きく貢献している。この二つの環境問題は、国内のセメント製造において、他の環境問題(資源消費、大気汚染等)と比較して影響が大きく¹⁾、また、トレードオフの関係になる場合もある。そのためセメント産業においても、地球温暖化および資源循環を含む多様な環境影響に関し、慎重に議論していく必要がある。

これまで著者らは、多様な影響領域を考慮した環境影響評価を行い、日本国内で製造されたセメントはリサイクル資源の活用、特に廃棄物の活用による環境貢献の影響が大きいことを示してきた^{例えば1, 2)}。一方、海外で製造されるセメントは、その製造方法および環境条件の違いから、日本と異なる環境影響が重要となる可能性が考えられる。

そこで本研究では、世界各国の環境影響を評価するために新しく開発した「LIME3」³⁾を用い、各国で製造されているクリンカおよびセメントの環境影響を統合的に

評価し、重要となる影響領域を明らかにすることを目的とした。

2. 評価方法

2.1 評価に用いたデータ

持続可能な発展のための世界経済人会議(WBCSD)のセメント産業部会(CSI)にてデータを公開しているセメント生産国の一部を対象に、LIME3による環境影響評価を行った。アジアにおいては、データを公開している全ての国(インド、フィリピン、タイ)を対象とした。アジア以外においては、各地域でデータを公開している国のうち、最もセメント生産量の多い国を対象とした。具体的には北米はアメリカ、南米はブラジル、ヨーロッパはドイツ、アフリカはエジプトを対象とした。なお、オセアニアにはデータを公開している国が存在しなかった。また、世界最大のセメント生産国である中国は、中国・韓国・日本の三か国合計データが公開されているものの、データのカバー率が2%と非常に低いため、評価対象から除外した。ロシアに関しては、データが公開されていなかった。

セメントの主なライフサイクルと本研究におけるシステム境界をFig. 1に示す。評価は、天然原料の採掘からセメントの製造工程までを対象とした。輸送に関しては十分なデータが得られなかったことから全ての輸送工程を評価に含めなかった。なお、土木学会⁴⁾では、鉄筋コンクリートのライフサイクルCO₂における輸送の占める比率を3.6%と推定しており、本研究においても輸送の影響は大きくないことが推測される。また、廃棄物の活用による、CO₂排出および廃棄物埋め立ての削

減貢献効果を併せて評価した。機能単位はセメント 1t とした。

評価におけるインベントリデータには Table 1 に示す各国で製造されたクリンカおよびセメントの平均値を用いた。なお、ここでのセメントにはポルトランドセメントおよび混合セメントの両者を含む。インベントリデータは WBCSD CSI の Getting the Numbers Right (GNR)⁵⁾および日本のセメント協会のデータ⁶⁾を用いた。日本以外の国で生産されるセメントにおいて、GNR にて公開されていないデータは以下の手法で算出した。クリンカの天然原料の使用量は 1500kg/t と仮定した。クリンカの廃棄物使用量は日本以外の国では少ないことが指摘されているが⁷⁾、公開されているデータは無かったため、Heidelberg Cement の Sustainability report⁸⁾に記載されている代替原料率(3.6%)を用いて一律に設定した。石炭使用量は、石炭以外の化石エネルギー源を無いものと仮定し、熱量原単位と化石エネルギー比率の積を瀝青炭の低位発熱量⁹⁾で除することによって求めた。CO₂ 排出原単位は、クリンカ製造において直接排出した CO₂(Scope 1)のみを評価し、自家発電および購入電力由来(Scope 2)の CO₂ 排出は十分なデータが得られなかったため、評価しなかった。NO_x、SO_x、ばいじんの排出量は、WBCSD CSI のコアメンバーが CSR レポートで公開している値の平均値を用いた。なお、NO_x、SO_x、ばいじんの値の変動係数は、それぞれ 0.25、0.85、0.54 となっており、変動が大きい項目もあった。一方、大気汚染の影響評価における NO_x、SO_x、ばいじんの平均的な寄与度はそれぞれ 0.70、0.13、0.16 となっており、最も変動の小さい NO_x の寄与度が大きいことによる評価結果への影響は大きな

