



Title	建築物のライフサイクル影響評価に関する検討
Author(s)	鈴木, 道哉; 秋元, 孝之
Description	第9回衛生工学シンポジウム (平成13年11月1日 (木) -2日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 1 建築環境とエネルギー利用 . 1-1
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 9, 1-6
Issue Date	2001-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7133
Type	departmental bulletin paper
File Information	9-1-1_p1-6.pdf



1-1 建築物のライフサイクル影響評価に関する検討

鈴木道哉（清水建設），秋元孝之（関東学院大学）

1. はじめに

建築物が、その部材製造までも含めて建設、運用、解体に至る生涯での環境負荷は莫大であり、今後、持続可能な社会の構築のためには、この環境負荷の低減が求められる。建築物のライフサイクルアセスメント¹⁾（LCA）に関しては、現在、エネルギー消費量や二酸化炭素排出量、NO_x、SO_xなどの大気環境に対する負荷のライフサイクルインベントリ分析²⁾（LCI）が主体に行われている。しかしながら建築物の生涯の環境負荷を考える場合、水圏への汚染物質の排出、固体廃棄物の排出、さらには希少資源の消費などの検討も必要と考えられる。さらに、LCAでは、LCIを行った後、ライフサイクル影響評価³⁾（LCIA）を実施し、最終的には、LCAの目的に添った結果の解釈を行わなければならない。LCIAとは、インベントリ分析の結果を受けて、潜在的な環境への影響度を評価するものであり、分類化、特性化、統合化（正規化、重み付けを含む）に分類される。ISO14042³⁾では構成要素は必須要素と付加的要素に区分されている。必須要素は、LCIの結果から分類化、特性化が含まれる。正規化、重み付けは付加的要素として扱われている。

統合指標を導くための重み付けの方法^{4),5)}は、大別して、環境負荷を着眼点とするか、あるいは環境影響を元に考えるかに分けられる。さらに手法として、代用指標を用いる方法、代替法（環境負荷の除去技術を貨幣価値に変換するなど）、あるいは目標値を用いる方法、パネルによる方法などが挙げられる。パネルによる方法とは、その地域などの社会が重要と考えている各インパクトカテゴリーの重要度をアンケート調査などによって決定する方法であり、日本では、永田ら⁶⁾によるアンケート調査が知られている。アンケートや専門家のパネルにより重要度を決定する方法であるため誰を対象とするかにより結果が異なる場合があり得るが、この反面、対象者の意見を反映する結果が得やすいなどの特徴がある。本研究では、建物のLCIAにおける住民の意識を反映させた統合化手法開発のために、アンケート調査による重要度決定の方法を採用し、建設関連の会社員、学生に対してアンケート調査を実施した。その結果から異種の環境負荷項目に対する指標統合の段階で用いるカテゴリー重要度を推定するとともに、個別項目に関する意識を調査した。さらに、鉄筋コンクリート造の集合住宅を想定したLCAを試行することにより、重み付け係数を用いたライフサイクル影響評価の建物への適用可能性の検討を行った。

2. アンケート調査概要

アンケート調査の対象の内訳は、総合建設業、設計事務所、不動産管理業の企業内の建設、設計部門や不動産部門、又は地球環境関連部門の従業員、および大学の建築または環境関連の学科の学部生（4年生）と大学院生であった。アンケートは各社、各学科／研究室の代表者あるいは窓口へ送付して内部で無作為に対象者を抽出して記入してもらった。

調査の目的は、カテゴリー間の重要度を求める事であるが、合わせて、下記のアンケート手法でよく使われる順位法、配分法、階層法（AHP：Analytic Hierarchy Process法）の差異がどの程度生じるかの比較も目的の一つである。このため、地球環境関連の知識がない回答者の場合には、基礎的な解説が必要となり、このためアンケートが数ページに渡り、回答時間も長くなるため、基礎的な解説の記述を可能な限り控

えて、アンケートのページ数を少なくし、回答率が低くならないよう、建物及び環境関連の基礎的知識があると考えられる調査対象（企業の部署、大学の学科）を本報告では選んだ。アンケート回答形式は、以下の3通りとした。なお、配布部数は188部で有効回答は122部であった。

