論文　高炉スラグの輸出による環境負荷低減効果の定量化

室園　環[*1]・柴崎　悠吾[*2]・桐野　裕介[*3]・河合　研至[*4]

要旨：地産地消に関わる環境影響評価の一例として，高炉スラグの輸出を仮想的に増加した場合の環境負荷低減効果の評価を行った。また，輸出に用いる貿易船の利用による環境負荷増加も合わせて考察した。この結果，セメント製造時の廃棄物活用による貢献を考慮した統合化評価結果では，高炉スラグをいずれの国に輸出しても，世界全体で環境負荷が低減すると評価された。これは，日本のセメント製造時の廃棄物活用の貢献が輸送による環境負荷よりも大きいためである。以上より，製造時の環境影響が地域により大きく異なる場合，地産地消は必ずしも重要ではなく，総合的に環境影響を評価していく必要があることが判明した。

キーワード：環境影響評価，高炉スラグ輸出，ポルトランドセメント製造，廃棄物活用，LIME3

1. はじめに

「誰一人取り残さない」持続可能で多様性と包摂性のある社会の実現のために，2015 年の国連サミットにて SDGs（持続可能な開発目標）が採択された。SDGs には 2030 年を年限とする 17 の国際目標があり，環境問題と深い関わりがある。一般的に環境問題は地球温暖化が大きく取り上げられやすいが，SDGs 達成のためには地球温暖化のみならず，大気汚染や資源消費，廃棄物排出などの環境問題改善に向け多角的に取り組む必要がある。

セメント・コンクリート分野における多角的な環境指標の一例として，土木学会より，温室効果に関わる指標，廃棄物に関わる指標，地産地消に関わる指標が提案されている [1)]。これらの指標のうち，温室効果および廃棄物に関する環境影響に関しては，星野らにより，国内のセメント製造においては，他の環境負荷より影響が大きく，重要性が高いことが検証されている [2)]。一方，地産地消に関しては，輸送時の CO_2 排出量等を評価した事例はあるものの，多角的な視点から環境影響を評価した事例は少ない。

本研究では，地産地消に関する評価の検討例として，セメント・コンクリート分野において最も輸送距離の長い事例の一つとして考えられる，高炉スラグの海外輸出を対象とした。高炉スラグの海外輸出に関しては，国内での資源循環が進んでいないことを課題とする意見がある一方，世界全体では高炉スラグの供給量はセメントの 8%と少なく，セメントより高価な材料として取り扱われる地域も存在する [3)]。高炉スラグの受け入れについては多くの国・地域で実績があり，既に海外ではセメント用途向けとしての市場が形成されている [4)]。

環境負荷に注目した場合，高炉スラグを輸出する際には貿易船を利用するため，輸送の燃料消費による CO_2 排出量増加や資源消費量増加により，全体として環境負荷が増加することが懸念される。また，その環境負荷増加量は輸出距離や輸出に用いる船舶のサイズにより変化すると考えられる。一方，桐野らによる研究では，国内と海外ではセメントの製造方法や環境条件が異なるため，混合材の環境負荷低減効果は国により大きく異なることが判明している [5)]。日本国内では，クリンカ製造時に廃棄物を多量に活用していることから，混合材活用により環境貢献が小さくなる負の効果がある一方，海外では，CO_2 排出低減のみならず，大気汚染や資源消費による環境負荷に関しても大きく低減する場合がある。

