

論文 廃棄物・副産物の環境影響を考慮した産業間の環境影響評価

柴崎 悠吾^{*1}・室園 環^{*2}・新見 龍男^{*3}・河合 研至^{*4}

要旨：セメント産業の廃棄物活用の貢献の程度を相対的に確認するために、セメント産業、鉄鋼産業、製紙産業、発電（石炭火力）の製品製造を対象に環境負荷物質、資源消費、廃棄物、副産物など多領域の環境影響を包括した評価を行った。また、副産物製造時の環境負荷配分が評価結果に及ぼす影響を考察した。その結果、セメント産業の製品製造による環境貢献が高いことが確認でき、各産業の製造時に大きな影響を与える環境影響領域が定量的に示された。また、副産物に対して環境負荷を重量に基づき配分することで、セメント製造および鋼材製造の評価結果が大きく変化することが示された。

キーワード：環境影響評価、資源循環、セメント産業、廃棄物、副産物、環境負荷配分、資源循環型産業

1. はじめに

セメント産業はセメント製造の際に多量のCO₂を排出することから、環境負荷の大きな産業として扱われることが多い。一方で、他産業から排出された廃棄物を多量に受け入れ、セメント原料や熱エネルギーとして活用することで環境負荷低減に貢献している。しかし、廃棄物・副産物活用により環境負荷低減に貢献していることは、一般的にあまり知られていない。そこで、著者らはセメント産業、鉄鋼産業、製紙産業の廃棄物活用及び排出の影響を評価し、セメント産業の廃棄物活用の貢献の高さを相対的に示した¹⁾。しかし、この評価は廃棄物活用及び排出のみを対象としており、環境負荷物質排出や資源消費などの環境負荷と合わせた包括的な評価は行われていない。セメント産業においては廃棄物活用が大きな影響を及ぼすと評価されているが、他産業とは原料や製造プロセスなどが異なる。このため、製造時に重要な環境影響領域が異なる可能性があり、多領域の環境影響を包括した評価を行う必要があると考えられる。

また、セメント・コンクリート分野において環境影響評価を行う際に、副産物製造時の環境負荷はゼロとして扱われていることが多い。これは、副産物製造時の環境負荷はすべて主製品製造が受け持つことが前提となっているためである。高炉スラグ製造時の環境負荷は鋼材製造が、フライアッシュ製造時の環境負荷は電力発電が受け持っている。そのため、高炉スラグやフライアッシュなどの副産物を用いた混合セメントは、環境負荷低減効果があるとされている。しかし、2006年にISO14044²⁾が制定され、副産物の環境影響評価の取り扱いの指針が定められた。ISO14044では副産物は共製品つまり製品の一つとして扱い、CO₂排出量などの環境負荷は全ての製品

に配分されなければならないとされている²⁾。そのため、副産物の使用・製造が行われる産業の評価では副産物の環境負荷を考慮することが望ましい。

そこで、本研究ではセメント産業の廃棄物活用の貢献の程度を相対的に確認するために、各産業の製品製造を対象に環境負荷物質、資源消費、廃棄物、副産物など多領域の環境影響を包括した評価を行った。また、主製品が受け持っていた環境負荷を副産物に配分し、評価結果に及ぼす影響を考察した。

2. 評価方法

2.1 評価に用いたデータ

本研究ではセメント産業、鉄鋼産業、製紙産業、発電（石炭火力）を評価対象とした。また、セメント産業に関しては、星野らの論文³⁾に示されているポルトランドセメント(PC)、PCに高炉スラグを42.5%置換した高炉セメントB種(BB)、PCにフライアッシュを16.6%置換したフライアッシュセメントB種(FB)のインベントリデータを用い、各種セメントの評価も実施した。各産業の主なライフサイクルを図-1に示す。なお、図-1に点線で示すように発電（石炭火力）で製造されたフライアッシュやせっこうの一部、鉄鋼産業で製造された高炉スラグや製鋼スラグの一部はセメント産業で使用されている。また、鉄鋼産業や製紙産業は自産業で製造した製品が使用された後、副産物（鉄スクラップ、古紙）として再利用されるといった水平循環の特徴を有している。

