

◇論文◇

リサイクル資源活用およびCO₂排出を考慮した
環境指標による橋梁の評価Evaluation of Bridge by Environmental Indicator
Considering Resource Recycling and CO₂ Emission

桐野 裕介*, 新見 龍男**,
星野 清一***, 河合 研至****

KIRINO, Yusuke*; SHINMI, Tatsuo**;
HOSHINO, Seiichi***; KAWAI, Kenji****

要 旨

リサイクル資源の活用による環境貢献およびCO₂排出による環境負荷の両影響を考慮した、構造物の簡便な環境指標の構築を目的に、セメント種類を変更した場合の橋梁の環境影響評価を行った。著者らが提案した統合化指標による評価を行った結果、リサイクル活用の難しい廃棄物を多く使用しているポルトランドセメントの指標値が高炉セメントと比較して高くなった。一方、高炉セメントでは、高炉スラグの比率が増えるほど、活用の比較的容易な副産物の使用量が増えるものの、活用の難しい廃棄物の使用量が減るため、相対的に低い評価値となった。また、日本版被害算定型影響評価手法(LIME2)の統合化評価結果においても、同様の結果が得られ、両手法による評価値は相対的に高い一致を示した。

キーワード : ポルトランドセメント, 高炉セメント, 橋梁, 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)

*中央研究所 第1研究部 セメント技術チーム

Cement Technology Team, R&D Department I, Central Research Laboratory

**株式会社トクヤマ Tokuyama Corporation

***中央研究所 企画管理部 研究推進チーム

Research Management Team, Planning & Administration Department, Central Research Laboratory

****国立大学法人広島大学 Hiroshima University

ABSTRACT

A new environmental indicator, which considers resource recycling and CO₂ emissions, was proposed to evaluate the environmental impact of materials used for structures. We tried to evaluate the environmental impact of different types of cement used for construction of a bridge by both the proposed indicator and an existing method. The proposed indicator showed that Portland cement had a greater contribution to the environment than Portland blast-furnace slag cements because it uses large amounts of difficultly recyclable resources (wastes), while Portland blast-furnace slag cements use large amounts of easily recyclable resources (by-products). The integrated assessment results by the life-cycle impact assessment method based on endpoint modeling (LIME2), which was adopted as an existing method in this study, also showed that Portland cement had a greater contribution to the environment. Consequently, the proposed new environmental indicator can easily provide environmental impact results consistent with LIME2 for structures.

Keywords : *Portland cement, Portland blast-furnace slag cement, Bridge, Waste and by-products, Carbon dioxide (CO₂), Life cycle assessment (LCA), Life-cycle impact assessment method based on endpoint modeling (LIME)*

1. はじめに

2015年の国連サミットにて採択されたSDGs(持続可能な開発目標)の達成に向け、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。環境面においても、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を排出することから、地球温暖化の観点のみに着目し、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リサイクル資源(廃棄物・副産物)を活用することにより、資源循環の推進に大きく貢献している。

上述した二つの環境課題(地球温暖化および資源循環)は、国内のセメント製造において、他の環境課題(大気汚染等)と比較して影響が大きく、また、トレードオフの関係になる場合があることが、著者らの研究により明らかになっている¹⁾。そのため、セメント製造の持続可能性を議論するためには、地球温暖化の観点のみを考慮した指標ではなく、地球温暖化と資源循環の両者の観点を考慮した指標を用

いる必要がある。

セメント産業においては、地球温暖化の指標としてCO₂排出原単位が一般的に使用されている。また、資源循環の指標としては、Global Cement and Concrete Associationの代替原料比率²⁾や土木学会より提案されている廃棄物に関わる指標³⁾(以下、廃棄物指標)等が用いられているが、これらの資源循環に関する指標は、すべてのリサイクル資源を同一の重みで取り扱い、その種類による区別を行っていない。ライフサイクルアセスメントに関する要求事項及び指針を定めたISO 14044-2006において、「廃棄物と副産物(共製品)は異なる取扱いとする」ことが明記されているものの、上述の資源循環に関する指標では、これらの差異が反映されていないなど、資源循環に関する側面が正しく評価されているとは言い難い。

