

# 廃棄物指標によるセメント及びモルタルの評価とその検討

Evaluation of cements and mortar by waste material indicators

北海道大学大学院工学院環境フィールド工学専攻  
北海道大学大学院工学研究院環境フィールド工学専攻

○学生員 黒澤 弦(Gen Kurosawa)  
正会員 ヘンリー・マイケル(Michael Henry)

## 1. はじめに

コンクリートはその使用性の高さから様々な構造物に用いられ、私たちの生活に欠かせないものとなっている。また、コンクリートの評価には様々な手法が存在し、強度や耐久性などの物性のみならず、天然資源の使用などの環境特性についても研究が進められている。

しかしながら、その評価方法に関してはあくまでもコンクリートを対象としており、構成材料であるセメントについての環境負担低減に向けた評価指標の制定は十分に検討されているとは言えない。

セメントを製造するにあたって多量の二酸化炭素の排出による環境への影響が問題視されるが、その一方でセメントの製造にはその素材や燃料として廃棄物が使用されている。

これらを踏まえた包括的な環境特性を評価するにあたって産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センターによって日本版被害算定型影響評価方法(LIME2)<sup>1)</sup>が提案されている。LIME2 は信頼できる指標であるが、その指標の制定には多大なデータが必要であり、その時の社会や環境の状況により変動するデータが多く、複雑な環境指標になっている。

それを受け、セメントの廃棄物使用に着目した簡易な廃棄物指標によるセメントの評価の検討<sup>2)</sup>が進められているがその数は少なく、評価の対象となったセメントや提案された廃棄物指標数が少ないことから十分な検討が行われたとは言えない。

本研究ではこれらの状況を踏まえ、より適した廃棄物指標を考えるとともにその廃棄物指標によるセメントやモルタルの評価とその検討を行った。

## 2. 廃棄物指標によるセメントとモルタルの評価

### 2.1 廃棄物指標式と評価手法

#### (1) 廃棄物指標式

土木学会の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<sup>3)</sup>では、環境調和型コンクリートの定量的評価指標の一部として廃棄物指標(Iw)が提案されている。式[1]はその廃棄物指標式を示したものである。

$$Iw = (Ur - Cw) / (Uv + Ur) \quad [1]$$

ここに、Ur：リサイクル資源使用量(kg/ton-cement)

Cw：廃棄物発生量(kg/ton-cement)

Uv：バージン資源使用量(kg/ton-cement)

ただし、Ur < Cw のとき、Iw = 0

ここで式[1]のリサイクル資源には廃棄物と副産物の両者が含まれ、これらは区別なく同様のものとして扱われている。しかしながら副産物と廃棄物ではその製造過程や用途から同等に扱うことは問題があると思われる。

資源循環の観点で考えたとき、その有効活用の困難度により資源再利用した際の社会への貢献度は変動するものと考えらるべきである。既往の研究<sup>4)</sup>ではこの問題を解決するために各資源のリサイクル率に着目し、式[1]にリサイクル率を反映した式[2]の提案が行われている。

持続可能な資源循環型社会を形成するために、リサイクルが困難であるリサイクル率の低い未利用資源の利用が重要であり、廃棄物指標はこれを反映したものが望ましく、リサイクル率が低い資源を再利用しているほど廃棄物指標の評価値は高くなるべきだと考えられている。そのため式[2]では資源の利用量だけで評価するのではなく、資源のリサイクル率が高ければ廃棄物指標の評価値が低くなり、リサイクル率が低ければ高くなるようにリサイクル資源使用量に重み付けが行われている。

$$Iw3 = \{ \sum(\gamma_k \times w_k) - Cw \} / (Uv + Ur) \quad [2]$$

ここに、 $\gamma_k$ ：(100 - リサイクル資源 k のリサイクル率 (%)) / 100

$w_k$ ：リサイクル資源 k の使用量(kg/ton-cement)

ここで式[2]のリサイクル率にはセメント産業でのリサイクル率と他の産業でのリサイクル率を合わせた値が使われており、両者の区別はされていない。しかしながらセメント産業は他の産業と比べ廃棄物の再利用がしやすく、多くの廃棄物を受け入れており<sup>5)</sup>、全体のリサイクル率に対するセメント産業のリサイクル率の影響は大きい。セメントの環境への貢献度を評価するためにはセメント産業の影響を取り除く必要があると考え式[3]を提案する。式[3]では式[2]のリサイクル率をセメント産業を除いた他の産業のみのリサイクル率に変更した。

$$Iw4 = \{ \sum((\gamma_k + \gamma_{kc}) \times w_k) - Cw \} / (Uv + Ur) \quad [3]$$

