論文　多様な影響領域を考慮した各国のコンクリートの環境影響評価

桐野裕介[*1]　新見龍男[*2]　河合研至[*3]　伊坪徳宏[*4]

要旨：各国のコンクリートのライフサイクルにおける重要な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，解体コンクリートの埋立て，化石資源の消費，およびCO_2排出による環境影響が重要となる国が多かった。また，一部の国では大気汚染の影響が大きくなった。工程別の評価では，廃棄・リサイクル工程の影響が最も大きくなる国が多かった。次いで，施工・解体工程の影響が大きくなる国が多く，セメント製造工程の影響は相対的に小さい傾向にあった。

キーワード：セメント，廃棄物，CO_2，化石資源，大気汚染，解体コンクリート，LCA

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。

一方，コンクリートの環境負荷は，CO_2排出に注目して評価されることが多く，また，CO_2排出のみを考慮して新たな材料開発が行われることも多い。ある特定の影響領域のみを考慮して評価や開発が行われた場合，考慮していない別の側面による環境負荷が増大し(いわゆる，トレードオフ)，総合的な環境負荷が意図せず増加してしまう可能性が考えられる。特に，SDGsのように，多角的な目標の達成を目指す場合，総合的な視点からの評価および材料開発が求められる。

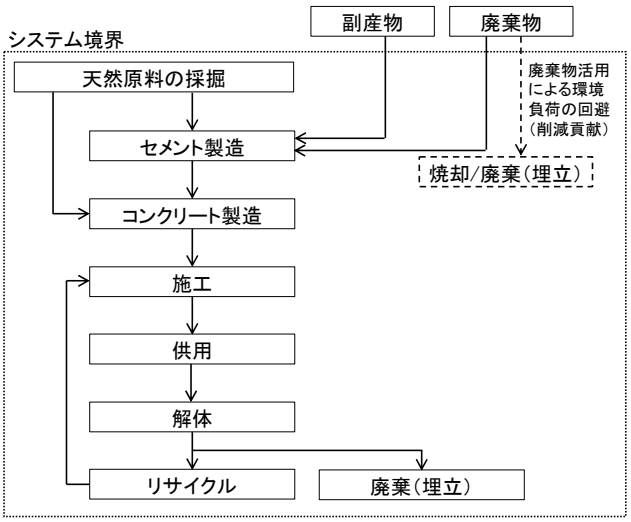
これまで著者らは，総合的な視点から，各国のセメントの環境影響評価を行い，CO_2排出以外にも，大気汚染や資源消費が重要な環境影響となる国があることを示してきた[1)]。また，日本国内のセメント製造においては，クリンカ製造時の廃棄物活用による環境貢献が大きく，CO_2排出低減を目的にクリンカ使用量を低減させた場合，トレードオフの影響が大きいことを示してきた[例えば 1)2)]。一方，これらの研究はセメントの製造工程のみの評価に留まっており，セメントの主用途であるコンクリートのライフサイクル全体を通した評価は，国内を対象とした検討[3)]しか行っていない。

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」[4)]を用い，各国で使用されているコンクリートのライフサイクルを通じた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 評価範囲

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。



図－1　コンクリー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（点線）

*1 太平洋セメント（株）中央研究所　理博　（正会員）
*2 （株）トクヤマ　セメント開発 Gr.　工修　（正会員）
*3 広島大学　大学院工学研究科　社会基盤環境工学専攻　教授　工博　（正会員）
*4 東京都市大学　環境学部　教授　工博

コンクリー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**図-1** に示す。評価は，天然原料の採掘から解体コンクリートの廃棄・リサイクルまでを対象とし，機能単位はコンクリート 1 m^3 とした。

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 CO_2 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[5]，当該分の CO_2 排出をセメント製造時の CO_2 排出から差し引いた（すなわち，ネット CO_2 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，ISO14044[6]に定められているものの，配分方法による差がセメント・コンクリート分野では非常に大きいこと[7]から，ここでは配分を行わず，環境負荷を無いものと仮定した．なお，副産物の活用による環境負荷低減効果は，各インベントリデータの低減により間接的に反映される。

2.2 評価に用いたデータ

セメントのインベントリデータには，**表-1** に示す各国で製造された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。セメントのインベントリデータは，WBCSD CSI の Getting the Numbers Right (GNR)[8]および日本のセメント協会のデータ[9]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，1500 kg/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[10]，公開されているデータは無かったため，Heidelberg Cement の Sustainability report[11] 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[12]で除することによって求めた。CO_2 排出原単位は，クリンカ製造において直接排出した CO_2 のみを対象とした。自家発電および購入電力由来の環境負荷は十分なデータが得られなかったこと，および各国の電源構成の影響を受けて解釈が複雑になること，から今回は評価しなかった。なお，コンクリートのライフサイクル全体における