このようななか、著者ら¹⁾⁴⁾は、セメント製造の資源循環に関する側面を評価することを目的に、リサイクル資源の活用の困難さを反映した新たな指標を提案している。また、これらの指標を、構造物単位での評価に適用するとともに、地球温暖化指標との統合化に関しても検討を行ってきた⁵⁾。

本研究では、著者らが提案した、資源循環と地球温暖化の両環境影響を考慮した、簡便な統合化指標

を検証するため、仮想的にセメント種類を変更した場合の橋梁の評価を行った。さらに、日本版被害算定型影響評価手法(LIME2)⁶⁾により、同橋梁の環境影響評価を行い、両評価結果の整合性を検討した。

2. 統合化指標による橋梁の評価

2.1 統合化指標の評価方法

(1) 廃棄物指標評価式

循環型社会の構築のためには、リサイクル資源を多量に活用することが望まれている一方、各リサイクル資源の活用の困難さに関しても考慮する必要がある。リサイクル資源のなかには、比較的容易に活用できる副産物と活用が困難な廃棄物が存在しており、前者は既にその多くが活用されている一方、後者はその一部しか活用できていない。そのため、後者の活用をより優先的に進めることによって、社会全体でのリサイクル資源の活用が進むことが期待できる。一方、ある特定のリサイクル資源が廃棄物・副産物のどちらであるかは、公開されていない場合が多く、混同して取り扱われることも多い。また、廃棄物のなかでもその活用の困難さは、種類ごとに異なっていると考えられる。これを踏まえ著者らは、リサイクル資源の活用の困難さとして、公開情報である未利用率を反映した評価式 Iw_4 を提案している⁵⁾。 Iw_4 は、リサイクル資源の活用量が多く、また、そのリサイクル資源の活用の困難さが大きいほど、資源循環上の評価が高くなることが想定される。本研究では、建設材料の評価にあたり、 Iw_4 を用いた。

$$Iw_4 = \sum y_k \times (w_k - c_k) \quad [1]$$

ここに、

y_k : リサイクル資源 k の未利用率

$$= (100 - \text{リサイクル資源 } k \text{ の} \\ \text{リサイクル率}(\%)) / 100$$

w_k : リサイクル資源 k の使用原単位 (kg/t)

c_k : リサイクル資源 k の発生原単位 (kg/t)

なお、 Iw_4 の計算は、現在の日本国内のリサイクル率を元に計算を行うこととしており、現在実際に未利用率が高い廃棄物の活用量が多い材料ほど高く評価される。

構造物に関する廃棄物指標 Iw_4' は、 Iw_4 に材料使用量に乗じたものの総和として、式[2]による評価⁵⁾を行った。なお、廃棄物指標を構造物に適用するに

あたり、単位をkgからtに修正するため、1000で除している。

$$Iw_4' = \sum \{M_j \times Iw_4(\text{材料 } j)\} / 1000 \quad [2]$$

ここに、

M_j : 材料 j の使用量 (t)

(2) 温暖化指標評価式

建設材料の地球温暖化を示す指標としては、式[3]に示す Ig_2 を用いて評価を行った⁵⁾。 Ig_2 は、値が低いほど環境への影響が小さい。

$$Ig_2 = \text{CO}_2 \text{ 排出原単位 (kg/t)} \quad [3]$$

また、構造物に関する温暖化指標 Ig_2' は構造物の材料起源の総 CO_2 排出量とし、各建設材料の CO_2 排出原単位にその使用量に乗じた値の総和として式[4]により算出した⁵⁾。

$$Ig_2' = \sum \{M_j \times Ig_2(\text{材料 } j)\} / 1000 \quad [4]$$

(3) 統合化指標評価式

廃棄物指標と温暖化指標の統合化手法として、それぞれの指標に重み付けを行い、その総和を取る手法(式[5] - [7])を行った⁵⁾。式[5]右辺の第1項は各材料の廃棄物による環境影響(以下、廃棄物影響)、第2項は各材料の地球温暖化による環境影響(以下、温暖化影響)を表わす。重み付けに際しては、 Iw_4 および Ig_2 の両指標とも値が比較的大きく、一般的な建設材料であるポルトランドセメント(PC)の環境影響を基準とし、環境貢献を正の値、環境負荷を負の値とした。