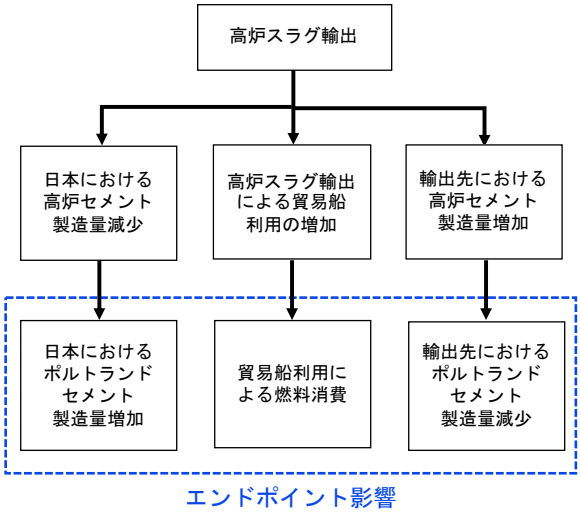
以上より，本研究では「高炉スラグの輸出に伴い発生する各国の使用セメント種の変化がもたらす環境負荷低減効果」と「貿易船利用により発生する環境負荷」を日本版被害算定型影響評価手法（LIME3）[6)]により評価することを目的とした。また，輸出距離や輸出に用いる貿易船のサイズによる影響も併せて考察した。

2. 評価方法

2.1 高炉スラグ輸出の評価の方針

高炉スラグ輸出による環境影響は**図－1** に示すように三つに分類することができる。一つ目は日本国内での影響である。高炉スラグの輸出を仮想的に増加することにより，国内では高炉セメントの製造量が減少すると仮定した。国内ではポルトランドセメント（PC）と高炉セメントがセメント製造量の大部分を占めており，高炉セメントの製造量の減少を補うため，PC の製造量が増加する。すなわち，高炉セメント中の高炉スラグ微粉末が輸出された場合，その分 PC 製造量が増加する。二つ目は輸送

*1 広島大学　工学部　第四類（建設・環境系）　(学生会員)
*2 広島大学大学院　工学研究科社会基盤環境工学専攻　(学生会員)
*3 太平洋セメント（株）中央研究所　理博　（正会員）
*4 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)



図－1　高炉スラグ輸出にともなう事象の因果関係

による影響である。高炉スラグ輸出時に貿易船を使用することで，燃料消費による環境影響が生じる。三つ目は海外（輸入国）での影響である。高炉セメントの材料として高炉スラグを輸出するため，高炉セメントの製造量が増加する。なお，本研究では各国の市場で求められているセメントの 28 日強さが一定であると想定し，輸出先で PC の代替として高炉セメントが製造されると仮定した。そのため，PC の必要量が減少し，製造量も減少する。以上の三つの環境影響をそれぞれ評価し，評価値を足し合わせることにより高炉スラグ輸出に伴う環境影響の評価値を算出した。なお，本研究では，副産物の環境負荷をゼロと仮定し，高炉スラグ使用量増加・減少による直接的な環境影響もゼロとした。算出式を以下に示す。

日本から国 C への高炉スラグ輸出の環境影響統合化結果

$$= IR_{production}(Japan) - IR_{production}(C) + IR_{export}(C) \quad (1)$$

ここに，$IR_{production}(C)$：国 C の PC 製造による環境影響統合化結果

$IR_{export}(C)$：国 C への貿易船利用による環境影響統合化結果

評価対象は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）[7]にてデータを公開しているセメント生産国の一部とし，輸出距離による評価結果への影響も確認するために，世界の各地域から設定した。アジアにおいては，インド，フィリピン，タイを対象とした。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，オセアニアに関してはデータを公開している国が存在しなかったため，評価対象外とした。また，世界最大のセメント生産国である中国はデータのカバー率が 2%と非常に低いため，評価対象外とした。

評価には日本版被害算定型影響評価手法（LIME3）を用いた。LIME3 は世界各国の環境条件や環境意識を反映した国ごとの評価が可能となっている。また，地球温暖化や大気汚染，資源消費，廃棄物など多領域の環境影響を統合化し，包括的に評価することができる。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 [6]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$）。

環境影響統合化結果 (IR)

$$= \sum_{impact} \sum_{X} \left(Inv(X) \times IF_2^{Impact}(X) \right) \quad (2)$$