ここに、 $\gamma_{kc}$ ：セメント産業でのリサイクル資源 k のリサイクル率 (%)/100

これまでの廃棄物指標ではリサイクル率をそのまま重み付けのために使用していたが、リサイクル率が低い資源の影響が大きく出ることが予想されたため、他の産業

とセメント産業の社会への影響度を比較した式[4]を新たに検討した。式[4]では未使用資源量に関わらず、セメント産業と他の産業のリサイクル率を比較し、0 から 1 までの重み付けを行うことによって他の産業ではリサイクルを行うことが困難である資源に対してのセメント産業の貢献度を検討した。

$$Iw5 = \{\sum(Wwk \times wk) - Cw\} / (Uv + Ur) \quad [4]$$

ここに、Wwk：リサイクル資源 k の重み

Wwk の算出においてはまず (セメント産業のリサイクル率 / 他の産業でのリサイクル率) を計算し、最小値を 0、最大値を 1 とし計算された数値を基に比例的に Wwk の値を与えた。式[4]に用いたリサイクル率の比と重み Wwk を表-1 に示す。

(2) 評価手法と評価に用いたデータ

セメントの廃棄物指標の評価は、ポルトランドセメント(PC)、高炉セメント B 種(BB)、フライアッシュセメント B 種(FB)の三種類のセメントに関して行い、モルタルの廃棄物指標の評価は養生期間 28 日、ポルトランドセメント、フライアッシュ、シリカフェーム、川砂で構成された水粉体比 0.14、0.17、0.2 の三種類のモルタルに関して行った。評価に用いるセメントの資源使用量や廃棄物利用量には 2016 年データを用いた。式[3][4]に関しては副産物と廃棄物を完全に区分し、廃棄物のみを考慮することとした。

フライアッシュについては元のデータ<sup>9)</sup>では石炭灰に含まれており、石炭灰とフライアッシュの区別はされていない。しかしながら石炭灰とフライアッシュは廃棄物と副産物という性格の違いがあるので分けて考えるのが望ましい。よって本研究ではフライアッシュセメントの生産量を基にフライアッシュの利用量を算出し、新たにその項目を追加した。

リサイクル資源の使用量はセメントごとに示されたデータはないので、各種セメントの生産量データを基に算定することで与えた。具体的には PC のリサイクル資源使用量においては、各種セメントの生産量データから混合材を含まない状態の PC の生産量を見積もるとともにセメント業界における廃棄物・副産物使用量をこの値で除することによって算出した。BB、FB のリサイクル資源使用量においては、それぞれの混合材の混合率を 42.6%、15.5%と仮定し、BB、FB 内に占める PC の割合を考慮することにより算出した。バージン資源使用量は全体の資源使用量からリサイクル資源使用量を減じた値を各種セメントの PC の割合を考慮し、算出した。

リサイクル率においては各種データ<sup>7)8)9)10)11)</sup>を基に設定し、記載がないものについてはその他として計上した。また、2016 年データがないものについては最も近い年度のデータを与えた。

2.2 各種セメントとモルタルの評価

(1) 各種セメントの評価

各種セメントにおいての式[2][3][4]の計算結果を図-1 に示す。

表-1 リサイクル率の比と重み Wwk

	リサイクル率の比	Wwk
石炭灰	1.55	0.35
汚泥、スラッジ	0.36	0.08
建設発生土	0.10	0.02
燃えがら、ばいじん、ダスト	0.13	0.03
非鉄鉱滓等	0.06	0.01
廃プラスチック	0.19	0.04
木くず	0.12	0.03
製鋼スラグ	0.05	0.01
廃油	0.34	0.08
ガラスくず等	0.03	0.00
廃タイヤ	0.08	0.02
肉骨粉	4.38	1.00
その他	0.01	0.00