ことが推定される。

セメントのデータは、クリンカのデータおよびセッコウと混合材の使用量⁵⁾から算出した。なお、中間製品であるクリンカの輸出入により、各国で製造されるクリンカと消費されるクリンカは厳密には異なるが、十分なデータが得られなかったため、本研究では同一と仮定した。高炉スラグ、フライアッシュのみを副産物として取り扱い、その他の混合材およびセッコウは天然資源と仮定した。

2.2 環境影響評価方法

新しく開発した環境影響評価手法「LIME3」³⁾を用い、各国の環境条件下において、クリンカおよびセメントの

Fig. 1 Life cycle of cement and system boundary in this study (dotted line)

Table 1 Inventory data of clinker and cement in each country

			Japan	India	Philippines	Thailand	United States of America	Brazil	Germany	Egypt	Ref.
Clinker	Natural raw materials	kg/t	1260	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	6, E*
	By-products (for raw materials)	kg/t	0	0	0	0	0	0	0	0	—
	Wastes (for raw materials)	kg/t	272	56	56	56	56	56	56	56	6, 8, E*
	Coal	kg/t	96	116	127	116	127	108	50	140	5, 6, E*
	CO ₂	kg/t	775	818	856	836	843	829	676	868	5, 6
	NO _x	g/t	1474	1446	1446	1446	1446	1446	1446	1446	6, E*
	SO _x	g/t	77	304	304	304	304	304	304	304	6, E*
	Particulate matter	g/t	31	63	63	63	63	63	63	63	6, E*
Cement	Clinker	kg/t	841	753	712	845	909	810	855	891	5, 6
	Natural materials (for mineral admixture and calcium sulfate)	kg/t	63	53	190	154	90	144	138	109	5, 6
	By-products (for mineral admixture)	kg/t	96	194	98	0	0	46	7	0	5, 6

E* : Inventory data is estimated by the method described in the text.

Fig. 2 Integrated assessment results of clinker and cement by LIME3

環境影響評価を行った。環境影響には、CO₂ のように世界全体のどの場所で排出されても同一の影響を与える項目がある一方、廃棄物の埋め立てによる影響のように、地域における処分場の残余年数・ユーザーコストやその地域の生物多様性・一次生産により変動しうる項目もある³⁾。そのため、海外を想定した評価では当該地域の環境事情を反映した手法を用いることが重要となり、また LIME3 ではこのような評価が可能となっている。

環境影響評価にあたっては、環境負荷を負の値、環境負荷の削減貢献(環境貢献)を正の値として算出した。統合化は次式³⁾に基づき、G20 の重みづけを用いた経済価値評価を行った(単位は US\$)。

統合化結果

$$= \sum_{Impact} \sum_X (Inv(X) \times IF_2^{Impact}(X)) \quad [1]$$

ここに、 $Inv(X)$: インベントリ項目 X の排出量

IF_2^{Impact} : インベントリ項目 X の影響領域

Impact に関する統合化係数

また LIME3 の評価において、社会資産の被害係数の算定に用いる割引率は 3 %を用いた。

評価における廃棄物および副産物の取扱いについては、下記の通りとした。廃棄物のうち原料の代替となるものに関しては、本来埋立て処分されることによって発生したはずの環境負荷をセメントが受け入れることに