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

2.2 ポルトランドセメント製造の環境影響評価方法

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。なお，国内，海外での各国内の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，評価に含めなかった。評価領域はセメント製造において影響量が大きいと示されている地球温暖化，大気汚染，資源消費，廃棄物の 4 つとした。LIME3 における廃棄物発生による環境影響のエンドポイントは，廃棄物処理施設の建設に伴う土地の改変と廃棄物処分（埋立）空間の消失の二つである。そのため，発生する廃棄物が埋立て処分されることに対して環境負荷の評価を与えている。そこで，セメント製造時の廃棄物利用の評価は，本来埋立て処分されることにより発生する環境負荷を回避したものとみなし，マイナスの環境負荷として扱った。なお，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するはずの 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 [8]，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）。このように，CO_2 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。副産物の環境負荷は主製品の環境負荷を分配する手法が IS014044[9]に定められているが，配分方法による差が大きいことから，本研究では副産物の環境負荷はゼロとした。また，本研究では高炉スラグのみを副産物として扱った。

表－1　各国のポルトランドセメント製造のデータ

			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
クリンカ原料	天然原料	kg/t	1223	1455	1455	1455	1455	1455	1455	1455
	廃棄物	kg/t	264	54	54	54	54	54	54	54
添加材	せっこう	kg/t	30	30	30	30	30	30	30	30
熱エネルギー	石炭	kg/t	93	112	123	112	123	104	48	136
環境負荷物質	CO_2	kg/t	751	793	831	811	817	804	656	842
	NOx	kg/t	1.430	1.403	1.403	1.403	1.403	1.403	1.403	1.403
	SOx	kg/t	0.075	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295
	ばいじん	kg/t	0.030	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061

本研究における PC の構成比はクリンカ 97%，せっこう 3%とした。各国のポルトランドセメントのインベントリデータを**表－1** に示す。クリンカのインベントリデータは桐野らのデータ [5]を用いた。桐野らはデータを下記のように収集した。インベントリデータは，WBCSD CSI の Getting the Numbers Right (GNR)[7]および日本のセメント協会のデータ [10]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 1t 製造する際の天然原料の使用量は， 1500kg/t と仮定した。ただし，**表－1** ではポルトランドセメント 1t 製造する際の天然原料の使用量（=1455kg/t）を示している。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 [11]，公開されているデータは無かったため，Heidelberg Cement の Sustainability report [12]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 [13]で除することによって求めた。CO_2 排出原単位は，クリンカ製造における自家発電および購入電力由来の CO_2 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，各国の 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 であるが，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 であった。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と推定される。

2.3 高炉スラグ海上輸送の環境影響評価方法

貿易船の種類は高炉スラグを輸出することを想定するため，ばら積み貨物船（Bulker）とした。ばら積み貨物船の平均積載率は 50～60%とされており [14]，本研究でも同様の積載率で輸送するものと仮定した。貿易船の燃料は，日本船主協会のホームページ [15]を参考に C 重油とした。高炉スラグの輸出は東京から出港し，各国の貿易港へ着港するものとした。貿易船は燃料消費量節約や経済性の観点から輸出先にて再び貿易や輸送等に利用されると考え，評価は片道のみとした。各国の貿易港は代表的な港として，Mormugao（インド），Manila（フィリピン），Bangkok（タイ），Los Angeles（アメリカ），Paranagua（ブラジル），Hamburg（ドイツ），Port Said （エジプト）とした。輸送距離は世界港間距離図表 [16]を用いて，資料に記載されている貿易ルートの中で最短距離を選択し，算定した。各港への輸送距離を**表－2** に示す。

本研究では高炉スラグ輸送する際に発生する環境影響として，貿易船の燃料を消費することによる資源消費と燃料消費により発生する CO_2 の二つを評価対象とした。この他に燃焼消費により大気汚染物質が発生すると考えられるが，大気汚染の環境影響は拡散範囲に住んでいる人間への健康被害が大きいとされており，本検討では輸送中の大気汚染物質の拡散範囲を特定することが困難なため評価対象外とした。また，高炉スラグ輸出時の重金属溶出による環境負荷の発生も考えられるが，LIME3 は重金属の有毒性の評価を対象としていないことから，本研究では考慮できていないことに留意が必要である。以上の条件の下，燃料消費量及び CO_2 排出原単位を土木学会の算定手法 [17]を参考に，式(3)，(4)を用いて算出した。