$$I = W \times Iw_4 + G \times Ig_2 \quad [5]$$

$$W = Ew(\text{PC}) / Iw_4(\text{PC}) \quad [6]$$

$$G = Eg(\text{PC}) / Ig_2(\text{PC}) \quad [7]$$

ここに、

I : 材料の統合化指標

W : 廃棄物による重み

G : 地球温暖化による重み

$Ew(\text{PC})$: PCの廃棄物影響

$Eg(\text{PC})$: PCの温暖化影響

重み付けの方法は、著者ら⁷⁾によって、複数検討しているが、ここでは日本版被害算定型影響評価手法(LIME2)の統合化係数を用いて、重み付けを行う方法を検討した(式[8], [9])。統合化係数とは、LIME2において、各種環境影響のインベントリから単一指標を得るための係数である⁸⁾。LIME2では、統合化評価を行う場合には、環境負荷物質ごとにそれぞれの統合化係数を用いて評価を行うが、ここでは簡易化のため、廃棄物の重み付けに関しては、ポルトランドセメントで最も活用量の多い、産業廃棄物(ばいじん)の値(17.7yen/kg)を用いた。なお、統合化係数の値は、活用量の二番目に多い産業廃棄物(汚泥)では16.6yen/kg、活用量の三番目に多い一般廃棄物(覆土)では14.5yen/kgであり、本研究で用いた産業廃棄物(ばいじん)の値との差は小さい。地球温暖化の重み付けに関しては、統合化係数(CO₂)の値(2.33yen/kg)を用いた⁸⁾。PCのリサイクル資源の使用原単位とCO₂排出原単位としてそれぞれ329, 782kg/tを用いた⁹⁾。なお、上記のとおり、リサイクル資源の使用は環境貢献であるため、 E_w (PC)は正の値、CO₂の排出は環境負荷であるため、 E_g (PC)は負の値となる。

$$E_w(\text{PC}) = \text{統合化係数(産業廃棄物(ばいじん))} \times \text{リサイクル資源の使用原単位(PC)} \quad [8]$$

$$E_g(\text{PC}) = -\text{統合化係数(CO}_2\text{)} \times \text{CO}_2\text{排出原単位(PC)} \quad [9]$$

また、構造物の統合化指標式 I' (10³ yen)は、[5]に示す統合化指標 I に材料使用量を乗じたものの総和として式[10]により算定した⁵⁾。なお、 I' は Iw_4' および Ig_2' に重み W および G を乗じたものの和としても算定できる。

$$I' = \sum \{M_j \times I(\text{材料 } j)\} / 1000 \quad [10]$$

$$= W \times Iw_4' + G \times Ig_2'$$

2.2 評価に用いたデータ

(1) 評価に用いた材料

評価に用いた材料を **Table 1** に示す。セメントは、ポルトランドセメント(PC)およびポルトランドセメ

Table 1 The amount of recycle resources, CO₂ emission and recycling rate of each material (各材料のリサイクル資源使用原単位, CO₂排出原単位, およびリサイクル率)

Category and items		PC	BA	BB	BC	Steel bar	Sand	Gravel	Recycling rate (%)
Wastes and by-products (kg/t)	Blast furnace slag	0.0	200.0	426.0	650.0	0.0	0.0	0.0	100
	Fly ash	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
	Coal ash	115.8	92.6	66.5	40.5	0.0	0.0	0.0	98
	Sewage sludge, Sludge	46.4	37.2	26.7	16.3	0.0	0.0	0.0	78
	By-product gypsum	37.5	30.0	21.5	13.1	0.0	0.0	0.0	100
	Waste soil from construction	33.8	27.0	19.4	11.8	0.0	0.0	0.0	88
	Incineration ash, Soot, Dust	24.2	19.4	13.9	8.5	0.0	0.0	0.0	24
	Non-ferrous slag	11.7	9.4	6.7	4.1	0.0	0.0	0.0	92
	Wood chips	10.2	8.1	5.8	3.6	0.0	0.0	0.0	79
	Foundry sand	9.1	7.3	5.2	3.2	0.0	0.0	0.0	52
	Waste plastics	7.6	6.1	4.4	2.7	0.0	0.0	0.0	54
	Steel slag	7.7	6.2	4.4	2.7	0.0	0.0	0.0	98
	Waste oil	4.6	3.7	2.6	1.6	0.0	0.0	0.0	39
	Waste white clay	4.3	3.4	2.5	1.5	0.0	0.0	0.0	52
	Recycled oil	3.3	2.7	1.9	1.2	0.0	0.0	0.0	52
	Waste tire	1.3	1.0	0.7	0.4	0.0	0.0	0.0	90
	Meat and bone meal	1.1	0.9	0.6	0.4	0.0	0.0	0.0	52
	Coal mining waste	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	52
	Others	10.5	8.4	6.0	3.7	0.0	0.0	0.0	52
Total	329.1	463.4	614.8	765.3	0.0	0.0	0.0	-	
CO ₂ (kg/t)		782	626	450	274	945	7	5	-