よって回避したものとみなし、削減貢献として取り扱った。廃棄物のうち熱エネルギー源の代替となるものに関しては、本来セメント工場の外で焼却処分されることによって発生したはずの CO₂ をセメント工場で受け入れることによって回避したものとみなし、公表されている算定方法に従い¹⁰⁾、当該分の CO₂ 排出をセメント製造時の CO₂ 排出から差し引いた(すなわちネット CO₂ 排出原単位を用いた)。副産物に分類される品目(ここでは高炉スラグ、フライアッシュのみを仮定)については、もともと廃棄されるはずのものではなく、有価の製品として市場に流通することが前提であることから、埋め立て回避による削減貢献は考慮しなかった。副産物に主製品の環境負荷を配分する方法に関しては ISO14044¹¹⁾に定められているものの、供給元からのデータ提供が十分でないことから、ここでは副産物の環境負荷を無いものと仮定し、資源消費の低減等による環境負荷低減効果を間接的に反映した。

3. 評価結果

3.1 クリンカの環境影響評価結果

各国で製造される平均的なクリンカの評価結果を Fig. 2 に示す。環境負荷を影響領域ごとに見た場合、CO₂ 排出による環境影響(地球温暖化)は全ての国で大きく、かつ各国間の相違は比較的小さいものと評価された。これはクリンカ製造における CO₂ 排出量は、各国で差があるものの、それほど差は大きくなく、また、LIME3 の CO₂ 排出による統合化係数が各国で同一のた

めである。一方、資源消費による環境影響はフィリピンで非常に大きく評価された。これは埋蔵量の少ない国の石炭を用いることにより、持続可能性(可採年数)が低く評価されたことが原因である。大気汚染による環境影響はインドおよびタイで非常に大きく評価された。これは環境負荷物質の排出量が同一でも拡散範囲に居住する人口が多いため、合計の健康被害が大きいためである。クリンカ製造による環境影響の合計を見た場合、インド、フィリピン、タイは他の国と比較し、非常に大きい結果が得られた。これは上述の通り、資源消費もしくは大気汚染による環境影響が、他国と比べ大きくなったためである。

廃棄物の埋め立て回避による削減貢献(Fig. 2 の正の値)まで評価した場合、日本、アメリカ、ドイツでは、本影響が大きくなることが分かった。特に日本では廃棄物を多量に活用してクリンカが製造されていること、および廃棄物処分におけるユーザーコストが大きいことから、埋め立てを回避することによる削減貢献効果が非常に大きい。なお、日本国内の結果は、LIME2 による評価と同様の傾向であった¹⁾。アメリカおよびドイツでも廃棄物処分におけるユーザーコストが大きいことから、廃棄物活用による削減貢献が高く評価された。ただし、日本以外の国での廃棄物活用量が推定値であること、および LIME3 における海外の廃棄物に関する統合化係数の推定精度が低いことから、アメリカおよびドイツの評価結果の信頼性は他の結果より低いと考えられる。

削減貢献まで考慮した正味の環境影響においては、クリンカの統合化評価結果は、日本では正の値となり、他国と大きく異なる結果が得られた。また、信頼性については今後検証の余地はあるものの、アメリカ、ドイツでも環境負荷と削減貢献の大きさは同程度となり、正味の環境影響は 0 に近い値となった。一方、その他の国では削減貢献は高く評価されず、環境負荷のみを評価した場合と大きな差は見られなかった。

3.2 セメントの環境影響評価結果

各国で製造される平均的なセメントの評価結果を Fig. 2 に示す。クリンカと比較した場合、環境負荷・削減貢献ともに小さくなる傾向にあったものの、重要となる影響領域はクリンカと同様であった。これはセッコウおよび混合材の環境影響が非常に小さいため、クリンカの使用量を低減する効果が主に反映されたためである。

環境負荷のみを考慮した場合、クリンカとセメントの統合化評価値の差は、インド、フィリピン、タイで大きくなった。これらの国では混合材の使用量が比較的多いことに加え、クリンカ製造における資源消費もしくは大気汚染による環境影響が他国と比較して大きいため、クリンカ比率の低下による環境負荷低減効果が大きい。一般に混合材活用の効果としては CO₂ 排出低減が考えられているが、これらの国では CO₂ 排出低減のみならず、