表－2　各港への輸送距離

	輸送距離（km）
Mormugao（インド）	8179
Manila（フィリピン）	3088
Bangkok（タイ）	4767
Los Angeles（アメリカ）	7910
Paranagua（ブラジル）	19489
Hamburg（ドイツ）	18470
Port Said　（エジプト）	12722

表－3　貿易船のインベントリデータ

船のサイズ [DWT]		燃料消費量 [kg/t・km]	CO_2 排出量 [kg-CO_2/t・km]
Bulker	-9999	1.1×10^{-2}	3.4×10^{-2}
	10000-34999	3.3×10^{-3}	1.1×10^{-3}
	35000-59999	2.4×10^{-3}	7.7×10^{-3}
	60000-99999	1.8×10^{-3}	5.7×10^{-3}
	100000-199999	1.3×10^{-3}	4.1×10^{-3}
	200000+	1.1×10^{-3}	3.4×10^{-3}

$$燃料消費量 = \frac{機関出力 \times 燃料消費率}{平均積載量 \times 平均速度} \quad (3)$$

$$CO_2 排出原単位 = 燃料消費量 \times 燃料の原単位 \quad (4)$$

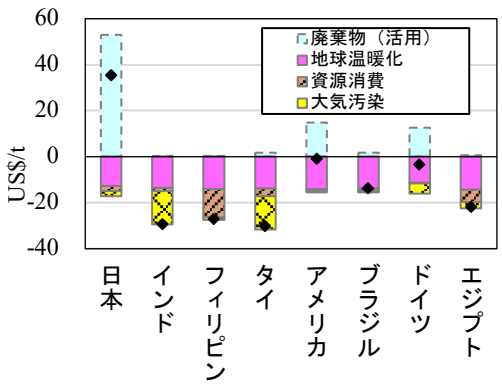
機関出力，燃料消費率，平均積載量，平均速度は海洋政策研究財団が公表している「平成 21 年度船舶からの温室効果ガス及び大気汚染物質の世界的な排出量算定調査報告書」[14]に記載されているデータを用いた。また，船舶のサイズはこの資料に合わせ，**表－3** に示す 6 種類とした。船舶のサイズは DWT（載貨重量トン数）とし，その船が積めることのできる貨物の重量（最大積載量）を示している。燃料の原単位は土木学会のデータ [17]を用いた。以上のとおり算出した結果を**表－3** に示す。

3. 評価結果および考察

3.1 各国のポルトランドセメント製造の環境影響

各国のポルトランドセメント製造の評価結果を**図－2** に示す。評価結果は既往のクリンカの評価結果 [5]と概ね同様の結果となった。これはクリンカに添加したせっこうの量はセメント総量に対して少量であり，評価結果はクリンカ製造による影響が支配的となったためである。

廃棄物活用による環境貢献は日本，アメリカ，ドイツの順に大きいと評価された。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