評価は、天然原料の採掘から製品製造工程までを対象とした。機能単位は基本的に1tとし、電力のみ1kWhとした。なお、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。評価に用いる各産業

*1 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)

*2 広島大学 工学部第四類 (建設・環境系) (学生会員)

*3 (株) トクヤマ セメント開発 Gr. 工修 (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)

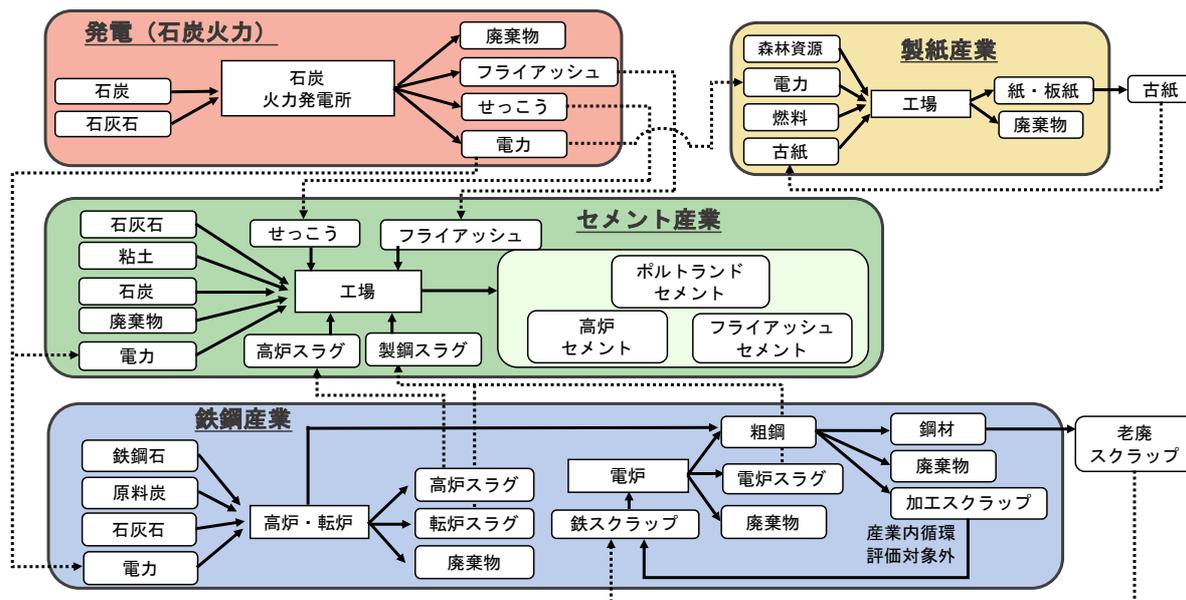


図-1 各産業の主なライフサイクル

表-1 セメント産業のデータ

環境負荷物質 排出量	CO ₂	千 t	41279
	SO _x	千 t	4
	NO _x	千 t	73
	ばいじん	千 t	2
熱エネルギー消費量	石炭	千 t	64520
	石油コークス	千 t	8030
	重油	千 kl	430
天然資源消費量	石灰石	千 t	59503
	粘土	千 t	135
	珪石	千 t	2918
	せっこう	千 t	23
	電力	百万 kWh	2320
廃棄物使用量		千 t	17682
副産物使用量	高炉スラグ	千 t	7434
	フライアッシュ	千 t	202
	せっこう	千 t	2149
	製鋼スラグ	千 t	405
電力消費量	購入電力	百万 kWh	2320
水消費量	新規利用水	百万 m ³	61
製品製造量	セメント	千 t	59114