ントを高炉スラグ微粉末で置換した高炉セメントを評価した。高炉セメントは、A種(BA)、B種(BB)、C種(BC)を想定し、置換率はそれぞれ20.0、42.6、65.0%とし、星野ら¹⁰⁾の2011年度のデータを用いた。

セメント以外の建設材料に関しては土木学会¹¹⁾のデータを用いて算定した。ただし、鉄筋に関しては、廃棄物の使用量と発生量に関して信頼できるデータが得られなかったため、両者を0と仮定した。廃棄物指標の評価で必要となる各リサイクル資源のリサイクル率には、既往の文献¹⁰⁾に示される値を用いた。CO₂排出原単位は、直接排出したCO₂(Scope 1)に購入電力分(Scope 2)を加えた値を用いた。購入電力からCO₂排出原単位への変換には、温室効果ガス排出量・報告・公表制度の代替値(2011)を用いた。

(2) 評価に供した橋梁

超高強度繊維補強コンクリート(UFC)製の歩道橋である酒田みらい橋¹²⁾の上部工をモデルに評価を行った。実際の歩道橋(以下、橋梁)は、設計基準強度(σ_{ck})が180N/mm²のUFCが用いられているが、武者らの報告¹²⁾を参照し、仮に設計基準強度40N/mm²の鉄筋コンクリート(RC)製とした場合の設計をモデルとして、セメントの種類を変化させたケースについて評価を行った。評価の範囲は橋梁の材料のみとし、施工は評価範囲に含めなかった。Fig. 1に評価に供した橋梁を、Table 2に構造物の諸条件を示す。

Table 2 Material condition for bridge
(橋梁の諸条件)

Concrete		Steel bar
Total volume (m ³)	Compressive strength (N/mm ²)	Total weight (t)
110	40	16.5

Table 3 Mix proportion of concrete
(コンクリート配合)

	Type of cement	(kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad
RC40(PC)	PC	169	412	767	1025	1.0
RC40(BA)	BA	168	410	757	1033	1.0
RC40(BB)	BB	167	407	745	1043	1.0
RC40(BC)	BC	166	404	733	1052	1.0

評価に用いたコンクリートの配合をTable 3に示す。コンクリート配合として、PC(RC40(PC))およびBB(RC40(BB))は生コンクリート工場にヒアリングし、設計基準強度40N/mm²、スランプ10cmの値を用いた。BA(RC40(BA))およびBC(RC40(BC))に関しては、実際のデータが得られなかったため、RC40(PC)およびRC40(BB)から、内挿および外挿により求めた。なお、これらの配合設計では、劣化に対する抵抗性および物質の透過に対する抵抗性に関して、考慮しなかった。

2.3 統合化指標による橋梁の評価結果

Fig. 2に式[10]を用いて橋梁の環境影響を評価した結果を示す。廃棄物活用による環境貢献に関しては、RC40(PC) > RC40(BA) > RC40(BB) > RC40(BC)となり、セメントの混合材比率が高いほど、低い評価となった。一方、CO₂排出による環境負荷に関しては、RC40(BC) > RC40(BB) > RC40(BA) > RC40(PC)となり、セメントの混合材比率が高いほど、高い評価となった。また、統合化結果は、RC40(PC) > RC40(BA) > RC40(BB) > RC40(BC)の順で大きい値を示した。この結果は、LIME2の統合化係数は、CO₂の値と比較し、産業廃棄物(ばいじん)の値が7.6倍大きいことにより、国内のセメントにおいては、廃棄物による環境影響が地球温暖化による環境影響より大きいこと(すなわち、 $|E_w(PC)| > |E_g(PC)|$)による。このことから、ポルトランドセメントを単独で使用した