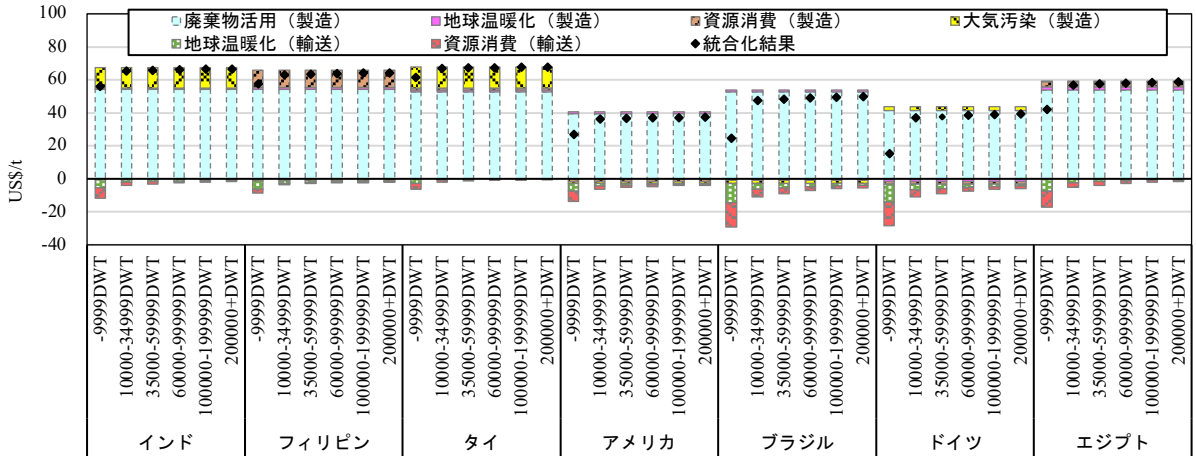
図－2　ポルトランドセメント製造の評価結果

とから，日本以外の廃棄物活用の評価結果の信頼性は他の影響領域の結果より低いと考えられる。

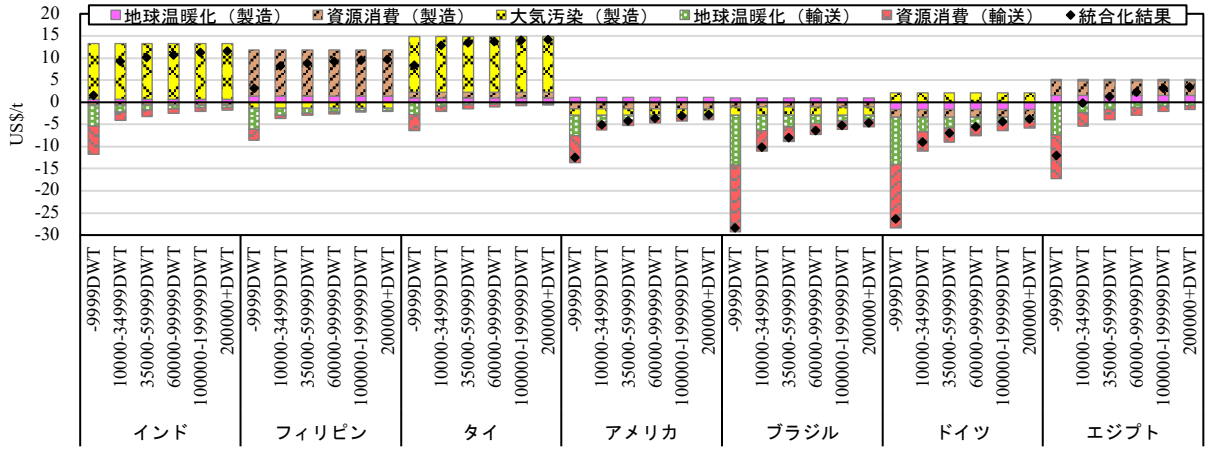
廃棄物活用による貢献まで考慮した統合化評価結果は日本のみが正の値を示し，PC 製造することが環境貢献につながると評価された。アメリカ，ドイツでは評価に大きな影響を与える廃棄物活用と地球温暖化の評価値が同程度であり，正味の環境影響は 0 に近い値となった。一方，その他の国では，削減貢献は高く評価されず，環境負荷のみを評価した場合と大きな差は見られなかった。