順位法：9つのインパクトカテゴリーについて重要と考える順番に順位付けを行う。1位9点、2位8点、…9位1点と配点をする。本方式は、個々の回答者は順位のみを付けるため、順位間の差については考慮できないが、最も回答が容易と考えられる。

配分法：合計点100点を9つのインパクトカテゴリーに振り分ける。本方式では合計100点に割り付ける事が必要のため、回答者のエラーで合計値が100点にならないなど有効回答率が下がってしまう場合が考えられる。

階層法：2つのカテゴリーを比較して重要度を記入する。例えば、尺度9：Aの方がBに比べてきわめて重要、尺度1/9：Bの方がAに比べてきわめて重要。本方式は一対比較を行うため、回答者が回答に矛盾が生じないように留意しないと結果が妥当性を欠く場合がある。

3. カテゴリー重要度の推定

表1にアンケート結果より算出したカテゴリー重要度を示す。順位法、配分法、階層法の3種類によるカテゴリー重要度について、それぞれの合計が1となるように割り振って示した。図1にアンケート対象の違いによる比較(階層法)を示す。アンケート対象に関わらず、地球温暖化、オゾン層破壊、大気汚染の重要度が高かった。資源の消費、酸性雨は低重要度の結果となった。総合建設業A,B,Cと学生は類似の傾向を示した。不動産管理業Dは、生態系への影響を最も重要視している。また、設計事務所Eは、エネルギー枯渇や廃棄物処理問題を重要視している。アンケートによる環境意識調査は、対象者により結果が異なることが予想されるため、その扱いには深慮が必要である。

4. 考慮すべき項目

各インパクトカテゴリーに関して、関連する個別の項目で考慮すべきと考える項目に関してもアンケート調査を行った(複数回答可)。結果を図2～図10に示す。

表1 カテゴリー重要度

	全 体 総合建設業 A, B, C					
	順位法	配分法	階層法	順位法	配分法	階層法
エネルギー	0.092	0.095	0.077	0.084	0.092	0.075
温暖化	0.142	0.155	0.148	0.142	0.162	0.154
オゾン層	0.139	0.144	0.157	0.132	0.134	0.158
酸性雨	0.086	0.078	0.079	0.097	0.089	0.091
資源	0.059	0.057	0.051	0.053	0.059	0.045
大気	0.135	0.132	0.140	0.136	0.126	0.144
水質	0.119	0.110	0.115	0.125	0.112	0.111
廃棄物	0.106	0.104	0.106	0.098	0.092	0.089
生態系	0.122	0.124	0.126	0.134	0.136	0.133

	不動産管理業 D			設計事務所 E		
	順位法	配分法	階層法	順位法	配分法	階層法
エネルギー	0.091	0.094	0.072	0.119	0.125	0.167
温暖化	0.149	0.170	0.168	0.141	0.132	0.112
オゾン層	0.144	0.145	0.147	0.107	0.088	0.082
酸性雨	0.075	0.064	0.069	0.095	0.102	0.082
資源	0.068	0.077	0.069	0.051	0.030	0.043
大気	0.096	0.088	0.078	0.127	0.133	0.112
水質	0.096	0.089	0.087	0.121	0.131	0.115
廃棄物	0.126	0.132	0.124	0.131	0.164	0.175
生態系	0.156	0.142	0.186	0.107	0.095	0.112

	企業全体			学生全体		
	順位法	配分法	階層法	順位法	配分法	階層法
エネルギー	0.091	0.097	0.087	0.092	0.084	0.069
温暖化	0.143	0.159	0.151	0.141	0.154	0.143
オゾン層	0.130	0.129	0.142	0.149	0.161	0.173
酸性雨	0.092	0.086	0.087	0.081	0.072	0.072
資源	0.056	0.058	0.050	0.062	0.053	0.052
大気	0.126	0.119	0.125	0.144	0.147	0.157
水質	0.118	0.110	0.108	0.119	0.112	0.121
廃棄物	0.109	0.111	0.109	0.102	0.098	0.102
生態系	0.134	0.130	0.141	0.109	0.120	0.113