表－1　セメントのインベントリデータ

			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	Ref. No.
クリンカ	天然原料	kg/t	1260	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	9, E*
	副産物（原料代替）	kg/t	0	0	0	0	0	0	0	0	-
	廃棄物（原料代替）	kg/t	272	56	56	56	56	56	56	56	9, 11, E*
	石炭	kg/t	96	116	127	116	127	108	50	140	8, 9, E*
	CO_2	kg/t	775	818	856	836	843	829	676	868	8, 9
	NO_X	g/t	1474	1446	1446	1446	1446	1446	1446	1446	9, E*
	SO_X	g/t	77	304	304	304	304	304	304	304	9, E*
	ばいじん	g/t	31	63	63	63	63	63	63	63	9, E*
セメント	クリンカ	kg/t	841	753	712	845	909	810	855	891	8, 9
	天然原料（混合材，セッコウ）	kg/t	63	53	190	154	90	144	138	109	8, 9
	副産物（混合材）	kg/t	96	194	98	0	0	46	7	0	8, 9

E*: 本文に記載の方法により推定した。

電力由来のエネルギー投入量は，全エネルギー投入量の5%程度と小さく（今回評価対象としなかった鉄筋は除く）[13]，評価結果に与える影響は小さいことが推定される。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，セメントの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 の寄与度が大きいため，同一の平均値を用いたことによる評価結果への影響は大きくないことが推定される。

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 [8]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，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，天然原料と仮定した。

施工・解体および廃棄・リサイクルの工程におけるインベントリデータは，解体コンクリートのリサイクル率を除き，土木学会 [13]のケーススタディを一律に使用した（**表-2**）。コンクリートの配合は，W = 165 kg/m^3，C = 300 kg/m^3，S = 800 kg/m^3，G = 1050 kg/m^3 である。なお，評価はコンクリートのみを対象とし，鉄筋は評価対象から除いた。施工・解体工程における建設機械類に関わるインベントリデータは，各国の環境規制や燃費等に依存すると考えられるものの，国ごとの値が得られなかったため，上記の通り，一律の値を用いた。解体コンクリートのリサイクル率に関しては，文献データを参考に国ごとに設定し，リサイクル率に応じて廃棄（埋立て）およびリサイクルのインベントリデータを配分した。リサイクル率は，日本では 99.3%[14]と非常に高い一方，アメリカでは 60%[15]，ドイツでは 61.1%[15]である。その他の国では，国ごとのデータが得られなかったため，一律に 25%[15]とした。また，前述の通り，電力由来の環境負荷は評価から除いた。

2.3 環境影響評価方法

新しく開発した環境影響評価手法「LIME3」[4]を用い，各国の環境条件下において，コンクリートの環境影響評価を行った。環境影響には，CO_2 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 [4]。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，式(1)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$）。なお，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。

$$\text{統合化結果} = \sum_{Impact}\sum_{X}(Inv(X)\times IF_2^{Impact}(X)) \quad (1)$$

表－2　施工・解体および廃棄・リサイクル工程におけるインベントリデータ

		施工・解体*						廃棄・リサイクル	
		構成材料（セメント除く）			施工	解体	輸送	廃棄（埋立て）	リサイクル
		粗骨材	細骨材	水					
天然原料	kg/m^3	1050.0	800.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
水	kg/m^3	0.0	0.0	165.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
石油	kg/m^3	0.4	0.3	0.0	6.5	7.9	5.3	1.2	0.4
天然ガス	kg/m^3	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0
CO_2	kg/m^3	1.2	0.9	0.0	22.0	24.3	16.5	3.8	1.2
NOx	g/m^3	3.7	3.9	0.0	195.9	352.5	161.1	56.8	18.3
SOx	g/m^3	5.8	6.3	0.0	11.4	18.1	12.7	2.9	0.9
ばいじん	g/m^3	1.4	1.5	0.0	11.0	17.9	11.0	2.9	0.9
廃棄物（排出）	kg/m^3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2315.0	0.0