表-2 鉄鋼産業のデータ

環境負荷物質 排出量	CO ₂	千 t	179183
	SO _x	千 t	57
	NO _x	千 t	86
	ばいじん	千 t	5
天然原料及び 熱エネルギー消費量	鉄鉱石	千 t	136810
	原料炭	千 t	59050
	石灰石	千 t	12087
	石油系	千 t	2038
廃棄物使用量		千 t	450
廃棄物排出量		千 t	17497
副産物使用量	鉄スクラップ	千 t	23900
電力消費量	購入電力	百万 kWh	34072
水消費量	新規利用水	百万 m ³	1279
製品製造量	鋼材	千 t	94430
	高炉スラグ	千 t	24840
	製鋼スラグ	千 t	15080

表-3 製紙産業のデータ

環境負荷物質 排出量	CO ₂	千 t	23797
	SO _x	千 t	14
	NO _x	千 t	36
	ばいじん	千 t	3
熱エネルギー消費量	石炭	千 t	5134
	重油	千 t	663
森林資源消費量	針葉樹林国産	千 t	3552
	針葉樹林輸入	千 t	1651
	広葉樹林国産	千 t	1357
	広葉樹林輸入	千 t	9759
	パルプ輸入	千 t	1615
廃棄物排出量		千 t	31675
副産物使用量	古紙	千 t	17192
電力消費量	購入電力	百万 kWh	7515
水消費量	新規利用水	千 t	2471
製品製造量	紙・板紙	千 t	26478

表-4 発電（石炭火力）のデータ

環境負荷物質 排出量	CO ₂	千 t	333540
	SO _x	千 t	70
	NO _x	千 t	106
	ばいじん	千 t	N/A
天然資源消費量	石炭	千 t	102000
	石灰石	千 t	1799
廃棄物排出量	石炭灰	千 t	8390
水消費量	新規利用水	千 t	N/A
製品製造量	電力	億 kWh	3537
	フライアッシュ	千 t	40
	せっこう	千 t	194

N/A：データが得られなかった

のデータをそれぞれ表-1、表-2、表-3、表-4に示す。セメント産業は主にセメント協会のデータ^{4,5)}を使用し、鉄鋼産業、製紙産業、発電（石炭火力）については、産業全体を取りまとめた文献を本研究の範囲では入手できなかったため、複数の文献⁵⁻¹⁹⁾よりデータをまとめ使用

した。収集したデータは環境負荷物質排出量，熱エネルギー消費量，天然資源消費量，水消費量，購入電力量，副産物使用量及び製造量，廃棄物使用量及び排出量である。水消費量は経済産業省が公表している「工業統計調査」⁶⁾の淡水のデータを用いた。また，製品製造時に使用する淡水は新規利用水と回収水の二つに分類することができるが，回収水は工場内で循環利用されるため，新規利用水のみを評価した。購入電力に関しては，ここではすべて発電（石炭火力）によるものと仮定した。国内の電源構成において，発電（石炭火力）が占める割合は34%（2014年）¹⁷⁾であり，現実と乖離するものの，他の発電方式に関するすべてのデータを入手し切れなかったこと，ならびに，後述のとおり，評価結果における購入電力の影響が相対的に小さいことから，上記の仮定とした。

2.2 副産物製造時の環境負荷

副産物製造時の環境負荷は，主製品が受け持っていた製造プロセスで発生する環境負荷を各主製品および副産物に配分すること（環境負荷配分）により求めた。環境負荷配分はISO14044²⁾に準拠した。従来，発電（石炭火力）では電力を主製品として全ての環境負荷を受け持っていたが，本研究ではフライアッシュとせっこうを副産物と仮定し，環境負荷を配分した。ただし，本研究でのフライアッシュはJIS規格品を示し，非JIS規格品は廃棄物として扱った。従来，鉄鋼産業では鋼材を主製品として全ての環境負荷を受け持っていたが，本研究では高炉スラグと製鋼スラグを副産物と仮定し，環境負荷を配分した。配分方法は重量に基づき比例配分させる手法（重量配分）とコストに基づき比例配分させる手法（コスト配分）の二つの手法について検討した。ISO14044では，経済的性質より物理的性質に基づいた配分が望ましいとされているが，本研究では配分手法の比較・検討のために二手法の配分を行った。各配分の算出式は以下の式(1)~(3)のように表すことができる。