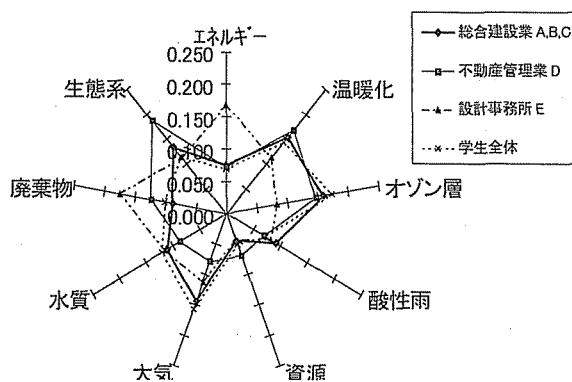


図1 アンケート対象による比較(階層法)

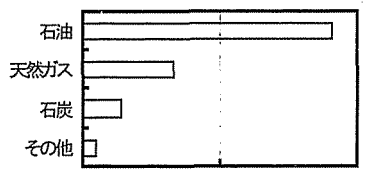


図2 エネルギー枯渇 (%)

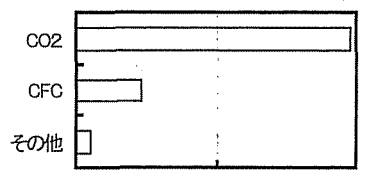


図3 地球温暖化 (%)

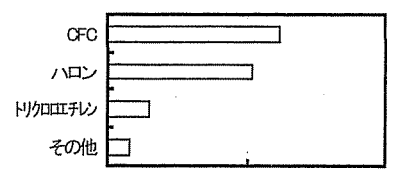


図4 オゾン層破壊 (%)

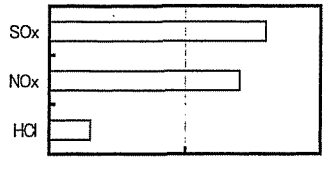


図5 酸性雨 (%)

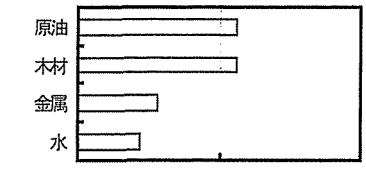


図6 希少資源の消費 (%)

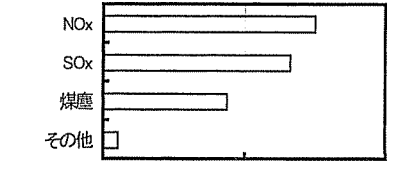


図7 大気汚染 (%)

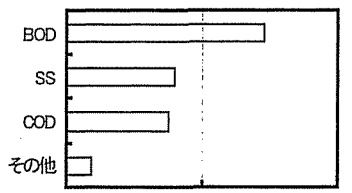


図8 海洋・水質汚染 (%)

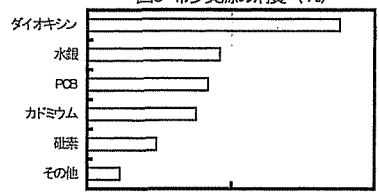


図9 生態系への影響 (%)

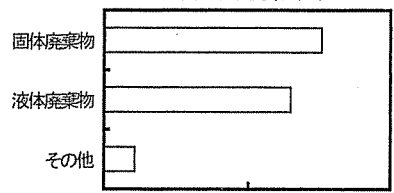


図10 廃棄物処理問題 (%)

表2 日本全体で排出される環境負荷

カテゴリー	代表指標	総排出量	文献
エネルギー	一次エネルギー	$15.03 \times 10^{18} \text{ J}$	7)
温暖化	CO ₂	$332.8 \times 10^9 \text{ t}$	8)
酸性雨	SO _x	$876 \times 10^3 \text{ t}$	9)
大気汚染	NO _x	$1.476 \times 10^6 \text{ t}$	10)
資源(希少資源)	metals	$3.70 \times 10^6 \text{ t}$	9)
水質	COD	$930 \times 10^3 \text{ t}$	11)
廃棄物	廃棄物量	$444.69 \times 10^6 \text{ t}$	12)

表3 運用段階のエネルギー消費量と価格への変換

負荷 種別	負荷原単位	価格に変換した値	備 考	
電力負荷	21 kWh/m ² ・年	¥410/m ² ・年	¥19.5/kWh(フラットレート)を仮定して価格に変換	
熱負荷	給湯負荷	125.6MJ/m ² ・年	¥393/m ² ・年	ガスとして¥118/m ³ (13A)を用いて価格に変換
	暖房負荷	87.9MJ/m ² ・年	¥262/m ² ・年	ガスとして¥118/m ³ (13A)を用いて価格に変換
	冷房負荷	33.5MJ/m ² ・年	¥73/m ² ・年	¥19.5/kWh,COP 2.5を仮定して価格に変換