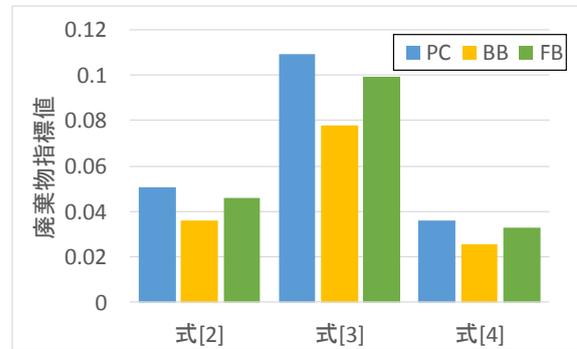


図-1 式[2][3][4]によるセメントの計算結果

表-2 モルタルの配合表

W/B	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
	W	PC	FA	SF	RS	SP
0.14	172	553	369	307	962	28
0.17	198	523	349	291	962	26
0.20	221	496	331	276	962	25

値の大小はあるものの、いずれの式でも廃棄物指標の評価値は PC が一番高く、BB が最も低くなり、廃棄物指標の違いによる評価値の順位の違いは見られなかった。

(2) モルタルの評価

モルタルの配合表を表-2 に示す。W、FA、SF、RS、SP はそれぞれ水、フライアッシュ、シリカフェーム、川砂、ポリカルボン酸系高性能減水剤である。B は粉体を示し、ここでは PC、FA、SF の合計を指す。

これらのモルタルにおいての式[2][3][4]の計算結果を図-2 に示す。

セメントの場合と同様に値の大小はあるものの、いずれの式でも廃棄物指標の評価値は水粉体比 0.14 が一番高く、0.20 が一番低くなり、廃棄物指標の違いによる評価値の順位の違いは見られなかった。また、この評価値は水粉体比が少なく、セメント量が多いほど高いことからセメントの影響を強く受けていると思われる。

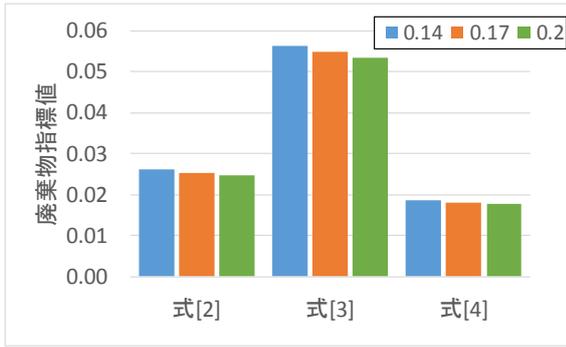


図-2 式[2][3][4]によるモルタルの計算結果

### 3. LIME2 によるセメントとモルタルの評価

#### 3.1 評価手法

LIME2 のセメントの評価は原料採掘～原料輸送～焼成～粉砕～製品のセメント製造過程を対象とし、これらの工程で消費する天然資源、消費電力、発生する廃棄物や環境負荷物質、利用廃棄物を評価要素とした。この際、副産物は商品として製造されたものであり消費することが前提のものであるので、廃棄物と違い利用することによる環境負荷への影響はないものとして考えた。

各種セメントの製造に必要な原材料等についてはセメントの LCI データ<sup>12)</sup>とリサイクル資源の使用量より算出した。

モルタルの評価に関してもセメントと同様に行った。

#### 3.2 各種セメントとモルタルの評価

##### (1) 各種セメントの評価

各種セメントにおける LIME2 の評価結果を図-3、図-4 に示す。

セメントは人間健康被害に関しては被害を与えているが、他の被害評価に関しては負の値になっており社会貢献をしていることが分かる。また、統合被害評価の合計値は負の値になっており、評価した全てのセメントが社会に良い影響を与えている。その影響は PC、FB、BB の順に大きい。

##### (2) モルタルの評価

各種モルタルについての LIME2 の評価結果を図-5、図-6 に示す。

環境への影響度は水粉体比 0.14 のものが一番大きく、セメントの影響を強く受けていることが分かった。また、セメントと同様に全てのモルタルにおいて人間健康には悪い影響を与えるものの社会資本、一次生産、生物多様性においては良い影響を与えていることが分かる。統合被害評価においてもその合計値は全て負の値になっており、評価した全てのモルタルは社会に良い影響をもたらしている。その影響は水粉体比 0.14、0.17、0.20 の順に大きい。