$$Inv(X) = AR(X) \times \sum_i Inv(X_i) \quad (1)$$

$$AR_{weight}(X) = \frac{Weight(X)}{\sum_i Weight(X_i)} \quad (2)$$

$$AR_{cost}(X) = \frac{Cost(X)}{\sum_i Cost(X_i)} \quad (3)$$

ここに， $Inv(X)$ ：製品Xのインベントリデータ

$AR(X)$ ：製品Xの配分率

$Weight(X)$ ：製品Xの重量

$Cost(X)$ ：製品Xのコスト

$\sum_i X_i$ ：各産業における全ての製品

表-5 各製品の重量，コスト

(a) 鉄鋼産業

	総重量	総コスト
鋼材	94430 千 t	56658 億円
高炉スラグ	24840 千 t	1987 億円
製鋼スラグ	15080 千 t	603 億円
製品合計	134350 千 t	59248 億円

(b) 発電（石炭火力）

	総重量	総コスト
電力	106970 千 t	90639 億円
フライアッシュ	400 千 t	48 億円
せっこう	1940 千 t	39 億円
製品合計	109310 千 t	90726 億円

配分する環境負荷のデータは鉄鋼産業では表-2を，発電（石炭火力）では表-4を用いた。配分の基準となる各製品の重量，コストを表-5に示す。なお，本研究のコストのデータ²⁰⁻²²⁾は同年度ではないが，0.5~1.5倍の範囲でのコストの変化は評価結果に影響を及ぼすものの，配分手法による影響と比較すると小さいことを確認している。また，重量配分では全ての製品を重量で示す必要があるが，発電（石炭火力）の主製品である電力は電力量(kWh)で示されるため，重量に換算した。具体的には，電力3537億(kWh)を単位発熱量8.68(MJ/kWh)²³⁾で熱量換算したものを，石炭の単位発熱量28.70(MJ/kg)²³⁾で除して石炭質量に換算し，電力の重量として扱った。

鉄鋼産業において配分した結果を表-6に，発電（石炭火力）において配分した結果を表-7に示す。鉄鋼産業における重量配分では副産物の配分率が特に高く，30%程度の環境負荷が副産物に配分された。発電（石炭火力）では副産物への配分率は3%以下とあまり高くないが，発電（石炭火力）の総環境負荷が鉄鋼産業と比べて大きいため，配分量自体は多い。また，いずれの産業も副産物への配分率は，コスト配分より重量配分の方が大きくなった。これは，主製品の方が副産物よりも単価が高いことが原因である。

セメント産業が他産業で製造された副産物を製品製造過程で使用することによる環境負荷は，表-6，表-7に示される各製品の環境負荷を使用量に応じてセメント産業の評価に計上した。

2.3 評価指標

評価には日本版被害算定型影響評価手法（LIME3）²⁴⁾を用いた。LIME3は2003年にLCA国家プロジェクトと連携し，開発された評価手法（LIME）の最新版であり，他の研究内容と比較し，妥当性の検証が行われている。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）を正の値として次式に基づき算出した。