3.2 高炉スラグ輸出の環境影響

高炉スラグ輸出による環境影響の変化量を**図－3** に示す。**図－3** に示される「製造」の影響は日本と高炉スラグ輸入国の PC の製造条件および環境条件の違いにより発生する環境影響の変化量を示す。「輸送」の影響は高炉スラグ輸出に伴い貿易船を利用することによる環境負荷を示す。また，影響評価は前述したように日本以外の廃棄物活用の評価結果の信頼性は他の結果より低いことから，廃棄物活用による貢献を考慮した評価と考慮しない評価の二つを行った。本検討では PC の製造量が増減しても，単位セメント量あたりの廃棄物使用量は変化しないと仮定し，評価した。しかし，現実には製造量の増減が廃棄物使用量やその種類に変化を及ぼすことは十分に想定され，需給のバランスをも含めた検討は今後の課題である。廃棄物活用による貢献を考慮した統合化結果によるといずれのサイズの貿易船を用いて高炉スラグを輸出しても，対象とした全ての国で環境貢献が発生すると評価された。これは，日本で PC を製造する際の廃棄物活用の貢献が海外と比べて大きく，かつ，他の影響領域に比べ廃棄物活用の影響が大きく評価されたためである。廃棄物活用の評価値はアメリカやドイツなどの先進国に比べ，タイやフィリピンなどのアジア地方の国で大きくなる傾向がある。これは，廃棄物を処分する際のユーザーコストの違いによるもので，アジア地方の国では処分に要するユーザーコストが低く，廃棄物活用による貢献の程度が比較的小さいと評価されたためである。



(a) 廃棄物活用の貢献を考慮した評価結果



(b) 廃棄物活用の貢献を考慮しない評価結果

図－3　高炉スラグ輸出による環境影響の変化量

廃棄物活用による貢献を考慮しない場合，インド，フィリピン，タイへの高炉スラグ輸出は環境貢献につながると評価された。フィリピンへの輸出の影響は PC 製造時の資源消費を回避する貢献が大きく評価された。フィリピンでは PC を製造する際に，石炭埋蔵量の少ない国の石炭を多量に活用していることから，持続可能性が低いと評価されていたが，高炉スラグを輸入することにより，PC の製造量を抑えることができ，統合化結果は正の値を示した。インド，タイへの輸出の影響は PC 製造時の大気汚染を回避する貢献が大きく評価された。本研究では PC 製造時の大気汚染物質の排出量が海外では同一と仮定したが，インド，タイでは大気汚染物質の拡散範囲に居住している人口が多く，合計の人間健康への被害が大きいと考えられた。この被害を，高炉スラグを輸入し PC の製造量を抑えることで回避したため，統合化結果は正の値を示した。また，インド，フィリピン，タイへの輸出の統合化結果が正の値を示したのは，これらの国が日本に比較的近傍な国であり，貿易船利用による環境負荷が小さいと評価されたことも要因である。

一方，廃棄物活用による貢献を考慮しない場合，アメリカ，ブラジル，ドイツへの高炉スラグ輸出は環境負荷につながると評価された。これらの国では PC 製造による廃棄物活用以外（地球温暖化，大気汚染，資源消費）の影響が日本と酷似しているため, PC の製造条件および環境条件により発生する環境影響の変化量が小さく評価された。また，これらの国は日本からの輸送距離が比較的長く，輸送による影響が大きく評価されたため，統合化結果は負の値を示した。エジプトへの高炉スラグ輸出に関しては，輸出に用いる貿易船のサイズにより統合化結果が大きく異なることが示された。34999DWT 以下のサイズの貿易船を用いた場合，輸送の環境負荷が PC の製造条件および環境条件により発生する環境影響の変化量より大きいため，高炉スラグ輸出は環境負荷につながると評価された。一方，35000DWT 以上のサイズの貿易船を用いた場合，輸送の環境負荷が小さいため，高炉スラグ輸出は環境貢献につながると評価された。

