特集「LCAによせる期待」

解説

都市環境管理へのLCAの応用

花木 啓祐・荒巻 俊也

Application of Life Cycle Assessment to Urban Environmental Management

Keisuke HANAKI and Toshiya ARAMAKI

Synopsis: The LCA is a useful tool in management of urban environment. As urban activity often depends on material supply from outside, evaluation of both direct and induced environmental loading is necessary to know the environmental performance of the city. City scale input-output table analysis can demonstrate such direct and induced loading. LCA is also necessary to evaluate various policies especially when material saving or recycle is their target. Environmental technology often brings trade-off among environmental loadings. The simplest trade-off is within same type of environmental loading such as carbon dioxide. The case study of heat recovery in urban solid waste incineration plant shows that net reduction of environmental loading very much depends on the condition of applied district. The other trade-off is between different types of environmental loading. Typical example is wastewater treatment which reduces water pollutants whereas it emits carbon dioxide. Monetary evaluation is one method to compare such trade-off. An example in Japanese lake shows that benefit from improvement of lake water quality is significantly higher than the damage caused by carbon dioxide and other air pollutants emission throughout the life cycle. The trade-off between human health risk and environmental loading may be compared based on DALY (Disability Adjusted Life-Years) value. Application of LCA to strategic environmental impact assessment is not yet realized but promising.

Key Words: urban environment, trade-off, heat recovery, water environment, health risk

1. はじめに

今日、都市環境問題は人間社会の持続可能性を左右する大きな問題になっている。それは、もはや「都市の中で生じている環境問題」という意味ではなく、「都市が環境に与える影響と都市における人間活動の調和」をどう達成するかという問題であり、地球環境問題と密接な関係にある。このような問題を定量的に扱う場合に、LCAは有力な手段の一つとなり、その寄与が大いに期待されている。しかしながら、都市環境の分野においてLCAを適用する際には、製造プロセスの場合と異なり、いくつかの困難な点がある。研究の必要性が高いその点をここでは抽出してみたい。

2. 都市活動のライフサイクル的な評価

都市の活動に伴う環境負荷は多岐にわたる。膨大な要素からなる今日の社会においてはさまざまな分業が行われている。都市においても、その都市の中で人間の活動は完結せず、またその都市の活動は都市外に依存する面も多く持

つ。都市の中で自給することは不可能に近い。典型的には食糧の域外農業への依存であるが、工業製品についても、分業が進んでいる今日、都市外あるいはさらに国外から物資が都市に流入している。このことは、ある都市の消費が引き起こす環境負荷は都市外の非常に広い範囲に及ぶことを意味している。

このような場合、都市において直接発生する環境負荷を直接負荷、都市外において発生する環境負荷を誘発負荷（または間接負荷）と呼ぶ。これら誘発負荷を評価することは、環境負荷の小さい都市を形成していく上で不可欠である。

誘発負荷の評価には大きく二通りのアプローチがある。一つは都市全体として生じている誘発負荷を評価する方法である。ある都市の地域産業連関表が整備されている場合、その都市と都市外の間での金銭授受が産業部門別に把握できるので、都市全体としての誘発負荷を評価することができる。都市による負荷の本質を評価する場合には誘発負荷の推定は有用である。

Table 1. Direct and induced CO₂ emission in various cities.

City	Direct emission (%)	Induced emission (%)	Remarks
Tokyo (23 wards)	30.1	69.9	Value in 1990 ¹⁾
Fukuoka, Japan	36.8	63.2	Value in 1985 ²⁾
Kitakyushu, Japan	69.7	30.3	Value in 1985 ²⁾
Beijing, China	57	43	Value in 1997 ³⁾
Shanghai, China	51	49	Value in 1997 ³⁾