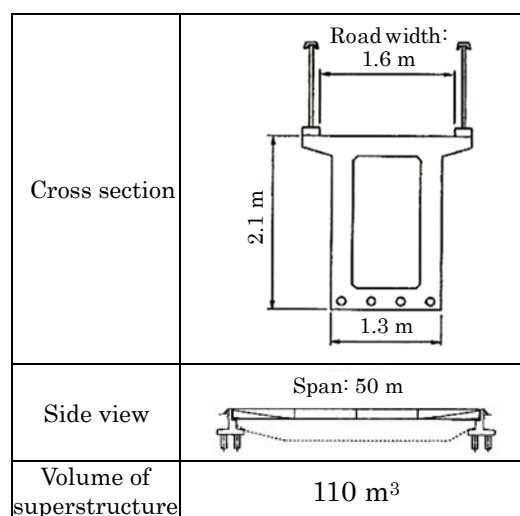


Fig. 1 Bridge used for assessment¹¹⁾
(評価に供した橋梁)

方が高炉セメントを使用した場合より環境貢献が大きいこと、混合材の混合率が大きいほど環境貢献が小さくなることが示唆された。

3. 日本版被害算定型影響評価手法(LIME2)による橋梁の評価

3.1 LIME2による評価方法

前章の統合化指標による評価と同様に、Fig.1に示す設計基準強度40N/mm²のRCを用いた橋梁について、セメントをPC, BA, BB, BCとした場合の環境影響を日本版被害算定型影響評価手法(LIME2)⁶⁾により評価した。評価には、LIME2による評価機能が搭載されているライフサイクルアセスメント支援ソフトウェアであるMiLCA(産業環境管理協会)を用いた。評価にあたっては、環境貢献を正の値、環境負荷を負の値として算定した。各セメントの原料原単位、リサイクル資源使用量、環境負荷物質発生量、購入電力などのインベントリデータについては前章と同様に、星野ら¹⁰⁾の2011年度の値を用いた。

評価におけるリサイクル資源の取扱いについては、下記のとおりとした。廃棄物に関しては、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。副産物(ここでは高炉スラグ、フライアッシュ、副産セッコウのみを仮定)に関しては、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、ISO14044¹³⁾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ないものと仮定し、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。

細骨材、粗骨材についてはCO₂排出量と資源消費のみを、また混和剤についてはCO₂排出量のみを考慮し、これらのCO₂排出量については前章と同一の値を用いた。細骨材、粗骨材の資源消費については、橋梁に使用される分と同一量の“岩石”が消費され

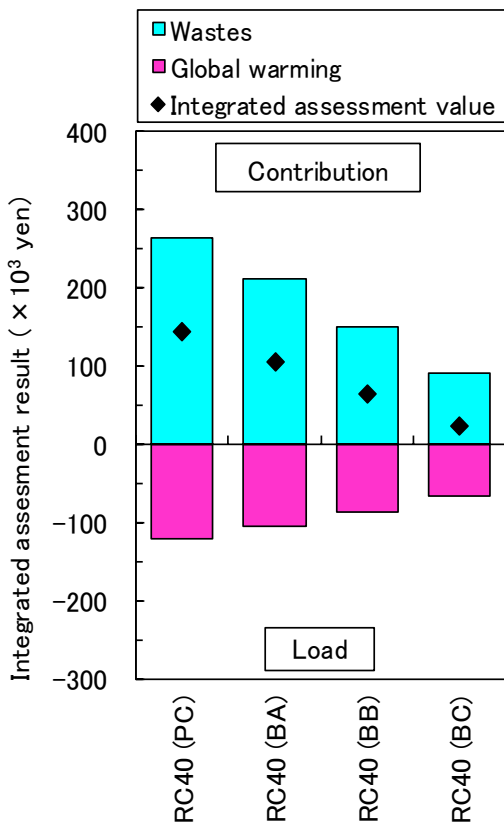


Fig. 2 Integrated assessment results of bridge by proposed indicators
(提案した統合化指標による橋梁の評価結果)