＊ コンクリートの製造工程は，施工・解体工程に含めた。

ここに，

$Inv(X)$：インベントリ項目Xの排出量

$IF_2^{Impact}(X)$：インベントリ項目Xの影響領域 Impact に関する統合化係数

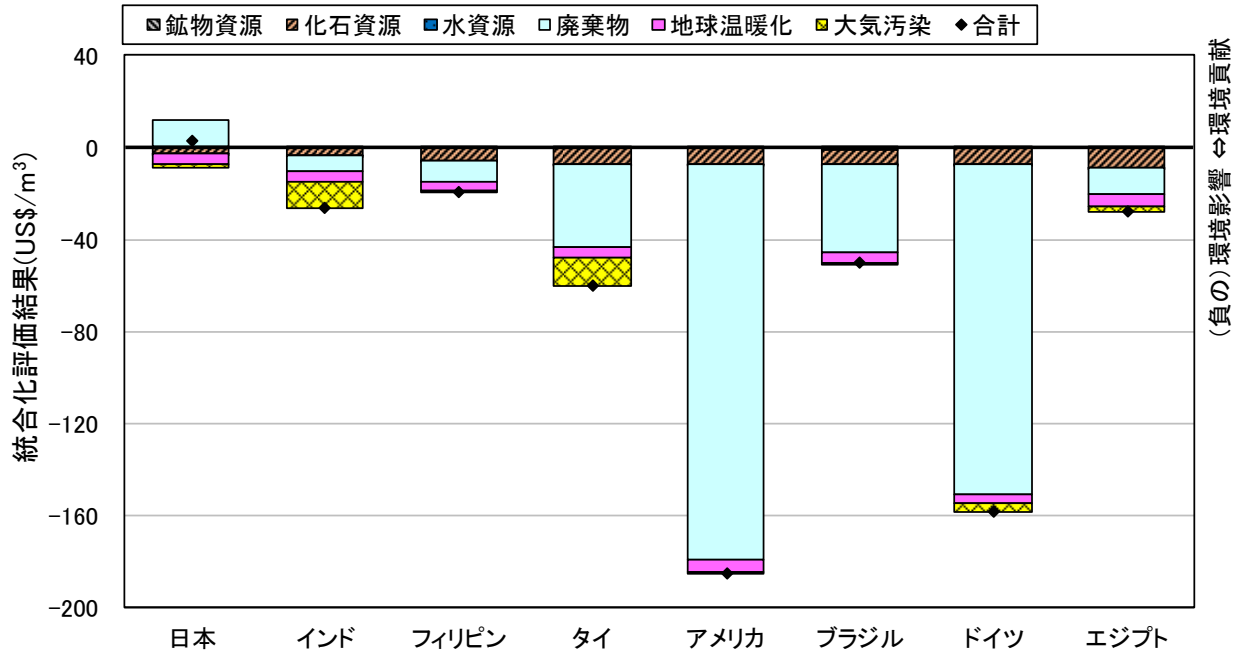
3. 評価結果

各国で使用されるコンクリートの統合化結果を**図-2**に示す。国ごとに評価結果は大きく異なり，アメリカ，ドイツの負の環境影響は非常に大きい結果となった。日本では，負の環境影響が小さいことに加えて，環境貢献も大きく，正味の環境影響でも正の値（環境貢献）となった。影響領域ごとに見た場合，廃棄物の埋立てによる環境影響が最も大きい国が多く，次いで化石資源の消費および CO_2 排出による影響が大きくなった。インドおよびタイでは，大気汚染による影響が大きくなった。日本では，廃棄物活用による環境貢献が最も大きくなった。鉱物資源および水資源の消費による環境影響は全ての国において小さかった。