輸送による環境負荷に着目すると，いずれの評価結果においても燃料消費により発生する CO_2 由来の地球温暖

化より，燃料消費による資源消費の負荷が大きいと評価された。貿易船は 9999DWT 以下のサイズを用いることによる環境負荷が特に大きく，次に大きなサイズ（10000-34999DWT）の貿易船を用いることで，輸送による環境負荷を 1/3 に大きく削減できると考えられる。また，本研究では貿易船の積載率を実際の積載率を参考に 50-60%と仮定しているため，積載率を上げることで輸送による環境負荷は**図－3** に示す評価結果より小さくなると考えられる。

以上より，製造時の環境影響が地域によって大きく異なる場合，地産地消は必ずしも重要ではなく，総合的に環境影響を評価していく必要があることが判明した。

4. まとめ

本研究では，地産地消に関する評価の一例として，高炉スラグの輸出を仮想的に増加した場合の環境影響の変化を LIME3 を用いて評価した。また，輸出距離や輸出に用いる貿易船のサイズによる影響も併せて考察した。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

(1) PC 製造時の廃棄物活用による貢献を考慮した統合化結果から，いずれのサイズの貿易船を用いて高炉スラグを輸出しても，対象とした全ての国で環境貢献が発生すると評価された。これは，日本で PC を製造する際の廃棄物活用の貢献が海外と比べて大きく，かつ，他の影響領域に比べ廃棄物活用の影響が大きく評価されたためである。

(2) 廃棄物活用による貢献を考慮しない場合，インド，フィリピン，タイへ高炉スラグを輸出することは環境貢献につながると評価され，アメリカ，ブラジル，ドイツへ高炉スラグを輸出することは環境負荷につながると評価された。これは，高炉スラグの輸送距離の違いや PC の製造条件および環境条件の違いによるものである。

(3) 高炉スラグ輸送時の貿易船の大きさは 9999DWT 以下のサイズを用いることによる環境負荷が特に大きく，次に大きなサイズ（10000-34999DWT）の貿易船を用いることで，輸送による環境負荷を 1/3 と大きく削減できると考えられる。

(4) 以上より，製造時の環境影響が地域によって大きく異なる場合，地産地消は必ずしも重要ではなく，総合的に環境影響を評価していく必要があることが判明した。

謝辞

本研究の実施にあたっては，太平洋セメント（株）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，（株）トクヤマ 加藤弘義氏，茶林敬司氏，新見龍男氏にも助言をいただいた。また，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。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1) 土木学会：環境調和型コンクリート材料学の創造に関する研究委員会成果報告書，p. 4，2012
2) 星野清一，河合研至，久保田修，平尾　宙：セメントの廃棄物・副産物の資源化を表す環境指標に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) United Nations Environmental Programme : Eco-efficient Cements: Potential Economically Viable Solutions for a Low-CO_2 Cement-based Materials Industry, 2017
4) 鉄鋼スラグ協会，セメント向け高炉スラグ　国別輸出推移：http://www.slg.jp/pdf/FS-169-08.pdf（閲覧日：2020 年 3 月 27 日）
5) 桐野裕介，星野清一，新見龍男，河合研至，伊坪徳宏：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，pp.5-6，2019
6) 伊坪徳宏，稲葉敦：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，2018
7) WBCSD-CSI，GNR：https://www.wbcsdcement .org /GNR-2016/（閲覧日：2019 年 12 月 10 日）
8) WBCSD-CSI, CO_2 and energy accounting and reporting standard for the cement industry version 3, 2011
9) ISO14044：Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, 2006
10) セメント協会，セメントの LCI データの概要，2016
11) 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
12) Heiderberg Cement, Sustainability report, 2017
13) IPCC, Guidelines for national greenhouse gas inventories，2006
14) 海洋政策研究財団：平成 21 年度船舶からの温室効果ガス及び大気汚染物質の世界的な排出量算定調査報告書，2012
15) 一般社団法人日本船主協会：https://www.jsanet.or.jp/ index.html（閲覧日：2019 年 12 月 10 日）
16) 日本航海士会：世界港間距離図表，海文堂，1990
17) 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