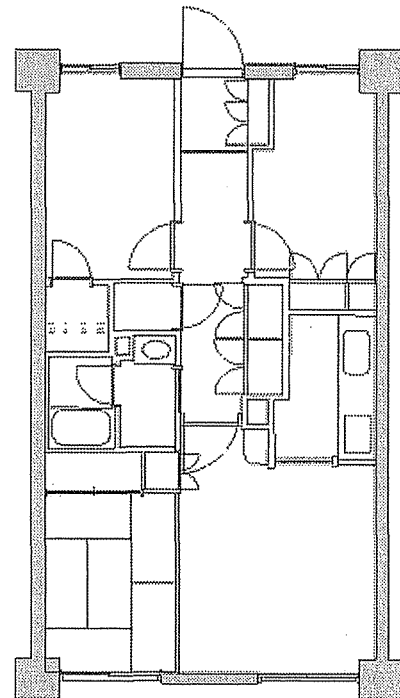


図11 対象とした集合住宅の住戸プラン (ファミリータイプ)

アンケート結果よりエネルギー枯渇では石油、地球温暖化ではCO₂、オゾン層破壊ではCFC・ハロン、酸性雨ではSO_x・NO_x、希少性資源の消費では原油・木材、大気汚染ではSO_x・NO_x、海洋・水質汚染ではBOD、生態系への影響ではダイオキシン、廃棄物処理問題では固形廃棄物・液状廃棄物が高い値を示した。

5. インパクトカテゴリーの選定

エネルギー、温暖化、オゾン層、酸性雨、資源、大気汚染、水質、廃棄物、生態系の9カテゴリーの重要度の中から、インベントリデータの入手の容易性などを考慮に入れ、7カテゴリーに絞ってLCAを実施した。詳細なLCAには、各カテゴリーに含まれるそれぞれの環境負荷のインベントリを求め、特性化係数(例えば、オゾン層破壊のカテゴリーでは、オゾン破壊係数が頻繁に用いられる。)でカテゴリー値が決められる。しかしながら、本研究では、予備的LCAとして、データ入手の容易性などから各カテゴリーの環境負荷物質は1種類とした。各カテゴリーのそれぞれの代表環境負荷は、以下のように定義した。エネルギーに関してはすべてのエネルギー源を考慮に入れた1次エネルギーとした。地球温暖化ではアンケート結果からの重要度よりCO₂を代表環境負荷とした。酸性雨ではSO_x、希少資源ではデータの入手容易さを考慮して金属を選び、大気汚染ではNO_x、水質汚染ではCODを選んだ。尚、便宜上、金属については非鉄金属のなかで国内需要量の大きいアルミニウム及び銅のみを本試算では扱うこととした。また、CODは東京湾、伊勢湾、瀬戸内海で発生するCOD負荷¹¹⁾を用いて、その人口カバー率から推定される日本全体の値とした。廃棄物については年間の一般廃棄物と産業廃棄物の排出量を合計した値¹²⁾とした。各指標の日本での総排出量(需要量)を表2に示す。

6. 評価対象とインベントリ計算

評価対象建物は、東京都に建設される延床面積6,700m²のファミリータイプ(60戸)とワンルームタイプ(55戸)の混在型の5階建RC造集合住宅とした。ファミリータイプの代表的な住戸プランを図11に示す。運用時のインベントリ計算では、文献¹⁴⁾より冷暖房・照明・給湯に関わるエネルギー量を参照して、表3に示すように電力、ガスの単価を仮定することにより、金