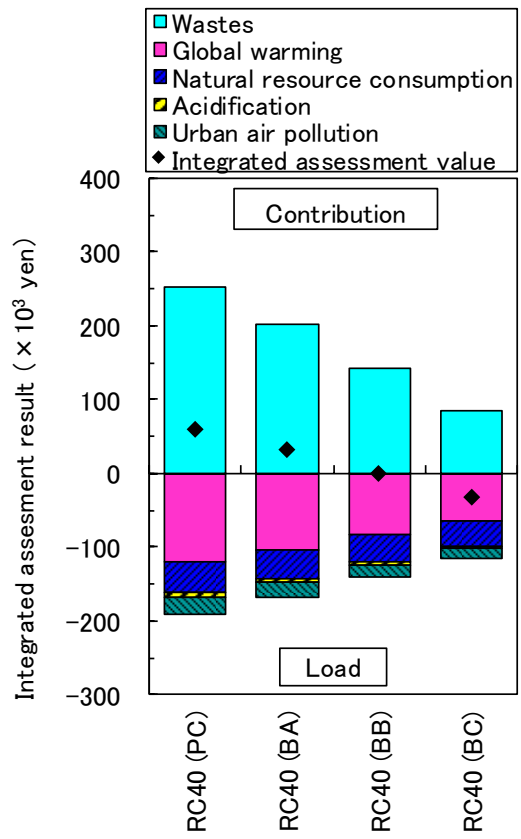


Fig. 3 Integrated environmental impact assessment results of bridge by LIME2
(LIME2による橋梁の環境影響評価結果)

るものとした。鉄筋については、MiLCAで用いられているLCAデータベースIDEAの普通鋼棒鋼のインベントリデータを活用した。また鉄筋の“廃棄物”については、前章と同様に廃棄物の使用量と発生量は0と仮定した。

3.2 LIME2による評価結果

各セメントを使用した場合の橋梁の統合化評価結果をFig. 3に示す。いずれのセメントを用いた場合にも環境への影響としては廃棄物活用による貢献と地球温暖化による負荷が大きいことがわかる。各セメントで比較した場合には、RC40(PC) > RC40(BA) > RC40(BB) > RC40(BC)の順となり、混合材の比率が高いほど、評価値は低い結果となった。これは、混合材の比率が高くなるほど、地球温暖化などからなる環境負荷の合計は低くなる一方、セメントの廃棄物活用を主体とする環境貢献も小さくなっており、合計として後者(環境貢献)の影響が大きかったためである。

橋梁による本統合化評価結果は、セメント自体を評価した既往の研究¹⁰⁾と同様の傾向にあった。一方、統合化評価結果の絶対値に関しては、鉄筋や骨材等の影響により、混合材比率の高いセメントを用いた水準では、0以下の値となり、環境負荷の方が大きい結果となった。

4. 両手法による評価結果の比較

2章で検討した統合化指標(式[10])による評価結果と3章のLIME2で得られた統合化評価結果を比較した結果をFig. 4に示す。統合化指標値の結果とLIME2での統合化評価結果は、高い相関を示すとともに、廃棄物及び温暖化の各環境影響に関しても高い相関を示した。したがって、著者らによって提案した構造物の環境指標⁵⁾は、LIME2の評価結果と整合的な結果を、簡便に得ることができることが示唆された。一方、廃棄物および温暖化の各環境影響に関しては、その値も高い一致を示したことに対し、統合化指標値の合計に関しては、LIME2の評価結果より高い値となることがわかった。この理由として、統合化指標は、セメントやコンクリートの環境影響として、特に影響が大きい、廃棄物と地球温暖化のみを対象としており、LIME2で考慮した資源消費や都市域大気汚染などの他の環境影響(Fig. 3)を考慮しなかったことによる。