表-6 鉄鋼産業における環境負荷配分結果

		重量配分			コスト配分		
		鋼材	高炉スラグ	製鋼スラグ	鋼材	高炉スラグ	製鋼スラグ
環境負荷物質 排出量	CO ₂	1334 kg/t	1334 kg/t	1334 kg/t	1829 kg/t	203 kg/t	95 kg/t
	SO _x	0.42 kg/t	0.42 kg/t	0.42 kg/t	0.58 kg/t	0.06 kg/t	0.03 kg/t
	NO _x	0.64 kg/t	0.64 kg/t	0.64 kg/t	0.87 kg/t	0.10 kg/t	0.05 kg/t
	ばいじん	0.04 kg/t	0.04 kg/t	0.04 kg/t	0.053 kg/t	0.006 kg/t	0.003 kg/t
天然原料及び 熱エネルギー 消費量	鉄鉱石	1018 kg/t	1018 kg/t	1018 kg/t	1396 kg/t	155 kg/t	73 kg/t
	原料炭	440 kg/t	440 kg/t	440 kg/t	603 kg/t	67 kg/t	31 kg/t
	石灰石	90 kg/t	90 kg/t	90 kg/t	123 kg/t	14 kg/t	6 kg/t
	石油系	152 kg/t	152 kg/t	152 kg/t	207 kg/t	23 kg/t	11 kg/t
廃棄物	使用	3.3 kg/t	3.3 kg/t	3.3 kg/t	4.6 kg/t	0.5 kg/t	0.2 kg/t
	排出	130.2 kg/t	130.2 kg/t	130.2 kg/t	178.6 kg/t	19.8 kg/t	9.3 kg/t
水資源		9.5 m ³ /t	9.5 m ³ /t	9.5 m ³ /t	13.1 m ³ /t	1.5 m ³ /t	0.7 m ³ /t
購入電力		254 kWh/t	254 kWh/t	254 kWh/t	348 kWh/t	39 kWh/t	18 kWh/t
配分率		70.3 %	18.5 %	11.2 %	95.6 %	3.4 %	1.0 %

表-7 発電（石炭火力）における環境負荷配分結果

		重量配分			コスト配分		
		電力	フライ アッシュ	せっこう	電力	フライ アッシュ	せっこう
環境負荷物質 排出量	CO ₂	923 kg/10 ³ kWh	3051 kg/t	3051 kg/t	942 kg/10 ³ kWh	419 kg/t	70 kg/t
	SO _x	0.20 kg/10 ³ kWh	0.65 kg/t	0.65 kg/t	0.20 kg/10 ³ kWh	0.09 kg/t	0.02 kg/t
	NO _x	0.29 kg/10 ³ kWh	0.97 kg/t	0.97 kg/t	0.30 kg/10 ³ kWh	0.13 kg/t	0.02 kg/t
	ばいじん	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
天然資源 消費量	石炭	282 kg/10 ³ kWh	932 kg/t	932 kg/t	288 kg/10 ³ kWh	128 kg/t	21 kg/t
	石灰石	5.0 kg/10 ³ kWh	16.5 kg/t	16.5 kg/t	5.1 kg/10 ³ kWh	2.3 kg/t	0.4 kg/t
廃棄物排出量	石炭灰	22.2 kg/10 ³ kWh	73.5 kg/t	73.5 kg/t	22.7 kg/10 ³ kWh	10.1 kg/t	1.7 kg/t
水消費		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
配分率		97.86 %	0.37 %	1.77 %	99.90 %	0.05 %	0.04 %

製品 X の環境影響統合化結果 (IR)

$$= \sum_{Inv} \sum_{Impact} (Inv(X) \times IF_2^{Impact}) \quad (4)$$

ここに、Inv(X) : 製品 X のインベントリデータ

IF₂^{Impact} : インベントリ項目の影響領域

Impact に関する統合化係数

本研究では、地球温暖化、大気汚染、光化学オキシダント、鉱物・化石資源消費、森林資源消費、水消費、廃棄物の7つの影響領域を対象とした。LIME3における廃棄物排出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および廃棄物処分(埋立)空間の消失の二つである。そのため、廃棄物使用は廃棄物の埋立て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。評価は以下のように副産物の環境負荷の扱いが異なる三つの Case で行った。