表4 集合住宅の単位面積当りの主要物量

項目	仕様	数量	単位
構造			
コンクリート	普通コンクリート	4,907	m ³
型枠	合板型枠	29,615	m ²
鉄筋	鉄筋	669	t
鉄骨	雑鉄骨	80	t
建築			
陸屋根平部	押えコンクリート	1,180	m ²
	押発泡ポリスチレンボード	1,180	m ²
	アスファルト防水層	1,180	m ²
外壁	磁器質二丁掛タイル	2,236	m ²
外壁雑	スチールア	126	箇所
ガラス	アルミアルマイト	1,131	m ²
ガラス	複層ガラス	1,131	m ²
開口部雑	スチール窓枠	1,508	m
バルコニー・外廊下	ウルタンノスリッパ塗り床	480	m ²
	磁器質二丁掛タイル張り	355	m ²
	アクリル系吹き付けタイル	1,007	m ²
	段鼻タイル	90	m ²
住戸内装	カーペット	3,921	m ²
	長尺塩ビシート	269	m ²
	スタロ畳	1,013	m ²
	ビニルクロス	24,532	m ²
	磁器質タイル	408	m ²
	外壁側断熱発泡ウレタン	2,859	m ²
住戸: 造作	押し入れ	126	箇所
	物入れ	504	箇所
住戸: 建具	室内ドア	756	箇所
	障子 無地	403	m ²
住戸: 雑	下駄箱: 突板塗装	126	箇所
	洗面台: 既製品	126	箇所
	洗濯防水パン	126	箇所
	ユニットバス: 床壁タイル	126	箇所
	キッチンセット	126	箇所
エントランス	磁器質タイル張り床	91	m ²
	磁器質タイル張り壁	74	m ²
エレベーター	エレベーター	42,000	千円
施工			
杭工事	既成杭施工	750	m
土工事	掘削(コンボ)	1,000	m ³
土工事	掘削(クラムシェル)	1,000	m ³
土工事	掘削(フルドーザー)	1,000	m ³
土工事	残土搬出(10t車)	1,000	m ³
躯体・仕上工事	外部足場運搬(10t車)	75	t
躯体・仕上工事	揚重機(クレーン)	241	台日
解体			
解体機械	圧砕機	8	台日
解体機械	ジャイアントブレイカー	8	台日
解体機械	コンボ	8	台日
解体機械	フルドーザー	8	台日
車両	コンクリートガラ運搬(10t車)	892	m ³
車両	その他運搬(10t車)	291	t
衛生			
給水管	塩ビライニング鋼管	17,358	kg
	ナイロコテイング鋼管	2,214	kg
加圧給水	加圧給水ポンプユニット	500	l/min
汚水ポンプ	汚水ポンプ	500	l/min
衛生陶器	洗落+ロータンク	128	箇所
排水・通気	塩ビライニング鋼管	29,865	kg
	硬質塩化ビニル管	5,743	kg
	ナイロコテイング鋼管	1,562	kg
ガス管	SGP	21,350	kg
給湯設備	塩ビライニング鋼管	8,051	kg
瞬間湯沸器	瞬間湯沸器(20号)	126	個
機械設備			
ファンシステム(天吊)	シロコファン:160m ³ /h	126	個
ファンシステム(天吊)	シロコファン:200m ³ /h	126	個
ファンシステム(天吊)	シロコファン:400m ³ /h	126	個
換気ファン	換気ファン	38,490	m ³ /h
スパイラルダ外	スパイラルダ外	9,961	kg
二重管	二重管	4,431	kg
電気			
電灯コンセント設備	設備容量	4	kVA/戸
照明器具設備	照明器具台数	4	個/戸
電話配管設備	アウトレット個数	1	個/戸
テレビ共聴設備	アウトレット個数	2	個/戸
インターホン設備	機器個数	1	個/戸
自動火災報知設備	感知器個数	150	個
避雷設備	接地箇所数	6	箇所

額に置き換え、前述の原単位を用いてインベントリ計算を行った。また建物の建設・解体に関わる主要物量の数量を表4に示す。表4の建設時の各部材物量と各環境負荷原単位¹³⁾を乗じて、建設時の環境負荷を計算した。この際、前述の原単位の代表値を用いたが、金属に関しては、上方推定値のみしか与えられていないため、これを用いた。廃棄物については、建設時の廃棄物¹¹⁾、1戸当り3.85人を想定した運用時一般廃棄物¹²⁾と解体時における一部の鉄とコンクリートのリサイクルを見込んだものである。LCI計算結果を表5に示す。