Table 1 に日本のいくつかの都市と中国の都市に対する直接二酸化炭素排出量と誘発二酸化炭素排出量を示す^{1) 3)}。東京のようにサービス業が主体の都市では多くの製品や素材を都市外から輸入しているが、それらの製品や素材を製造する際に排出される二酸化炭素は誘発分に含まれる。そのことから、東京の都市活動に由来する二酸化炭素の実に70%が域外で排出されているのである。それに対して、製造業が盛んな北九州市の場合には、域外の比率は非常に低い。中国の都市でも上海のように商業活動が中心の都市では誘発分の比率が高い。このように都市によっては誘発二酸化炭素排出量の方が直接分よりもはるかに大きい。すなわち、通常推定され、都市の二酸化炭素排出削減計画などに使われている直接分の二酸化炭素排出量のみではその都市の活動が与えている環境負荷の全容を把握できないのである。このような解析を行うことによって始めてその都市が持っている特性を明らかにすることができる。

しかし、このように都市活動が生み出す誘発の環境負荷を算出しても、都市活動の中で用いられる個別の技術や個々の人間活動の評価には使えない。個別の評価はLCAによってなされなければならない。

今日、社会の目標に掲げられている循環型社会の形成は資源の循環を図り全体としての環境負荷の低減を目指すものである。都市の内部で資源の循環利用を図る場合、エネルギーの新たな消費を伴うことが多く、新規に製品を都市の外部から持ち込む場合に比べて直接の環境負荷はかえって大きくなる。その意味でも、LCAの手法を用いなければこのような対策の効果を評価することができない。

しかし、このようにLCAを用いたとしても、実際の都市環境に関わる施策が循環型社会の形成に資するかどうかという点について、その答は必ずしも自明ではない場合もある。とりわけ環境インパクト分析の段階には多くの課題が残っている。さまざまな廃棄物のリサイクル、廃棄物の焼却によるエネルギーの回収のような技術を取り上げた場合、環境負荷項目間にトレードオフを生じる場合が多く、全体として環境負荷の低減につながるかどうかの答えが出にくい場合も多い。とりわけ、廃棄物の埋め立てのように

その行為がもたらす環境への影響が場所によって異なる場合には地域単位での影響の評価を行うことが求められる。

3. 都市環境関連事業におけるトレードオフ

都市環境を改善し、人々の生活の質の向上を図るためにさまざまな事業が実施される。そのような事業においてはしばしば環境負荷に関するトレードオフが生じる。

もっとも原理的に単純なものは同一の環境負荷の間のトレードオフである。すなわち、異なる場や時間に同種の負荷の発生と削減が生じる場合である。二酸化炭素の排出削減のためのハード技術の場合にはこれが生じる。その場合にはLCAのインベントリー解析の段階で事業の評価を行うことができる。

次に、しばしば直面するのは異種の環境負荷の間のトレードオフである。これは、二酸化炭素以外の環境汚染物質を対象とした除去技術の場合、ほとんど常に生じる問題である。

人間の健康リスクや災害リスクを低減させるような場合にも環境負荷とのトレードオフが生じる。

さらに、生活の質を高めるためのさまざまな事業が環境負荷を生じる場合もトレードオフを生む。

3.1. 同一種の環境負荷間のトレードオフ

都市活動による二酸化炭素の排出を抑制するための事業として行われる地域冷暖房や建築物の改良の場合が典型例である。ここでは、廃棄物の焼却による余熱を利用した地域冷暖房を例として取り上げてみたい。

廃棄物焼却余熱、下水熱などは未利用エネルギーと呼ばれ、都市の中で用いることができる貴重な熱源である。通常それらの熱を利用するためには地域冷暖房システムを構成して、特定の地区に対して熱を供給することになる。その際、熱供給の元となる温熱と冷熱の製造プラントと、それらの熱を水または蒸気で配るための地域配管が設備として必要になり、これらの建設と運用時に二酸化炭素が排出される。

余熱の利用はヒートポンプを用いることによって行われる。この場合のエネルギー利用の効率は未利用エネルギーを使わない場合に比較して高くなる。従って、対象地区の内部では未利用エネルギーを使う量に比例して運用時のエネルギー節約量が増大することとなる。一方、地域冷暖房導入時の二酸化炭素の増加要因は、プラントと地域配管の建設に伴うものと、運用時に温水・冷水を供給するための動力に由来するものである。プラント設備の規模は熱需要に応じて決まり、地域配管の建設に由来する分については、地域冷暖房の供給面積に応じて増大する。

ところで、運用時の二酸化炭素の削減量については、節約されるエネルギー種あたりの二酸化炭素排出量炭素強度

Figure 1. Reduction of CO₂ emission utilizing waste heat from solid waste incineration plants in Tokyo.

によって異なる。都市ガスが代替される場合は計算が簡単であるが、電力が代替される場合、その代替電力の炭素強度をどのように想定するかによって二酸化炭素の削減量は大きく変化する。

これらの計算において、特に地域特性の影響が大きいのは、対象地区内に立地する建物による熱需要とそこで削減されるエネルギーの種類と量である。建物の規模と用途によって熱需要は変化する。また、比較対象として地域冷暖房を導入しない場合の燃料消費量を推定するが、それも建物の規模や用途に依存する。基本的には高密度に土地が利用され、病院やホテルのように熱需要の高い施設が立地していると二酸化炭素削減の効果が大きい。エネルギーのうち、電力の炭素強度はそこに電力を供給している電力会社の発電所の電源構成とその運用状況によって異なり、実際には季節と時刻によって変化する。

ここで、東京23区の14の清掃工場に対して地域冷暖房の適用効果を仮想的に評価した結果を紹介する^{4), 5)}。

それぞれの清掃工場で焼却されるゴミに対してその発熱量を7.95 MJ/kg (1,900 kcal/kg)とし、これに処理量を乗じて発熱量を算出した。そして、そのうち20%が熱として利用できるものと仮定して、未利用エネルギー賦存量を推定した。一方、各清掃工場を中心とした半径500m、750m、1000m、1500mの円を考え、それぞれの円の内側を地域冷暖房導入範囲とした。この地域冷暖房導入範囲において延べ床面積1000㎡以上であり、かつ、用途が、事務所、店舗、住宅、病院、ホテル、スポーツ施設のいずれかに分類される建物を選び出し地域冷暖房導入対象建築物とした。

地域配管の総延長は、東京都光が丘清掃工場で行われている地域冷暖房事業の実際の供給面積(184.7ha)と配管の総延長(38.82km)を用いて、各場合の供給範囲の面積と地域配管の総延長は比例関係にあるものと仮定して算出した。配管の単位長さあたりのCO₂排出量については、文献の値⁶⁾を参考にして、3,640 (kg CO₂/m)として用いることとした。なお、配管の耐用年数は50年として、この値で除して年間のCO₂排出量を算出した。

地域冷暖房運用時および未導入時のCO₂排出量については、東京ガス(株)が開発したエネルギー供給システム評価プログラムC-PLAN2000を用いて、地域冷暖房システム運用時のCO₂排出量を算出した。

計算されたCO₂排出削減可能性をFigure 1に示す。導入対象面積を上げた場合の排出削減量の変化の様子は地区毎に大きく異なっている。葛飾や光が丘、千歳などでは導入範囲が広くなるにつれて排出削減量が減少しているのに対して、世田谷や板橋などでは増加する傾向にある。これは、周辺の熱需要が高い地区と清掃工場の位置関係による。また、目黒の例のように対象半径を1,500mに拡大すると大きくCO₂排出削減量が増加している場合もある。この場合は、地区の拡大によって大規模のビルが対象内に入り、削減効果が大きくなったものである。

この例は、CO₂という単一の環境影響のトレードオフを評価するという意味で単純ではあるが、都市環境対策施設として、適用対象地区の属性の影響を大きく受けることを示す例でもある。

Figure 2. Trade-off in implementation of environmental technology and evaluation in monetary value.

3.2. 異なる環境要素間のトレードオフ

都市活動が環境に与える影響を軽減するために、今日さまざまな対策が考えられている。それらの対策の中には、排水処理や大気汚染物質の除去設備のようなエンドオブ技術、排出削減対策など、さまざまなものが含まれる。排水処理で代表されるような環境改善技術は本来環境負荷の軽減を目的に行われるものである。しかし、ほとんどの環境改善技術は、資源やエネルギーを用いる。従って、本来対象とする環境負荷は削減するものの副次的に新たな環境負荷を生じる。

環境改善技術が対象にする環境負荷の減少と、それとはうらはらに生じる副次的な環境負荷の増加の定量的な比較を可能にすることが本来LCAに求められている。しかしながら、そのような比較にはいくつかの点で未解決の問題点が残っている。

第一は、異なる種類の環境負荷の比較の困難性である。これについては、LCAの環境影響評価段階の共通の課題ではあるが、特に水環境問題や大気汚染などの地域環境問題の解決を目的とした環境改善技術の場合にはそれに加えた複雑さがある。Figure 2に削減される環境負荷と、副次的に生成する環境負荷の概要を示す。環境改善技術がもたらす効果は対象とする地域の特性に依存する一方、その技術の導入とともに生じる資源の消費、エネルギーの消費、そして二酸化炭素の消費は、地球全体に対して影響を与えるので、地域を特定しない環境負荷である。さらに、他地域の地域環境に与える負荷も存在する。

環境改善技術がその対象とする汚染負荷について、その削減量を求めることはさほど困難なことではない。それは、その技術の本来の目的として設計され運用されるから

である。そのような負荷削減がどのように環境の改善に貢献するかという問題は、少し評価がむづかしい。たとえばある湖において下水道の整備によってどの程度その湖の水環境が改善するか、というような問題である。しかし、これは従来からの環境工学が解明してきた分野であり、精度の問題はあっても予測は可能である。

一方、環境改善技術がもたらす副次的な環境負荷はさらに二分される。第一はその技術が用いられる際にその場所で発生する負荷であり、その中には地域環境には直接影響せず地球環境に影響を与える二酸化炭素、地域環境に影響を与える大気汚染物質がある。第二は間接的（誘発的）な負荷であり、これは環境改善技術の運用時に用いられる薬品や、施設の建設に伴う資材由来の環境負荷である。この環境負荷は多様であり、二酸化炭素のように地球環境に影響を与えるものもあれば、水質汚濁物質のように地域環境に影響を与えるものも含まれる。後者は、資材の製造過程で生じる負荷であり、具体的にどの場所で環境負荷が生じるかを特定することは困難である。

これら性格が異なる環境負荷の影響を把握するための手法としてはLCAの環境インパクト評価で用いられている方法を用いて、環境負荷量を一般的な形で環境影響度として評価することもありうる。

たとえば、ある水域に排水処理施設を建設して水処理を行い、BOD（生物化学的酸素要求量、Biochemical Oxygen Demand）で代表される水質汚濁物質を除去する場合、その設備の製造、運用段階で生じる副次的なBOD発生量（Figure 2では副次的な負荷のうち、不特定の地域環境へ影響を与えるものとして示される）を計算して、その水処理の本来の機能として除去されるBODからそのような副

Figure 3. Monetary evaluation of benefit and damage by counter-measures for improvement of water quality of Lake Suwa.

次的な BOD 排出分を差し引き、全国共通の原単位を乗じて影響を評価することになる。しかし、ある特定の地域にその排水処理施設を建設することの効果や是非を評価することを目的とするならば、このような方法は適切ではない。

なぜなら、このような方法をとるならば、その排水処理で除去される BOD の量が一定である限り、適用場所にかかわらず実質的な水質汚濁物質削減効果が同一に評価されてしまうからである。実際の所、対象としている場の水質汚濁の状況、対象としている場の水環境の利用状況によって排水処理がもたらす効果は当然に異なる。それぞれの場所における実質的な環境負荷削減効果を求め、その場に当該技術を導入することの効果の大小を評価する手法として LCA を用いるならば、このような方法は適切ではなく、個々の地域特性を含めた評価にすることが必須である。

そこで、貨幣価値に換算してこれらのトレードオフを評価することが考えられる。この場合、環境への影響を物理的に算出する部分までは自然科学的な方法で行い、貨幣価値に換算する部分以降は社会科学的方法で行うということになる。

ここで諏訪湖の水環境を対象にして金銭評価を行った例を紹介する^{7), 8)}。

諏訪湖の水環境改善効果を金銭価値で評価するために Contingent Valuation Method (CVM) の調査を行った。これは、水環境改善に対する住民の支払意思額を調査し、それに基づいて環境改善の価値を評価するものである。

ここでは下水道の完全普及、農地の施肥管理、湖の浚渫、市街地からの非特定汚染負荷の制御、の 4 つの施策とそれらの組み合わせを検討した。これらのうち、下水道の完全普及、施肥管理、浚渫 + 市街地負荷制御によって達成できる水環境改善の価値は約 728 百万円/年となり、また、下水道完全普及と施肥方法転換の組み合わせで達成できる水環境改善の価値は約 940 百万円/年となった。

一方、これらの施策に伴うライフサイクル的な CO₂、大

気汚染物質排出量を求めた。このうち CO₂ 排出による損害は IPCC (気候変動に関する政府間パネル、Intergovernmental Panel on Climate Change) の報告書⁹⁾ の値を利用した。

水環境改善効果とその他の環境負荷 (CO₂ 排出および他の大気汚染物質の負荷) を金銭単位で比較すると Figure 3 のようになる。

いずれの組み合わせにおいても、諏訪湖水環境改善によって高まる環境価値に比べて地球温暖化の影響の経済的損害は極めて小さいことが分かる。地球温暖化の経済的価値は、CO₂ を追加的に排出するほとんどの対策では負であるが、農地対策 (施肥方法の転換) では前述の理由により正となっている。また、統合的に評価すると、下水道完全普及と農地対策の組み合わせにおいて水環境改善効果が最大となり、地球温暖化への影響も相殺されるので環境改善効果が最大となる。

ここで示した方法で水環境改善効果と二酸化炭素などの損害を金銭価値で比較する際に留意すべきことは、便益と損害の帰着の不一致である。すなわち、便益は諏訪地方の住民にもたらされる一方で、二酸化炭素の損害は世界全体に対して与えられ、現実には発展途上国でより大きく損害が発生する。

3.3. 環境負荷とリスクのトレードオフ

人間に対するリスクを軽減するためにさまざまな事業が行われている。人類の生存にとってこれらは必要なものではあるが、過度のリスク低減の追求は副次的に生じる環境負荷の面から得策ではない場合もある。

人間の健康に関するリスク低減事業についてはそのトレードオフを、DALY (障害調整生存年数、Disability Adjusted Life-Years) で比較することが考えられる。

上下水道は、人々の衛生状態を改善し、健康リスクを低減する。しかし、前項の水環境改善と同様、上下水道施設の建設とその運転に伴って資源とエネルギーの消費があり、これが環境負荷を生じる。環境負荷の一部は人間の健康への影響となって現れる。

上下水道の効果は水系伝染病によって生じるであろう健康影響、すなわち DALY の発生を回避するという形で現れる。今日、世界的な水道の水質基準は DALY を基準にして、それが一定値以下になるように定められているので、DALY を用いた表現は比較的自然である。

従って、LCA による環境影響と、このような衛生学的な安全度の確保をとともに DALY で表すならば、人間の健康影響に関して定量的な比較ができる。

このような試算については、注意深く検討すべき課題も多い。とりわけ、浄水による受益者とそれに伴って生じる

環境負荷の被害者が異なる点には注意が必要である。

この点は前述の水環境改善の場合と同様ではあるが、特に人の健康へのリスクのように疾病など不可逆的な損害を伴う場合にはこの点がさらに重要である。

3.4. 生活の質と環境負荷のトレードオフ

前項までのトレードオフはLCAにおいて環境影響として表される要因同士の比較であった。産業技術総合研究所で開発されているLIME(被害算定型環境影響評価手法、Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling)で用いられている「保護対象」との関連で言えば、水道の整備などによる健康リスクの低減は人間の健康への影響とDALYの単位を介して比較可能である。また防潮堤などの災害防止のための都市基盤施設は社会資産への損害を低減するものとして比較可能であろう。しかし、現代の都市において行われているさまざまな事業はもはや健康と安全を最低限保障するBasic Human Needsの域を超えたものになっている。都市の中の水辺環境を整備し人間と水とのふれあいを豊かにする事業、景観を考えたまちづくり、生態系の価値という意味では大きくないが人間にとって憩いになる都市内のみどりの整備などである。これらは生活の質を高めることを目的としている。また、人間としての機会を平等にするためのユニバーサルデザインもこの範疇に入るであろう。

このような生活の質の向上は、金銭価値に換算することはできるであろうから、3.2で紹介した湖沼の水環境保全の場合と同様に金銭価値としての比較も可能であろう。ただし、この場合には環境への影響同士を比較しているわけではなく、人間への福利まで拡張して比較対象することになる。

4. 今後の発展の方向

都市環境とそこで行われるさまざまな事業を対象にしたLCAは、個々の事業による環境改善効果を高める一方で、副次的な環境負荷を低減することに定量的に貢献する。

大規模事業を行う場合には環境アセスメントが事前に行われるが、さまざまな環境影響の有無をチェックするにとどまっている場合がほとんどである。このように、環境影響がいわば閾値を超えるか否かという判断には、総量として環境負荷を算出するLCAは必ずしも適していない。

LCAはむしろ事業の初期段階でさまざまな代替案を比較する戦略環境アセスメントに向いている。そこでは、様々な要因を比較しながら事業の適否、代替案の比較を行うので、LCAによって評価した環境負荷の大小を判断基準の一つにすることができる。

引用文献

- 1) Yoshida Y., Ishitani H., Matsubashi R.: J. JPN. Inst. Energy, Vol. 77 (11), (1998), pp1054-1061
(吉田好邦, 石谷久, 松橋隆治, 日本エネルギー学会誌, 第77巻, 第11号, (1998), pp1054-1061 [in Japanese])
- 2) Kanagawa T., Kato E., Imura H.: Environmental Systems Research, JSCE, Vol. 20, (1992), pp.242-251
(金川琢, 加藤英輔, 井村秀文: 土木学会 環境システム研究, Vol. 20, (1992), pp.242-251 [in Japanese])
- 3) Institute for Global Environmental Strategies (2004)
"Urban energy use and greenhouse gas emission in Asian mega-cities: Policies for a sustainable future", Chapter 4 (2004)
- 4) Aramaki T., Komoda N., Hanaki K.: Proc. of the 21th Annual Meeting on Japan Society of Energy and Resources, (2002), 379-384
(第21回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, (2002), 379-384 [in Japanese]).
- 5) Aramaki T., Komoda N., Hanaki K.: Proc. 10th Symposium on Global Environment, JSCE, (2002), 69-74
(荒巻俊也, 薦田将治, 花木啓祐: 土木学会第10回地球環境シンポジウム, (2002), 69-74 [in Japanese])
- 6) Hayashi H. Journal of Architectural Planning (Transactions of AIJ) 521, (1999), 81-87
(林英明ら: 日本建築学会計画系論文集, 521, (1999), 81-87[in Japanese]).
- 7) Inaba R., Hanaki K., Nakatani J., Aramaki T.: Selected Papers of Environmental Systems Research, Japan Society of Civil Engineers, Vol.29, (2001) 37-45(稲葉陸太, 花木啓祐, 荒巻俊也, 中谷隼: 環境システム研究論文集, Vol.29, (2001) 37-45 [in Japanese])
- 8) Inaba R., Nakatani J., Aramaki T., Hanaki K.: Journal of Japan Society on Water Environment Vol.25, (2002) 635-640 (稲葉陸太, 中谷隼, 荒巻俊也, 花木啓祐: 水環境学会誌, Vol.25, (2002) 635-640 [in Japanese])
- 9) James P. Bruce J.P., Lee H., Haites E.F.: Climate Change 1995 Economic and Social Dimensions of Climate Change, Cambridge University Press (1996).