Case1 : 副産物の環境負荷なし

Case2 : 重量配分を行った副産物の環境負荷を考慮

Case3 : コスト配分を行った副産物の環境負荷を考慮

3. 評価結果

3.1 各産業の評価結果

Case1~3 における各産業の評価結果を図-2 に示す。Case1 における評価では、セメント産業のみ正の値を示し、セメント産業はセメントを製造することで環境負荷低減に貢献していると考えられる。セメント産業の評価値が高いのは、二酸化炭素排出などの負荷に比べ、廃棄物活用による貢献が大きいためである。また、各産業の製造時に大きな影響を与える環境影響領域が定量的に示された。セメント産業では廃棄物や地球温暖化、鉄鋼産業では鉱物・化石資源や地球温暖化、製紙産業では廃棄物や森林資源、発電（石炭火力）では地球温暖化や鉱物・化石資源、廃棄物が環境に大きな影響を与えることが示された。

副産物製造及び使用時の環境負荷を考慮しても、各産業の主製品の環境影響の正負が入れ変わるほど大きな変化はなく、依然としてセメント産業の貢献が大きい結果となった。しかし、副産物の使用量、製造量が多いセメント産業や鉄鋼産業では評価値が変化することが示された。Case2 の評価値の変化は、Case3 に比べ非常に大きい。副産物への環境負荷の配分率がコスト配分より、重量配分の方が大きいためである。セメント産業では副産物の使用量が多く、セメント製造の環境貢献が30%程度小さ

くなる。鉄鋼産業では、高炉スラグや製鋼スラグに負荷が配分されるため、鋼材製造の環境負荷が30%程度小さくなる。一方、製紙産業、発電（石炭火力）では、副産物の環境負荷を考慮することによる評価値の変化は小さい。製紙産業では購入電力のみが環境負荷配分の影響を受けるが、その影響が相対的に小さいことが原因である。発電（石炭火力）では主製品である電力の製造量が副産物と比較して非常に多く、電力の環境負荷の配分率も高いため、評価値の変化は小さい。

3.2 各種セメントの評価結果

Case1~3における各種セメントの評価結果を図-3に示す。いずれのCaseの評価においても、混合セメントに比べ、ポルトランドセメントの環境貢献が大きいと評価された。また、Case2の評価においてBBは高炉スラグを使用することにより、鉄鋼産業で発生した環境負荷を多く受け持つこととなり、合計の評価値は負の値を示した。

鉄鋼産業では鉱物・化石資源消費の影響が大きいため、Case2のBBも資源消費による負の環境影響が大きい。Case3の評価においても、Case2と同様に資源消費によるBBの環境負荷はPCより大きい。したがって、副産物の環境負荷を考慮すると、副産物を活用することが必ずしも資源消費による環境負荷の低減にはつながらないことが示された。Case2の評価においてFBはフライアッシュを使用することにより、発電（石炭火力）で発生した地球温暖化などの環境負荷を多く受け持つこととなり、評価値は減少した。Case3の評価においても、FBの評価値はわずかに減少した。また、地球温暖化のみに関する評価結果においても、副産物の環境負荷を考慮することで、混合セメントの利用が必ずしも環境負荷低減に繋がらないことが示された。Case2の評価では、混合セメント(BB, FB)の地球温暖化による環境負荷はPCよりも大きくなった。この結果は、一般的に浸透している混合セメントの