### 4. 両手法の比較

図-7、図-8 は各種セメントと各種モルタルの LIME2 の評価結果と提案された廃棄物指標の評価結果との関係を示したものである。

セメント、モルタルともにどの廃棄物指標の評価値においても LIME2 の評価結果との間に相関関係が見ら

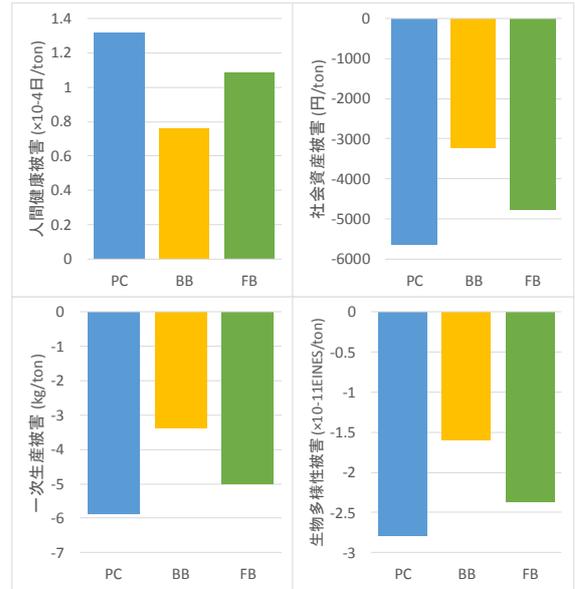


図-3 LIME2 によるセメントの各種被害評価

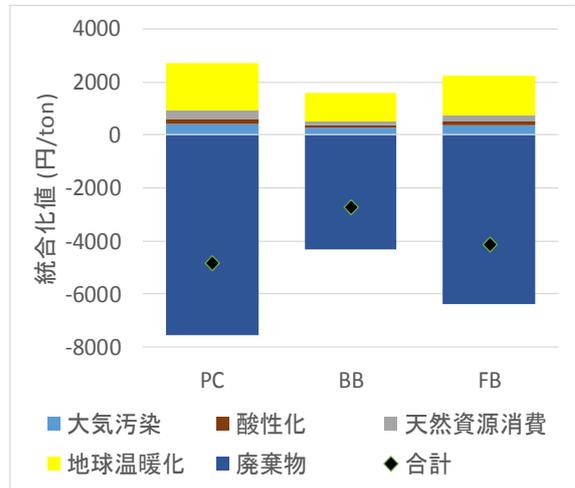


図-4 LIME2 によるセメントの統合被害評価

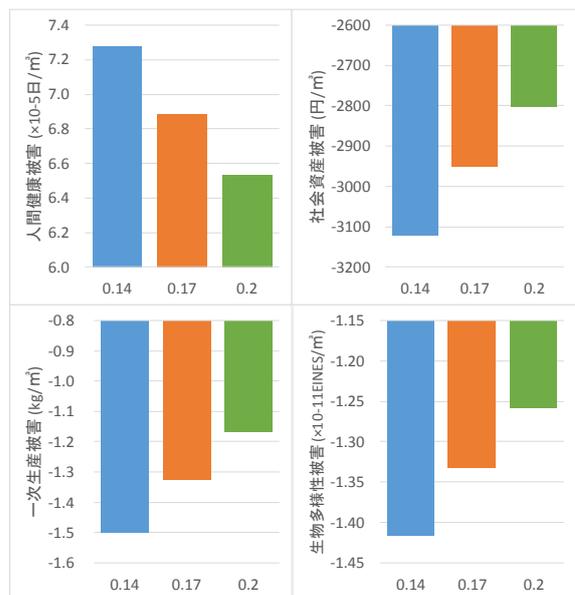


図-5 LIME2 によるモルタルの各種被害評価

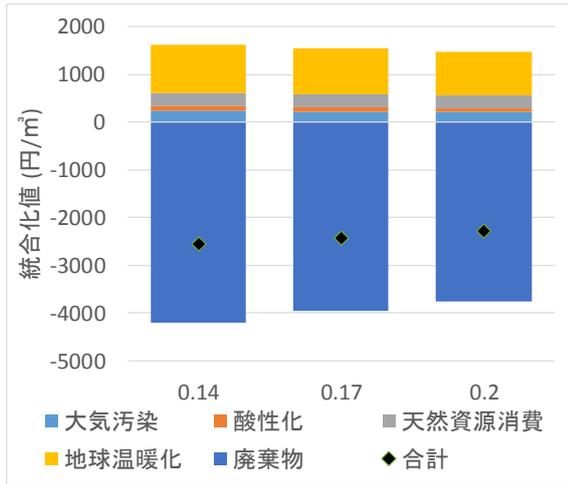


図-6 LIME2 によるモルタルの統合被害評価

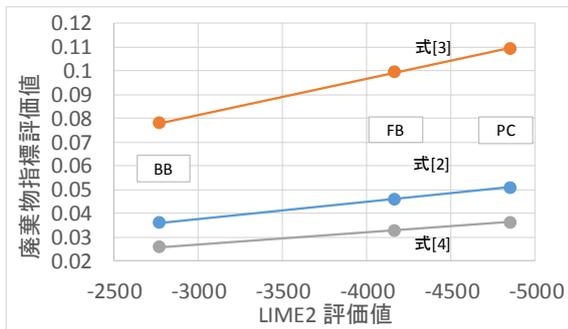


図-7 各種セメントにおける LIME2 と廃棄物指標の評価結果の関係

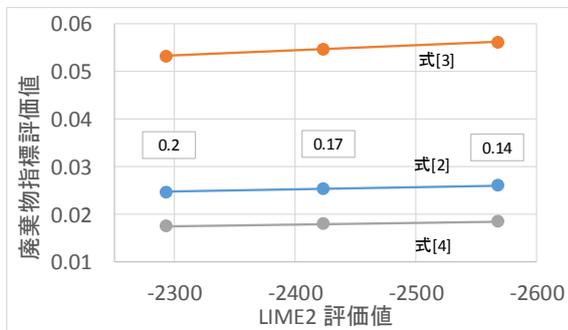


図-8 各種モルタルにおける LIME2 と廃棄物指標の評価結果の関係

れた。これは水粉体比が低かったこともありモルタルにセメントの影響が強くなったためだと考えられる。

### 5. 考察及びまとめ

すべての廃棄物指標において LIME2 との相関関係が見られたことから、今回検討した廃棄物指標は環境への影響を算出する手法として有効である可能性が示された。しかし、本研究では新たに二つの廃棄物指標を提案したが、その評価結果においては既存の廃棄物指標との大きな違いは見られなかった。

セメントの LIME2 や廃棄物指標での評価は PC、BB、FB のどのセメントでも同様の傾向が見られたが、これはセメント内のポルトランドセメントの割合に大きく影

響されており、副産物の扱い方によって変化するものと思われる。