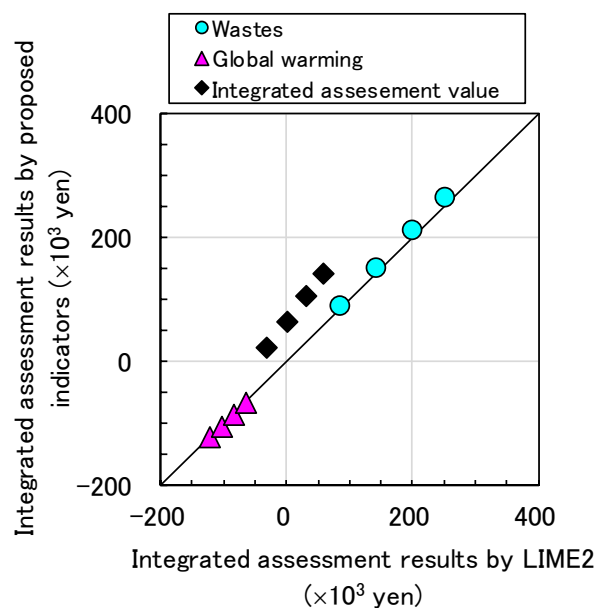


Fig. 4 Relationship between integrated assessment results by LIME2 and proposed indicators (LIME2による統合化評価結果と提案した指標の関係)

5. まとめ

セメントのリサイクル資源活用による環境貢献とCO₂排出による環境負荷の両影響を考慮した、簡便な統合化指標⁵⁾の検証を目的に、セメントの混合材比率を変更した場合の橋梁の評価を行った。また、併せて日本版被害算定型影響評価手法(LIME2)により同一の橋梁の評価を行うとともに、統合化指標で得られた結果とLIME2での結果を比較した。その結果、統合化指標(式[10])およびLIME2のどちらを用いた場合でも、ポルトランドセメント > 高炉セメントA種 > 高炉セメントB種 > 高炉セメントC種の順に大きい結果が得られ、セメントのリサイクル資源活用による環境貢献とCO₂排出等による環境負荷の両影響を考慮した場合、高炉セメントと比較してポルトランドセメントは環境貢献が大きいと評価された。また、統合化指標による評価値は、LIME2による統合化評価値と高い相関を示した。以上より、提案した統合化指標を用いることで、リサイクル資源の活用および活用の困難さとCO₂排出量を考慮した構造物の環境指標が簡便に得られる可能性が示唆された。

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、広島大学の柴崎悠吾氏にも多大な助言を頂いた。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 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. 2015, 69, p. 679-686.
- 2) Global Cement and Concrete Association. GCCA Sustainability Guidelines for co-processing fuels and raw materials in cement manufacturing. 2018.
- 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(コンクリート技術シリーズ, 96). 2011, p. 4-9.
- 4) 久我龍一郎, 平尾 宙, 田中敏嗣, 河合研至. 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. 2014, 68, p. 510-515.
- 5) 桐野裕介, 新見龍男, 星野清一, 河合研至. 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. 2018, 72, p. 352-358.
- 6) 伊坪徳宏, 稲葉 敦. 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.
- 7) 桐野裕介, 河合研至, 平尾 宙, 新見龍男. 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2)廃棄物活用とCO₂排出の統合化手法の検討. 第72回セメント技術大会講演要旨. 2018, p. 130-131(2105).
- 8) LCA日本フォーラム. JLCAデータベース インパクト係数概要:LIME2係数リスト(2013年10月4日版). 2013. <http://lca-forum.org/database/impact/>, (accessed 2019-12-05).
- 9) セメント協会. セメントのLCIデータの概要. 2013.
- 10) 星野清一, 河合研至, 久我龍一郎, 久保田 修, 平尾宙, 上野直樹, 田中敏嗣. セメントのリサイクル資源活用の環境影響評価手法に関する検討, 太平洋セメント研究報告. 2017, 172, p. 3-15.
- 11) 土木学会. コンクリートの環境負荷評価(その2)(コンクリート技術シリーズ, 62). 2004.
- 12) 武者浩透, 田中良弘, 大竹明朗. ダクトルを用いた橋梁建設技術の開発 -ダクトルPC橋梁の計画から施工まで-. 大成建設技術センター報. 2004, 37, p. 22-1 - 22-8.
- 13) ISO 14044:2006. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines.