

1. はじめに

第1回では、コンクリートのライフサイクルが自然環境に対してどのような影響を及ぼしているのかについて概説しました。第2回では、コンクリートのライフサイクルが自然環境に対して及ぼす影響をどのように数値化し、数値化されたものをどのように評価すればよいのかについて概説していきます。

2. ライフサイクルアセスメント (LCA)

2.1 LCAの概要

自然環境に対して及ぼされる影響を評価する最も一般的な方法は、ライフサイクルアセスメント (LCA) です。LCAはISO規格やJIS規格として規準化されています^{1),2)}。ただし、個別の具体的な内容には、あまり立ち入っていません。LCAの枠組みや手順などの原則を規定しています。なお、ISOやJISにおけるLCAの対象は製品・サービスであり、これらは比較的耐用年数が短く、大量生産・大量消費され、LCAの結果を次の製品の開発やマーケティングにフィードバックさせるような形となっています。換言すれば、どちらかといえば一品生産で、供用期間が長期にわたるようなコンクリート構造物に適した手法となっていない可能性があります。

LCAは文字通り、製品・サービスの一生涯に関わる環境影響を評価する手法です。したがって、製品の廃棄後の回収や再利用までを対象とします。その意味で、建設時に解体方法や再利用方法などの決定が困難なコンクリート構造物では、LCAをそのまま活用することは現実的には難しい側面があります。

2.2 LCAの歴史

LCA的な考え方をういた研究は、1969年にアメリカのコカ・コーラ社が、自社のリターナブル瓶を対象としてミッドウエスト研究所へ委託したのがその始まりといわれています³⁾。リターナブル瓶とは、ガラス瓶に入ったコカ・コーラを飲んだ後、お店にガラス瓶を返却すれば、瓶代が返却され、瓶は洗浄されて再利用されるとい

うものです。

それ以降、1980年代から1990年代にかけて、LCAの手法は、アメリカ、ヨーロッパを中心として発展してきました。国内においてLCAが本格化してきたのは、1995年に産学官の約250組織が参加してLCA日本フォーラムが設立されてからです。その後、環境問題への意識の高まりも相まって、急速にLCA手法の開発が進められてきました。

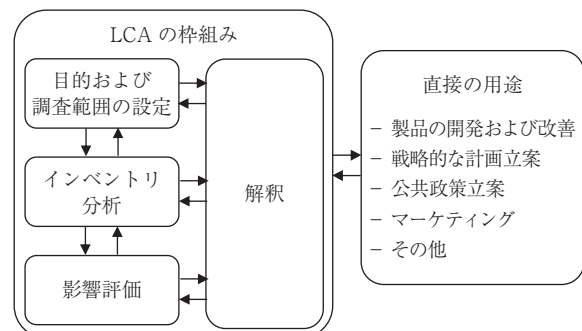
2.3 LCAの主な実施手順

ISOやJISで示されているLCAの段階は、図-1のとおりです。まず、「目的および調査範囲の設定」(Goal and scope definition)を行い、続いて「インベントリ分析」(Inventory analysis)を行います。そして、「影響評価」(Impact assessment)を行い、「解釈」(Interpretation)を行います。以降では、このそれぞれについて概説します。

(1) 目的および調査範囲の設定

目的および調査範囲の設定とは、文字通り、何の目的をもってLCAを行おうとしているのか、どの範囲を対象としてLCAを行おうとしているのかを明らかとしておくことを指します。極めて当たり前のように思われますが、この目的および調査範囲の設定が、LCAにとっては非常に重要なこととなります。

例えば、何が知りたくてLCAを行おうとしているのか—コンクリート構造物の建造によって天然資源をどれだけ消費することになるのかが知りたいのか、CO₂をどれだけ排出することになるのかが知りたいのか、あるいは廃棄物がどれだけ発生してしまうのかが知りたいのか—

図-1 LCAの段階²⁾

* かわい・けんじ／広島大学 大学院工学研究院 社会環境空間部門 教授（正会員）

といった内容を指します。場合によっては、知りたいのはCO₂の排出量やSO_xの排出量ではなく、どれだけ地球温暖化に寄与してしまうのかや、どれだけ酸性化に寄与してしまうのかかもしれません。また、さらに進んで、我々の健康にどれだけの被害を及ぼすことになるのかもかもしれません。これらの目的をまず最初に明らかとしてくださいということです。

続いて、調査範囲を設定しますが、これもLCAにとっては非常に重要なことです。例えば、輸入品であれば、原産地での採掘から輸送、国内流通を含めて考えるのか、国内へ輸入された段階から考えるのかによって、結果は大きく変化する可能性がありますし、比較対象の材料や製品によって、考慮する範囲が異なるようで、公平な評価を行うことができません。そのため、この調査範囲の設定は非常に重要なのですが、場合によっては容易に設定ができるものでもありません。例えば、第1回のときに、様々なCO₂排出原単位が示されているとした鋼材を、調査範囲の設定が困難なもの例として挙げるすることができます。CO₂排出量を転炉鋼の場合には高炉、転炉の工程のみを考えて算出するのか、電炉鋼も合わせて鋼材すべての生産やスクラップ回収を含めて算出するのかによって、算出される値が全く異なってくるということがお分かりいただけるかと思えます。どこまでを調査範囲とするのか、その境界をシステム境界(System boundary)と呼んでいます。このシステム境界の設定

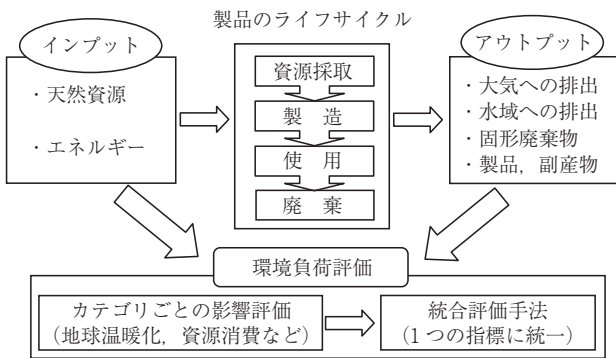


図-2 LCA手法の概要

が明確となっているか否かが、LCAの結果に妥当性があり合理的なものにするかを左右するといっても過言ではないと思います。

(2) インベントリ分析

「インベントリ」とは、英語で「目録」を意味します。図-2に示すように、LCAを行うためには、ある製品のライフサイクルで、どのような天然資源やエネルギーが投入（インプット）され、どのような物質が排出（アウトプット）されるのかを明らかとする必要がありますが、このインプットとアウトプットの項目を取りまとめた入出力明細表、すなわち目録をインベントリと呼んでいます。インベントリ分析とは、この入出力明細表を作成することを指します。

インベントリデータの収集方法には、大きく分けて、積上げ法と産業連関分析法という2つの方法があります。積上げ法は、製品の製造工程を廃棄に至るまで、逐次、具体的に調査していく方法で、インベントリの作成根拠は明確ですが、煩雑で調査できる範囲に限界があります。産業連関分析法は、国内において1年間における財・サービスの部門間取引を金額単位で一つの行列に示した産業連関表と呼ばれる表を利用する方法で、その表の部門分類（約400部門）に従って、各種統計量から各部門における環境負荷の排出量を算出していきます。直接・間接のインベントリを理論的に算出できる利点がありますが、部門分類が粗いため部門の平均財についての評価にとどまり、詳細分析が困難とされます。表-1は、積上げ法と産業連関分析法により求められたCO₂排出原単位の一例を示します。両者で算出方法が異なりますから、得られた数値が異なっていますが、いずれが正しいかというのは一概には言えません。重要な点は、環境負荷評価を行う際に、算出根拠の異なる両者を混用しないことです。

(3) 影響評価

影響評価とは、上述したインベントリ分析の結果が、具体的には環境に対してどのような影響をどの程度及ぼすことになるのかを評価することをいいます。例えば、

表-1 CO₂排出原単位の比較

| | 積上げ法による算出 | CO ₂ 原単位 (kg-CO ₂ /単位量) | 産業連関法による算出 | CO ₂ 原単位 (kg-CO ₂ /単位量) |
|----|------------|---|------------------|---|
| 材料 | ポルトランドセメント | 757.9 | ポルトランドセメント | 836 |
| | 高炉セメントB種 | 458.7 | 高炉スラグ45%混入高炉セメント | 495 |
| | 天然粗骨材 | 2.8 | 砂利・採石 | 5.65 |
| | 天然細骨材 | 3.5 | 砂利・採石 | 5.65 |
| | 形鋼 | 1250 | 高炉製熱間圧延鋼材 | 1507 |
| 燃料 | LPG | 2.687 | LPG | 3.183 |
| | 軽油 | 2.823 | 軽油 | 2.856 |
| | LNG | 3.318 | LNG | 2.453 |
| | 購入電力 | 0.371 | 電力 | 0.473 |
| 輸送 | 10tトラック | 0.076 | 運輸 | 0.341 |

第1回のところで、COP3に規定する温室効果ガスとして、二酸化炭素(CO₂)以外に、メタン(CH₄)、一酸化二窒素(N₂O)、ハイドロフルオロカーボン類(HFCs)、パーフルオロカーボン類(PFCs)、六ふっ化硫黄(SF₆)があることを述べました。インベントリ分析の結果で、これらのそれぞれの排出量が分かったとすると、それらのインベントリは地球温暖化に影響を及ぼすものとして分類し(分類化)、それぞれの温室効果ガスの温室効果の程度を考慮して足し合わせることによって(特性化)、地球温暖化に対してどの程度の影響を及ぼすのかといった数値を算出することができます。ここでの地球温暖化は、どのような環境影響を及ぼすのかという影響の分類を示すもので、影響領域(Impact category)と呼ばれます。酸性化、オゾン層破壊、富栄養化などがこれに属します。

また、地球温暖化にはどの程度の影響を及ぼす、酸性化にはどの程度の影響を及ぼす、オゾン層破壊には……と、それぞれの影響領域に対する影響の程度を数値で表せたとしても、では、全体としては環境にどれくらいの影響を及ぼしているのかということとは分かりません。個々の影響領域が全体の環境に及ぼす寄与度を相対的に定め(正規化)、それらを類型化することをグルーピングと呼んでいます。さらに、これに重み付けを行って、単一指標化することを統合化と呼んでいます。

やや難しい話となりましたが、ISOやJISにおけるLCAでは、上記の分類化と特性化までを必須要素として必ず実施する段階としており、正規化、グルーピング、

統合化は任意要素として行うか否かを目的に応じて実施者が決める段階としています。

上記のインベントリ分析から統合化までの流れを、具体的にLIMEを例として図-3に示します。LIMEとは、LCA日本フォーラムと連携し、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が開発した統合化手法で、日本版被害算定型影響評価手法(Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling)の略称です。このLIMEは、

- ①評価結果を単一指標(無次元あるいは金額)で表示できる
- ②自然科学的知見を取り入れている
- ③日本のバックグラウンドデータに基づき開発されている
- ④評価対象物質が多い
- ⑤外部費用を算出でき、環境会計やフルコスト評価などに応用が可能である

といった特徴を有しています。

なお、ここで留意いただきたいのは、図-3に示されるインベントリやインパクトカテゴリ(影響領域)の分類は、あくまでもLIMEで対象とするインベントリ、LIMEで採用されたインパクトカテゴリであるということです。このような統合化について、世界共通の方法は今のところありません。それぞれの国で、あるいは様々な研究機関等で、各国の事情や研究機関等の目的に応じて、独自の統合化手法が開発されています。

(4) 解釈

LCAの最終段階である解釈では、目的と調査範囲の

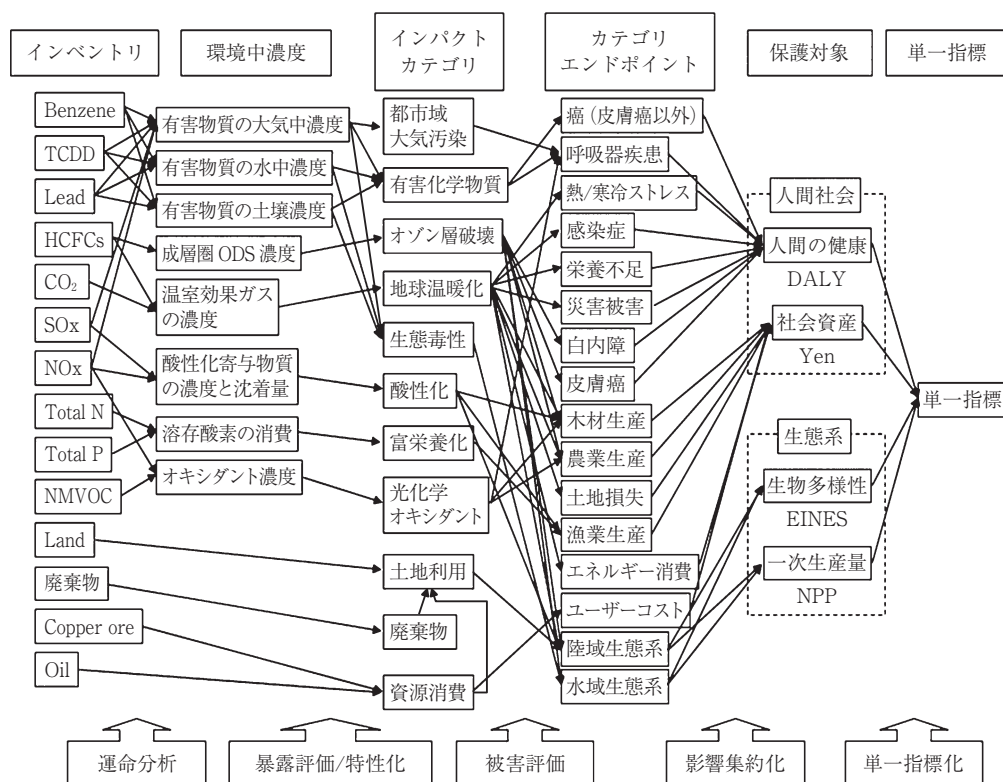


図-3 LIMEによる統合化例⁴⁾

設定に従って、インベントリ分析や影響評価の結果から重要な環境問題の特定が行われ、最終的な結論や提言が示されることとなります。

2.4 LCI

前節で概説しましたように、ISO や JIS で規定する LCA では、インベントリ分析を行った上で特性化を行い、影響領域までの評価を行うことが必須となっていますので、単に CO₂ 排出量を算出したとか、天然資源消費量を算出したといった、インベントリ分析までの実施は、厳密には LCA を実施したとはみなされません。ただし、環境に対する影響の評価を行う目的そのものが、例えば CO₂ 排出量を求めることであれば、それは CO₂ 排出量を算出し結果の評価を行うことで、本来の目的は十分に達成しているものであり、否定されるものではありません。

LCA におけるインベントリ分析の段階を実施することを LCI (Life Cycle Inventory) と呼んでいます。また、LCA における影響評価の段階を実施することを LCIA (Life Cycle Impact Assessment) と呼んでいます。両者は非常に紛らわしい略称ですが、まったく異なる行為を示しています。

コンクリートのライフサイクルが自然環境に対して及ぼす影響はどれくらいなのかを、まず簡易に行う場合には、LCI の実施が妥当かもしれません。また、先述のとおり、LCI の実施で環境影響の評価を行う目的が十分に達成されることも少なくないと思われます。いずれが好ましいのか、いずれの方法が妥当であるのかは、前節における目的と調査範囲の設定のところを明確化することで、おのずと決まってくるものとなるでしょう。

LCI の実施では、調査範囲を網羅するインベントリデータの収集が不可避となります。インベントリデータの一例は、文献 5)～8) などが参考となります。ただし、これらでコンクリートに関連するインベントリデータがすべて網羅されているわけではありません。インベントリデータの充実は、今後の大きな課題です。

3. CASBEE

CASBEE (キャスビー) は、近年、建築物の環境性能評価に広く用いられつつあるツールで、建築環境総合性能評価システム (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency) の略称です。2001 年 4 月から国土交通省住宅局の支援のもと産官学共同プロジェクトとして開発され、現在では、CASBEE 新築、CASBEE 戸建、CASBEE まちづくり、CASBEE 都市など、対象に応じた様々な評価ツールが用意され、また、現在も開発が進められています。さらに、自治体版 CASBEE を導入して、事業の届出に CASBEE 評価を義務付ける自治体が増えていきます。

CASBEE では、建築物の環境品質・性能 (Q, 建物

ユーザーの生活アメニティの向上) と建築物の外部環境負荷 (L, 外部への環境影響の負の側面) を同時に考慮し、エネルギー消費、資源循環、地球環境、室内環境を評価対象としています。具体的には、Q では Q1: 室内環境、Q2: サービス性能、Q3: 室外環境 (敷地内)、L では L1: エネルギー、L2: 資源・マテリアル、L3: 敷地外環境を評価分野としています。それぞれの評価分野はいくつかの評価項目で構成され、評価項目には採点基準が設けられており、標準レベルを 3 点として各評価項目を 5 点満点で採点する仕組みです。そして、Q1, Q2, Q3 を分子、L1, L2, L3 を分母として算出される指標 (環境性能効率 (BEE)) の大きさに基づき、建築物の環境性能が評価されます。

建築物の環境性能効率 (BEE)

$$= \frac{\text{建築物の環境品質・性能 (Q)}}{\text{建築物の外部環境負荷 (L)}}$$

図-4 に示すように、グラフ上で横軸を L、縦軸を Q とすると、L 値と Q 値の座標点 (例えば、図中の△) と原点を結ぶ直線の傾きが、環境性能効率 (BEE) を表すことになり、その傾きの大きさがほど環境性能が高いことを示します。この傾きの大きさによって、S (大変優れている)、A、B⁺、B⁻、C (劣っている) の 5 ランクに分けられ、建築物の環境ラベリング (格付け) として用いられます。