7. ライフサイクル影響評価の試行

順位法、配分法、階層法のそれぞれにインパクトカテゴリー間の重要度を求めたが、前述の如く、3法による結果の差異は小さかった。従って今後、このようにアンケート手法を用いて重み付け係数を導くためには、アンケート回答者が最も回答しやすい順位法が望ましいと考えられる。従って、本報では、順位法でのカテゴリー重要度を用いた。ただし表1の値は9カテゴリーでの重要度であるため、7カテゴリーに割り戻して、合計が1になるように係数を変換した(表6参照)。重要度の中で地球温暖化が一番大きく続いて大気汚染、水質汚染、廃棄物の順となっている。

本研究では、重要度をLCIの結果に対して適用し、LCIAを行う前に各カテゴリーの重要度を考慮しない場合(便宜的に各カテゴリーの係数をそれぞれ $1/7 \approx 0.143$ とした場合)のライフサイクル影響評価を行った(図12参照)。この際、前述の各カテゴリーの代表環境負荷を日本での総排出量(総需要量)で除して求めた無次元化した数値を用いた。言い換えると日本全体の排出量に対して試算対象の建物がライフサイクルでどの程度の割合になっているかを計算したことになる。

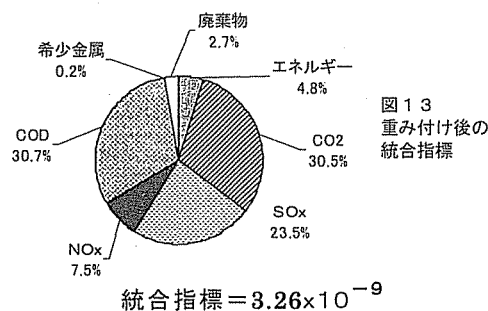
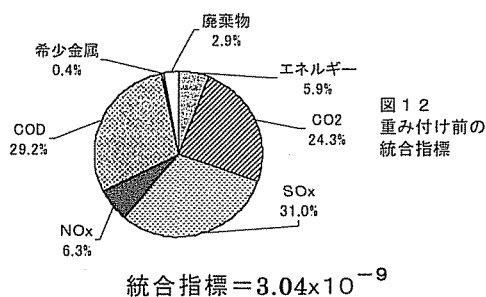
円グラフは各カテゴリーの統合指標への寄与度を示しており、重要度を考慮しない(重み付け前) 場合ではCO₂が全体の24.3%を占めているが、重要度を考慮した(重み付け後) ケース(図13参照) では更にCO₂の比率が大きくなってきている。これとは逆に、SO_xの占める割合は31%から23.5%に減少している。従って、重要度を考慮しない場合では酸性雨のカテゴリーの代表指標であるSO_xが最も割合として大きかったが、重要度を考慮すると地球温暖化の代表指標としたCO₂の比率が最も大きくなった。円グラフ近傍の数

表5 ライフサイクルインベントリ結果

		エネルギー	CO ₂	SO _x	NO _x	COD	希少金属	廃棄物
		MJ/m ²	kg/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	kg/m ²
建設	建築	6701.4	679.6	2179.7	718.5	3389.66	123.2	22.0
	機械設備	1177.4	97.4	481.4	111.5	728.1	80.8	
	電気設備	162.3	12.5	73.9	14.1	81.3	4.3	
	施工	397.2	33.2	150.3	38.1	179.3	10.6	
運用(60年計)		14184.7	1187.0	3768.8	1495.3	1374.4	68.8	26.7
解体		77.5	6.0	33.6	7.2	36.5	1.7	223.2
合計		15999.1	1336.1	4508.0	1666.2	2397.0	166.2	249.8

表6 使用した重み係数(割り戻した値)

	9カテゴリーでの重み係数	割り戻した重み係数
エネルギー	0.092	0.124
温暖化	0.142	0.192
酸性雨	0.086	0.116
大気汚染	0.135	0.183
水質	0.119	0.161
希少資源	0.059	0.080
廃棄物	0.106	0.143
計	0.739	1.000



値はインパクトアセスメント結果の統合指標を示している。考慮しない場合には 3.04×10^{-9} に対して考慮した場合には 3.26×10^{-9} と指標の値が変化している。

このほか、運用段階でエネルギー消費量を50%削減したと仮定した省エネルギーケースの試算を行っている（図14参照）が、この場合の統合指標計算値は 2.58×10^{-9} となり、全体への影響（統合指標の低減率）は21%であった。