資源消費もしくは大気汚染の低減効果も大きく、Co-benefit(共通便益)が得られることが分かった。

一方、廃棄物の埋め立て回避による削減貢献まで考慮した場合、日本では、セメントの統合化評価値はクリンカの値より小さくなった。これはクリンカ製造における廃棄物活用による削減貢献が大きいいため、クリンカ量を低減することによって、削減貢献が減少するためである。したがって日本では混合材活用による環境負荷低減効果は、廃棄物活用とのトレードオフの関係となることが分かる。また、信頼性は低いものの、アメリカ、ドイツでは環境負荷と削減貢献の大きさが同程度となるため、クリンカとセメントの値は同程度となった。一方、その他の国では削減貢献は高く評価されないため、環境負荷のみを評価した場合とほぼ同様の結果が得られた。

3.3 評価結果に及ぼす製造方法と環境条件の影響

セメントの環境影響評価結果に及ぼす、製造方法と環境条件の影響を、各国の影響領域ごとに評価するため、以下の数式で定義される値の計算を行った。

製造方法の影響

$$= \left| \sum_X ((Inv(X) - Inv(X)_{avg}) \times IF_2^{Impact}(X)) \right| \quad [2]$$

環境条件の影響

$$= \left| \sum_X (Inv(X) \times (IF_2^{Impact}(X) - IF_{2,avg}^{Impact}(X))) \right| \quad [3]$$

ここに、 $Inv(X)_{avg}$: インベントリ項目 X の平均排出量

$IF_{2,avg}^{Impact}(X)$: インベントリ項目 X の影響領域 Impact に関する平均統合化係数

なお、排出量および統合化係数の平均値は、本研究で対象とした 8 カ国(日本、インド、フィリピン、タイ、アメリカ、ブラジル、ドイツ、エジプト)の単純平均値とした。

式[2]および式[3]で定義した、製造方法の影響と環境条件の影響の関係を Fig. 3 に示す。地球温暖化は全ての国で環境条件が一定のため、製造方法の影響が大きかった。ただし、後者の影響でも最大 2US\$/t 以下と小さく、環境影響の合計に及ぼす影響は大きくない。資源消費および大気汚染に関しては、製造方法の影響と比較して、環境条件の影響が大きい傾向にあった。また、その大きさは最大で 8US\$/t であり、環境影響の合計に及ぼす影響が大きい。廃棄物の埋め立て回避による削減貢献は、製造方法・環境条件のどちらの影響も大きい結果が得られた。これは日本とそれ以外の国では廃棄物の使用量が大きく異なること⁷⁾、および LIME3 の統合化係数が国ごとに大きく異なるためである。

Fig. 3 Effect of production method and environmental condition for environmental impact of cement

4. まとめ

各国のクリンカおよびセメント製造において重要となる環境影響を明らかにすることを目的に、LIME3 による統合化評価を行った。得られた結果は以下の通りである。

- (1) CO₂ 排出による環境影響(地球温暖化)は全ての国で大きく評価された。一方、資源消費の影響はフィリピン、大気汚染の影響はインドおよびタイで大きく評価された。環境影響の合計においてもフィリピン、インド、タイは、他国と比較して大きかった。
- (2) 廃棄物の埋め立て回避による削減貢献は、日本で大きく評価された。また、削減貢献まで考慮した、正味の環境影響においても日本が非常に高く評価された。
- (3) 混合材による環境負荷低減効果はインド、フィリピン、タイで大きくなった。これは CO₂ 排出低減のみならず、資源消費もしくは大気汚染の低減を伴う Co-benefit(共通便益)が大きく得られたためである。一方、日本では、混合材の活用は廃棄物活用の低減によるトレードオフの影響が大きくなった。
- (4) 環境影響評価結果に及ぼす製造方法と環境条件の影響を解析した結果、資源消費および大気汚染による環境影響では、環境条件による影響が大きかった。一方、廃棄物の埋め立て回避による削減貢献では、製造方法・環境条件のどちらも大きい影響があることが判明した。
- (5) 以上の結果より、セメント製造に関する環境影響を効果的に改善していくためには、各国の製造方法および環境条件を考慮した環境影響評価結果を元に、改善方法を検討していく必要があることが判明した。