したがって、これまで述べてきたような自然環境に及ぼす影響といった内容は、上式における分母に相当し、分子には快適性などの住環境としての質や機能が関わってきます。また、いずれの評価項目も、排出量や消費量といった絶対的な数量ではなく、5 段階の相対的なランクで評価されます。このような点で、前章の LCA とはまったく視点の異なる評価ツールです。一方、建築物のライフサイクルを考えた場合の環境負荷は、土木構造物の場合とは異なり、建設時の環境負荷よりも、空調、換

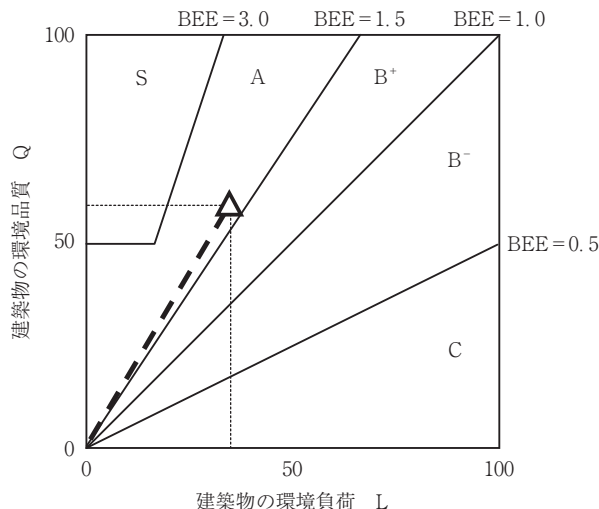


図-4 BEE に基づく環境ラベリング

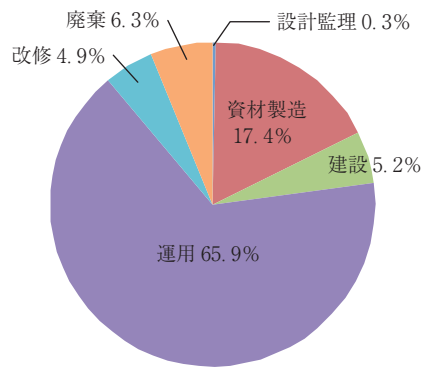


図-5 モデル事務所ビルの地球温暖化影響検討例における各ステージの寄与度⁹⁾

気、照明などを含む運用時の環境負荷が圧倒的に大きくなります(図-5参照)。そのため、CASBEEでは、運用時のエネルギー効率改善、省エネルギー化などの対策が非常に効果的となり、コンクリートのライフサイクルが自然環境に及ぼす影響は、評価結果に具体的には表れにくい形となっています。

4. おわりに

1. で、コンクリートのライフサイクルが自然環境に対して及ぼす影響をどのように数値化し、数値化されたものをどのように評価すればよいのかを概説すると述べましたが、2.3(1)で述べたように、何を数値化して何を評価すべきかは、その目的によって決まってきます。CO₂削減に取り組むのであれば、CO₂排出に関する信頼できるインベントリデータを収集し、CO₂排出量のみ注目してLCIを実施するのが適切でしょう。しかし、例えば標準案と代替案との比較の中で、代替案の方が

CO₂排出量、SO_x排出量は減少するけれども、NO_x排出量は増加してしまうとなると、NO_x排出量とSO_x排出量を合わせた酸性化の環境領域で特性化を行いLCIAによって両者を比較する必要があるかもしれませんし、さらにはCO₂排出量も含めて統合化して比較することが必要となってくるかもしれません。いずれにしても、具体的な例がないと、なかなか数値化や評価といったものがイメージしにくいのではないかと思います。そこで、最終回の第3回では、コンクリートのライフサイクルにおける環境影響評価の実施例を紹介したいと思います。

参考文献

- 1) ISO 14040 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, 2006. 7. 1
- 2) 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 22 年 10 月 20 日改正
- 3) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 44 コンクリートの環境負荷評価, p.I-2, 2002 年 5 月
- 4) 社団法人産業環境管理協会：平成 14 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託 製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発成果報告書, p.727, 平成 15 年 3 月
- 5) 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 年 9 月 30 日
- 6) 土木学会：コンクリートライブラリー 125 コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案), p.52, 2005 年 11 月 1 日
- 7) 日本建築学会：建物の LCA 指針～温暖化・資源消費・廃棄物対策のための評価ツール～, 2006 年 11 月
- 8) 藤木昭宏・青木雄祐・河合研至：プレキャストコンクリート製品に関する環境負荷インベントリデータ, 環境時代におけるコンクリートイノベーションに関するシンポジウム論文集, pp.37~42, 2008 年 8 月
- 9) 伊香賀俊治：建物の LCA 手法の開発と計算ソフトの公開, 平成 16 年度 LCA 日本フォーラム第 3 回セミナー講演資料, p.2, 2004 年 12 月 10 日を基に作成