8. まとめ

本報では、パネル法によるLCIAの統合化手法開発のために、アンケート調査を実施し、これにより、カテゴリー重要度（重み付け係数）を推定し、また個別項目に関する意識を調査した。アンケートの回答形式間での大きな差異は見られず、既往の研究と同様の結果を確認できた。

さらに予備的LCAとして、LCIとカテゴリー重要度を考慮した統合化を含むLCIAを試行し、統合指標を算出した。統合指標は、カテゴリー重要度を考慮した場合と考慮しない場合とで明確な差異が確認され、地球温暖化の代表指標としたCO₂の比率が最も大きくなった。また省エネルギーケースの場合、環境負荷が減少することにより統合指標は減少する事などが確認できた。これらの事より、建物への本手法適用の可能性が示されたと考えられる。

しかしながら、環境影響に関するカテゴリーが7種と少ないこと、各カテゴリーを一つの環境負荷で代表させていることなど、まだ改善の余地が残されていると考えられる。

アンケートによるパネル法は、調査対象の総意を反映させやすいことがメリットとして挙げられるものの、反面、調査対象により、結果が異なることがあるため、アンケートを行う際には留意が必要である。アンケート対象の相違による感度分析は、今後の課題として考えられる最も重要なものの一つである。

また、各カテゴリーで算出された値を本検討では、日本の総排出量（総需要量）で除して無次元化した数値を用いて各カテゴリーの代表値として扱い、これに重み付け係数を乗じて統合化指標を導く方法を採用している。しかし、現在、様々な評価の方法が提案されており、これらの評価方法の適切な使い分けなども今後の課題といえる。さらに、信頼性を具備したデータベースの開発が待ち望まれる。

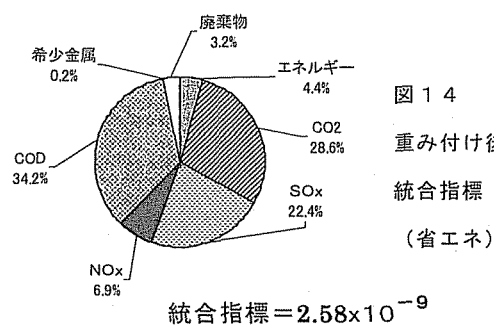


図 14
重み付け後の
統合指標
(省エネ)

(注)本論文は、文献(15)、(16)に新たな内容を加え、再編集したものである。

[参考文献]

- 1) JIS Q 14040 環境マネジメント—ライフサイクルアセスメント—原則及び枠組み,平成9年11月20日,財団法人日本規格協会
- 2) JIS Q 14041 環境マネジメント—ライフサイクルアセスメント—目的及び調査範囲の設定並びにインベントリ分析,平成11年11月20日,財団法人日本規格協会
- 3) ISO 14042 Environmental management —Life cycle assessment —Life cycle impact assessment 2000-03-01
- 4) 松野泰也ら,日本におけるインパクトアセスメント統合指標の開発,日本エネルギー学会誌,第77巻第12号,1998年
- 5) 稲葉敦ら,ライフサイクルアセスメント(LCA)の最近の動向,日本エネルギー学会誌,第77巻第10号,1998年
- 6) 永田勝也ら,LCAにおけるインパクトアセスメント手法の開発(その1~6),日本機会学会第5~7回環境工学総合シンポジウム'95~'97講演論文集,1995年~1997年
- 7) 総合エネルギー統計,1999年3月,通商産業研究社
- 8) 週刊エネルギーと環境,1998.10.22, No1519, エネルギージャーナル社
- 9) 地理統計要覧,1999, Vol.39, 二宮書店
- 10) 1995年産業連関表(物量表),平成11年5月,総務庁
- 11) 環境白書,平成11年版,環境庁編
- 12) 環境白書,平成12年版,環境庁編
- 13) LCA実務入門,1998年8月,(社)産業環境管理協会
- 14) 省エネルギーハンドブック,平成10年4月,IBEC
- 15) 秋元孝之、鈴木道哉,建物のライフサイクルアセスメント手法に関する検討(1,2),日本建築学会大会学術講演梗概集,2000年9月
- 16) 秋元孝之、鈴木道哉,建物のライフサイクルインパクトアセスメント手法に関する検討,第4回エコバランス国際会議梗概集,2000年10月