モルタルの LIME2 や廃棄物指標での評価はその水粉体比に関わらず、セメント単体を評価した場合と同様の傾向を示した。また、評価値は水粉体比に比例するような結果が出たことから、モルタルの評価はセメントの影響を強く受けているものと考えられる。これは今回検討したモルタルが低水粉体比であり、セメントの使用量が多いことも関係していると思われる。また、モルタルはコンクリートよりも単純な構造であり、骨材による影響が出にくかったことも原因として考えられる。今回検討したモルタルは水粉体比を変えただけのものであり、強度などの物性については考慮されていない。セメントや骨材の種類を変えた場合の物性や環境影響の変化も今後検討を行う。

LIME2 の評価ではセメント、モルタル両方において人間健康被害、社会資産被害、一次生産被害、生物多様性被害の人間健康被害を除く三つの項目で負の値が出た。また、統合化値の合計も負の値が出たことから、セメント及びモルタルは社会や環境に良い影響を与えていると評価することが出来る。しかし、どの項目を重視するかによってその評価は変化する。廃棄物指標もこれらの要素を反映したものが望ましい。

これらの問題を解決するため今後さらなる検討を行う。

### 参考文献

- 1) 伊坪徳宏ほか：LIME2 意思決定を支援する環境影響評価手法、産業環境管理協会、2010。
- 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、p.679-686、2015。
- 3) 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、2011。
- 4) 久我龍一郎ほか：ポルトランドセメント製造による廃棄物・副産物の資源化を表す環境指標に関する検討、セメント・コンクリート論文集、Vol.68、p.510-515、2014。
- 5) 産業環境管理協会：リサイクルデータブック 2017、2017。
- 6) セメント協会：セメントハンドブック 2018 年度版、2018。
- 7) 環境省：産業廃棄物の排出及び処理状況等 (平成 27 年度実績) について、2018。
- 8) 環境省：一般廃棄物の排出及び処理状況等 (平成 28 年度実績) について、2018。
- 9) 国土交通省：平成 24 年度建設副産物実態調査結果、2014。
- 10) 石炭エネルギーセンター：石炭灰全国実態調査報告書 (平成 28 年度実績)、2018。
- 11) 鉄鋼スラグ協会：平成 28 年度鉄鋼スラグ需給の概要、2017。
- 12) セメント協会：セメントの LCI データの概要、2018。