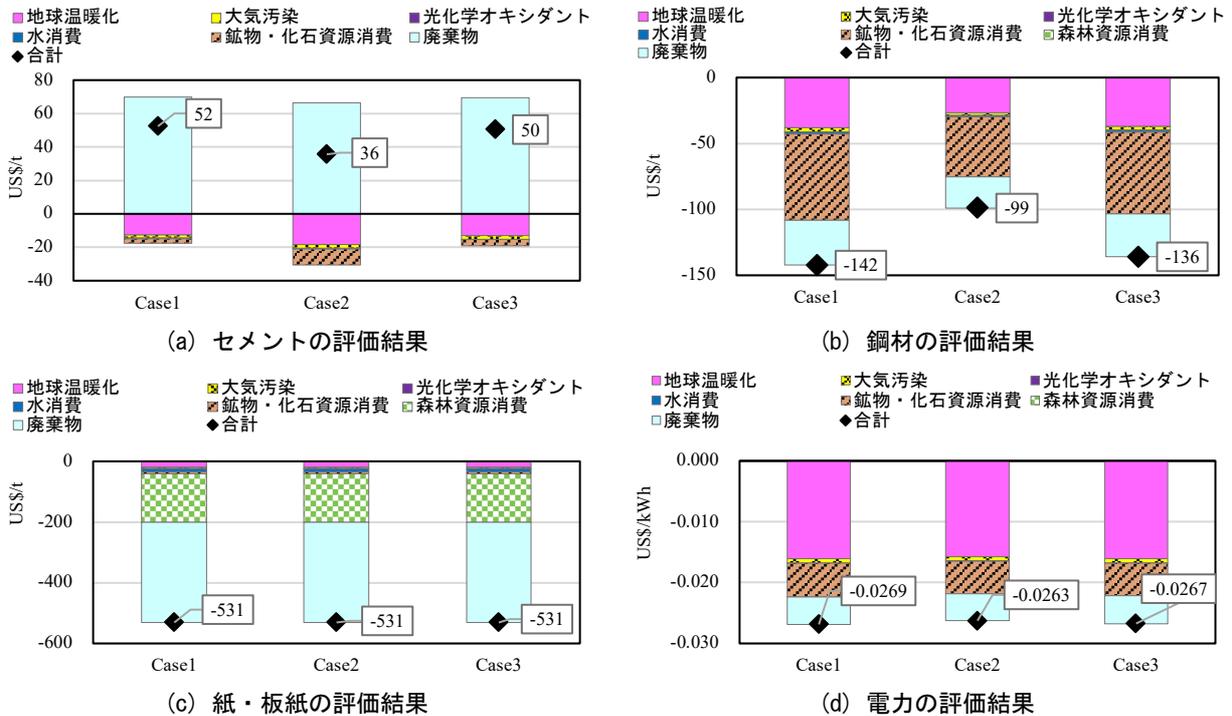


図-2 Case1~3における各産業の評価結果

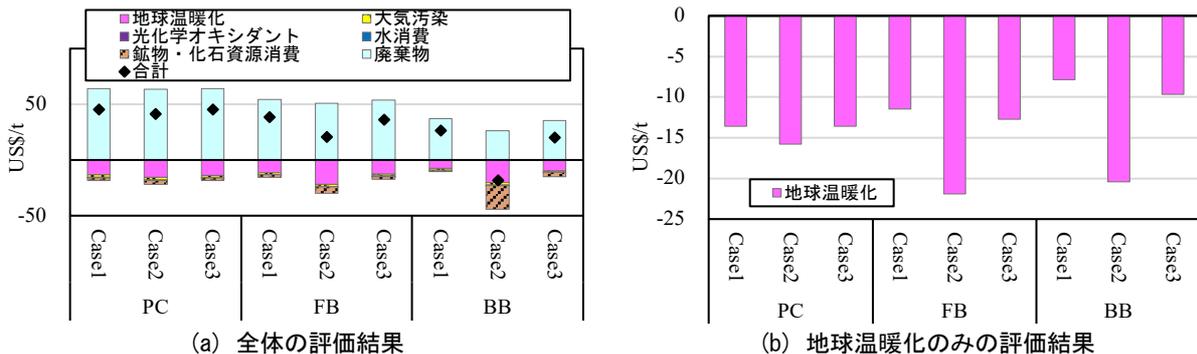


図-3 Case1~3における各種セメントの評価結果

利用は環境負荷低減に繋がるという考え方と相反するものである。一方、Case3の評価では、混合セメント（BB、FB）の地球温暖化による環境負荷はわずかに増加したが、依然としてPCよりも環境負荷は小さい。