謝辞：

本研究の一部はセメント協会研究奨励金によって行われたものである。本研究の実施にあたっては太平洋セメント(株)の星野清一氏から多大なご協力を頂いた。また、(株)トクヤマの加藤弘義氏、茶林敬司氏、太平洋セメント(株)の上野直樹氏、田中敏嗣氏、平尾宙氏、内

田俊一郎氏、広島大学の柴崎悠吾氏からご助言を頂いた。LIME3 の評価にあたっては LCA 日本フォーラムの LIME3 活用検討研究会からご助言を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献：

- 1) 星野清一ほか：セメントの廃棄物・副産物の資源化を表す環境指標による各種セメントの評価、セメント・コンクリート論文集、Vol. 69、pp. 679-686 (2015)
- 2) 桐野裕介ほか：廃棄物・副産物活用および CO₂ 排出を考慮した環境指標による橋梁の評価、セメント・コンクリート論文集、Vol. 72、pp. 352-358 (2018)
- 3) 伊坪徳宏、稲葉敦編：“LIME3 グローバルスケールの LCA を実現する環境影響評価手法”、産業環境管理協会 (2018)
- 4) 土木学会：コンクリート技術シリーズ、62、コンクリートの環境負荷評価(その 2) (2004)
- 5) WBCSD-CSI, GNR, <https://www.wbcsdcement.org/GNR-2016/>
- 6) セメント協会：セメントの LCI データの概要(2016) http://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jgli_01.pdf
- 7) Gartner and Hirao : A review of alternative approaches to the reduction of CO₂ emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete, Cement and Concrete Research, No. 78, pp. 126-142 (2015)
- 8) Heiderberg Cement : Sustainability report (2017)
- 9) IPCC : Guidelines for national greenhouse gas inventories (2006)
- 10) WBCSD-CSI : CO₂ and energy accounting and reporting standard for the cement industry version 3 (2011)
- 11) ISO14044 : Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines (2006)

ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF WORLD CEMENTS CONSIDERING PRODUCTION METHOD AND ENVIRONMENTAL CONDITION IN EACH COUNTRY

Yusuke KIRINO^{*1}, Tatsuo SHINMI^{*2}, Kenji KAWAI^{*3} and Norihiro ITSUBO^{*4}

*1 TAIHEIYO CEMENT CORPORATION, Central Research Laboratory (2-4-2, Osaku, Sakura-shi, Chiba 285-8655, Japan)

*2 TOKUYAMA CORPORATION, Development Dept. Cement Business Div. (1-1, Mikage-cho, Shunan-shi, Yamaguchi 745-8648, Japan)

*3 HIROSHIMA UNIVERSITY, Graduate School of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering (1-4-1, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima-shi, Hiroshima 739-8527, Japan)

*4 TOKYO CITY UNIVERSITY, Faculty of Environmental Studies (3-3-1, Ushikubo-Nishi, Tsuzuki-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 224-8551, Japan)

ABSTRACT : A new environmental impact assessment method, LIME3, was applied to understand important impact categories of cement produced in each country. Environmental impacts of natural resource consumption and air pollution were different depending on the country. The effect of landfill avoidance by using wastes in clinker production was also different. Therefore, reducing the environmental impact by using mineral admixture was significantly different depending on the country. Some countries could get co-benefits between reduction of CO₂ and natural resource consumption or air pollution by using mineral admixtures. In Japan, however, the trade-off effect between CO₂ reduction and waste use in clinker production was significant by using mineral admixture.

KEY WORDS : Cement, Mineral admixture, Waste and by-product, Carbon dioxide (CO₂), Life cycle assessment (LCA), Life-cycle impact assessment method based on endpoint modeling (LIME)