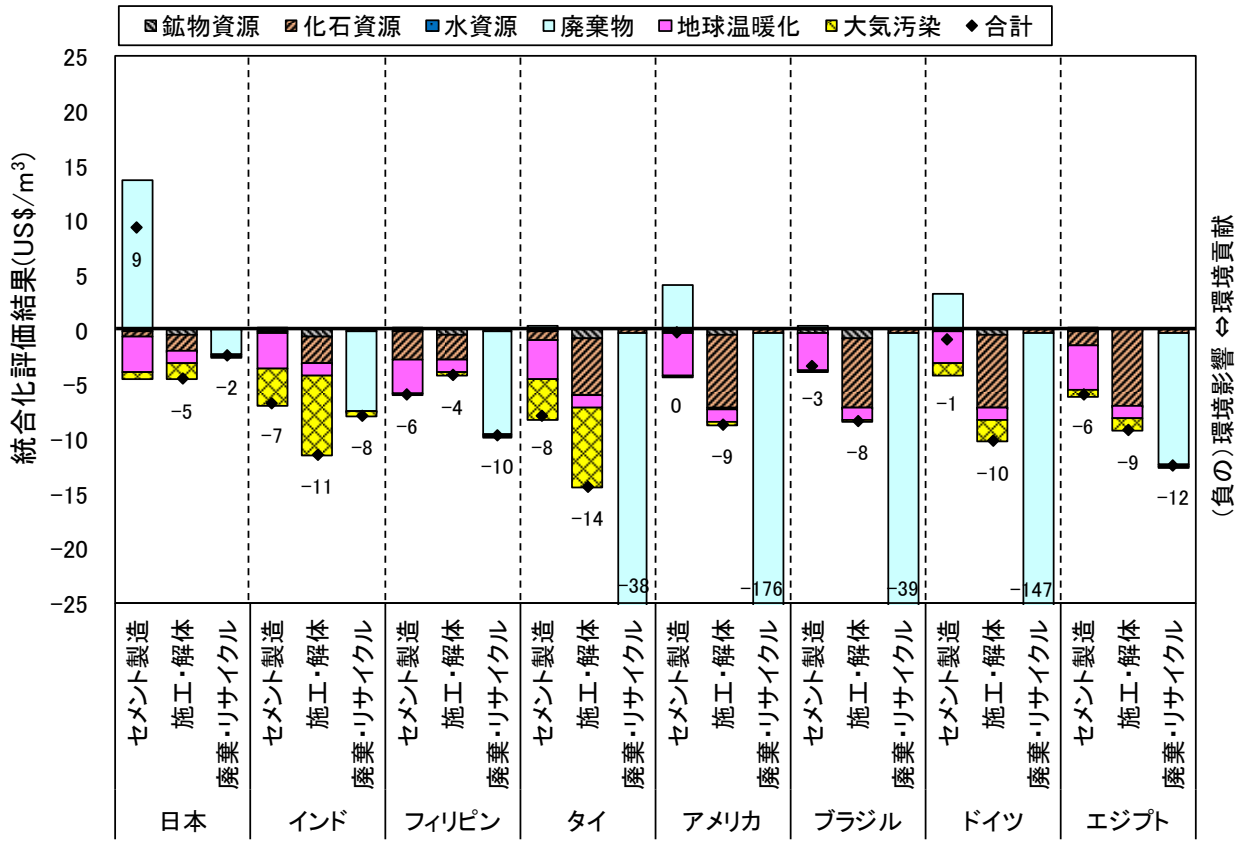
工程別の環境影響評価結果を**図-3** に示す。セメント製造工程における CO_2 排出による環境影響は，全ての国で大きく，かつ各国間の相違は比較的小さいものと評価された。これは，セメント製造における CO_2 排出量は，各国で差があるものの，それほど差は大きくなく，また，LIME3 の CO_2 排出による統合化係数が各国で同一のためである。セメント製造工程における化石資源消費による環境影響は，フィリピンで大きく評価された。これは，埋蔵量の少ない国の石炭を用いることにより，持続可能性（可採年数）が低く評価されたことが原因である。セメント製造工程における大気汚染による環境影響は，インドおよびタイで大きく評価された。これらの国では，拡散範囲に居住する人口が多いため，合計の健康被害がその人口に比例して大きく評価される。なお，LIME3 では，風による大気汚染物質の越境移動を含めた被害評価を行っており，単純な国の人口ではなく，実際に拡散範囲に居住する人口等を使用してその被害を算定している。

クリンカ製造時の廃棄物の埋立て回避による削減貢献（**図-3** の正の値）まで評価した場合，日本，アメリカ，ドイツでは，同影響が大きくなった。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，ここでのユーザーコストとは，廃棄物処分場を枯渇性資源とみなした場合の社会資産の損失にあたる。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。

施工・解体工程においては，全ての国で化石資源消費による環境影響が大きく評価された。これは，石油（軽油）の使用量が大きいことが原因である。石油は，石炭と比較して資源価値が高く，また，可採年数も少ないこ



図－2　コンクリートのライフサイクル全体における環境影響評価結果



（注）図中の数字は，各工程における統合化評価結果の合計を表す。

図－3　コンクリートのライフサイクルにおける各工程の環境影響評価結果

とから，統合化係数が世界平均値で石炭の約 9 倍と非常に大きい。そのため，石油を使用する施工・解体工程は，石炭を使用するセメント製造工程と比較して，化石資源消費による環境影響が大きい。また，インドおよびタイでは，施工・解体工程においても，大気汚染による影響が大きくなった。これは，前述したとおり，拡散範囲に居住する人口が多いためである。