ただし、これらの混合セメントに対する環境負荷配分の影響は混合材の各供給源と連動しており、供給源の評価値の変動により混合セメントの環境負荷配分の影響の程度が変動することが考えられる。

4. まとめ

セメント産業の廃棄物活用の貢献の程度を相対的に確認することを目的に、セメント産業、鉄鋼産業、製紙産業、発電（石炭火力）の製品製造を対象に多領域の環境影響を包括した定量的な評価を行った。また、副産物製造時の環境負荷配分が評価結果に及ぼす影響を考察した。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) セメント産業の評価結果は正の値を示し、環境貢献が高いことが示された。セメント産業において二酸化炭素排出などの負荷に比べ、廃棄物活用による貢献が大きいためである。
- (2) 副産物製造時の環境負荷を重量を用いて考慮すると、副産物の使用量、製造量が多いセメント産業や鉄鋼産業では評価値が大きく変化する。
- (3) いずれの環境負荷配分手法を適用しても、PCの評価値は混合セメントより大きいことが示された。また、副産物への環境負荷配分により全てのセメントの評価値が減少した。特に重量配分を行うことで混合セメントの評価値は大きく減少した。

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、桐野裕介氏、（株）トクヤマ 加藤弘義氏、茶林敬司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) 柴崎悠吾，河合研至，星野清一，茶林敬司：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9）重み付けの相違に伴う指標値の産業間での比較，第73回セメント技術大会講演要旨，pp.104-105，2019
- 2) ISO14044：Environmental management -Life cycle assessment- Requirements and guidelines，2006
- 3) 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

- 4) セメント協会：セメントハンドブック 2019年度版，2019
- 5) セメント協会，セメントのLCIデータの概要，2018
- 6) 経済産業省，工業統計調査用地・用水編：<https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/result-2/h26/kakuho/youti/index.html>（閲覧日：2019年11月25日）
- 7) 国立研究開発法人国立環境研究所：日本国温室効果ガスインベントリ報告書，2019
- 8) 株式会社数理計画，大気汚染物質排出量総合調査（平成26年度実績），2017
- 9) 日本鉄鋼連盟：鉄の輪がつなぐ人と地球，2016
- 10) 経済産業研究所，石灰石・ドロマイト不均一価格物量表：<https://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazunari/>（閲覧日：2019年11月25日）
- 11) 経済産業省：石油等消費動態統計年報平成26年，2015
- 12) 日本鉄鋼連盟：鉄鋼業における廃プラスチックリサイクルの取組みについて，2011
- 13) 環境省：平成26年度事業産業廃棄物排出・処理状況調査報告書，2016
- 14) 電気事業連合会：2014年度分電力需要実績，2015
- 15) 日本製紙連合会：紙パルプ産業のエネルギー事情2017年度（2016年度実績）版，2017
- 16) 公益財団法人古紙再生促進センター：古紙ハンドブック2017，2018
- 17) 電気事業連合会：原子力・エネルギー図面集，2015
- 18) 産業環境管理協会：リサイクルデータブック，2018
- 19) 経済産業省，各種統計情報（電力関連）：https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/results_archive.html（閲覧日：2019年11月25日）
- 20) 建設物価調査会：月刊建設物価平成29年10月号，pp.118,776，2017
- 21) 全国家庭電気製品公正取引協議会：電気料金の目安，2014
- 22) 天野耕二，伊藤昌隆，柳沢幸雄：廃棄・副産物の経済価値を考慮した環境負荷量の評価 -セメント産業を事例として-，土木学会論文集，No.636/VII-13，pp.15-21，1999
- 23) 経済産業省，標準発熱量・炭素排出係数：https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/carbon.htm（閲覧日：2019年11月25日）
- 24) 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