廃棄・リサイクル工程においては，前述の通りアメリカおよびドイツの廃棄物埋立てによる環境影響が非常に大きくなった。これらの国では，解体コンクリートのリサイクル率は比較的高いものの，廃棄物処分におけるユーザーコストが非常に大きいことから，結果として環境影響が大きくなった。インド，フィリピン，タイ，ブラジル，エジプトにおいても，廃棄物の埋立てによる環境影響は比較的大きかった。これらの国では，廃棄物処分におけるユーザーコストはそれほど大きくないものの，解体コンクリートのリサイクル率が低いと推定されている。ただし，上述の通り，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，これらの評価結果の信頼性は高くないと考えられる。一方，日本では，廃棄・リサイクル工程における負の環境影響は小さくなった。日本の廃棄物処分におけるユーザーコストは大きいものの，リサイクル率が非常に高く，結果として環境影響は小さく評価された。

各工程における環境影響の合計を比較した場合，廃棄・リサイクル工程が最も重要となる国が多かった。これは，上述の通り，解体コンクリートの埋立てによる影響が大きいことが原因である。また，次いで施工・解体工程の環境影響が大きく評価される国が多く，セメント製造工程における環境影響は相対的に小さくなる国が多かった。一般的に，エネルギー投入量や CO_2 排出量から，セメント製造工程の環境負荷を重要視する場合が多く，本研究においても地球温暖化のみに注目した場合，セメント製造工程の環境負荷が最も大きい（図-3）。一方，地球温暖化以外の影響領域に関しても併せて考慮した場合，施工・解体工程では，石油（軽油）を使用していること，および大気汚染物質の排出量が比較的多いことから，総合的な環境影響はセメント製造工程と比較し，大きくなる場合があることが分かった。

4. まとめ

各国のコンクリートのライフサイクル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) 影響領域ごとに見た場合，解体コンクリートの廃棄（埋立て）による環境影響が最も大きく，次いで，化石資源の消費およびCO_2排出による影響が大きくなる国が多かった。また，インドおよびタイでは，大気汚染による影響が大きかった。

(2) 日本では，上述した負の環境影響は概ね小さく，一方でクリンカ製造時の廃棄物活用による削減貢献が大きく評価された。そのため，削減貢献まで考慮した，正味の環境影響においても，環境貢献の方が大きくなった。

(3) 解体コンクリートの廃棄（埋立て）による環境影響は，リサイクル率が非常に高い日本以外の国では，大きい結果が得られた。特に，ユーザーコストの高い，アメリカやドイツでは影響が大きくなることが示唆された。

(4) 化石資源の消費による環境影響は，施工・解体工程における寄与が大きくなった。これらの工程では，石炭と比較して環境影響の大きい石油（軽油）の使用が多いことが原因であった。

(5) 工程別の評価では，廃棄・リサイクル工程の影響が最も大きくなる国が多かった。次いで，施工・解体工程の影響が大きくなる国が多く，セメント製造工程の影響は相対的に小さい傾向にあった。

(6) 以上より，コンクリートの環境影響を総合的に改善していくためには，特定の影響領域（CO_2 排出等）のみに注目するのではなく，ライフサイクルを通した評価を実施し，影響の大きい工程および領域を特定することが重要であることが判明した。

謝辞

本研究の実施にあたっては，(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，星野清一氏，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) 桐野裕介ほか：多様な影響領域を考慮した各国のセメントの環境影響評価，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），2019
2) 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
3) 新見龍男ほか：セメントのリサイクル資源活用を考慮した環境影響評価（その６）構造物のライフサイクルを考慮した LIME3 による評価, セメント技術大会，2019
4) 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
5) WBCSD-CSI：CO_2 and energy accounting and reporting standard for the cement industry version 3，2011
6) ISO14044 : Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines，2006
7) 柴崎悠吾ほか：高炉スラグ産出時における環境負荷配分を考慮した高炉セメントの環境影響評価，土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集第 7 部, 2019
8) WBCSD-CSI：GNR, https://www.wbcsdcement.org/GNR-2016/
9) セメント協会：セメントの LCI データの概要，http://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jg1i_01.pdf，2016
10) Gartner and Hirao：A review of alternative approaches to the reduction of CO_2 emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete，Cement and Concrete Research，No.78，pp.126-142，2015
11) Heiderberg Cement：Sustainability report，2017
12) IPCC : Guidelines for national greenhouse gas inventories ，2006
13) 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
14) 国土交通省：平成 24 年度建設副産物実態調査結果
15) Xi et al.: Substantial global carbon uptake by cement carbonation, Nature geoscience, Vol. 9, pp.880-883, 2016