14. 都心地区から発生・派生するライフサイクル炭酸ガスの削減シナリオの評価

THE ESTIMATION OF ENVIRONMENTAL IMPROVEMENT SCENARIOS FOR LIFE CYCLE CO₂ REDUCTION FROM URBAN CENTRAL DISTRICT

村野 昭人*・藤田 壮*・盛岡 通*

Akito MURANO・Tsuyoshi FUJITA・Tohru MORIOKA

ABSTRACT ; The reduction of the environmental impacts from central districts is considered as an urgent global problem. A life-cycle assessment method has been applied in several empirical studies, while the interactive linkage of the estimation results with the strategy of societal policies have been seldom investigated so far. In this study the frame for calculating the CO₂ emissions from urban development, which includes buildings and infrastructures, is established to analyze the characteristics of environmental impacts and to estimate the effects of environmental impact reduction method. Environmental impacts from urban activities are found as much larger than those from urban structures, and those from the inside of urban areas are much larger than those from the outside of urban areas. Not only direct methods such as saving energy and more efficient traffic system but also indirect methods such as modal shift and planned unit development are found to be effective for life cycle CO₂ reduction.

KEYWORDS ; Urban Development, Life-Cycle Assessment, CO₂ emission, Environmental impact reduction method

1 はじめに

ライフサイクルアセスメント (Life-Cycle Assessment, 以下 LCA) 手法を適用して、建築物から広く社会資本施設までを対象として都市の構造物から発生する環境負荷を評価する研究はすでに広く行われている^{1), 2), 3), 4)}。これらの研究を通じて、各種の都市施設を単体で取り上げ、それらをストックとして見た場合の環境負荷を定量化するケーススタディが積み重ねられて、都市構造物の建設や更新に伴う CO₂ 発生量やエネルギー使用量などの環境負荷の原単位が整備されてきた。一方で 1997 年 12 月に京都で開かれた気候変動枠組条約第 3 回締約国会議 (COP3) において採択された議定書の中で、わが国は CO₂ 発生量を 2010 年までに 1990 年水準から 6%抑制することと定められており、しかもその達成水準が将来的により厳しくなることが見込まれる。したがって、環境負荷の削減について、技術改善や産業政策、生活主体の努力などの個別の努力を通じてその目標達成を図るだけでなく、都市基盤とその運営システムを改善することにより、都市活動やそれを支える基盤整備に起因する CO₂ を削減して、負荷の小さい都市システムの実現を目指すべきといえる。本研究では現状の都市構造物の評価から、将来の予測さらに想定される改善施策の削減効果の比較などを通して、その政策への展開を検討する。

LCA を用いた都市構造物の環境負荷分析を都市環境政策や計画の立案などに展開する際には、以下の課題を考慮すべきとなろう。①都市には様々な種類の施設、製品、活動が組み合わさって存在している。(本

* 大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻 Dept. of Environmental Eng., Graduate Course of Engineering, Osaka University

研究ではこれらを都市集積と称する。) 通常の LCA 分析では、単独の製品を対象にその製造から廃棄までに発生する環境負荷を評価することにより、生産主体の意志決定に分析の結果が反映される。それに対し、都市集積を対象とした LCA 分析では、基盤の建設や所有さらに活動など多様な主体が関係しているため、複数の製品や活動のライフサイクルを合わせて評価する視軸が必要となる。②技術的対策だけでなく幅広い環境改善政策の効果を評価して比較する必要がある。すなわち都市集積に関わるビルディングマネジメントや、空間マネジメント、都市成長マネジメントなどの多様な環境改善施策を定量評価の対象とするとともに、現状の建物のライフサイクル分析に加えて、都市集積が更新される長期的なスケジュールをシミュレーションすることが求められる。③都心地区の基盤整備及びそこでの活動は、地区内だけでなく地区の外部に存在する多様な主体が関与しているため、集計的に負荷を算定するだけでなく関連主体を分類しライフサイクルの負荷を評価するべきである。

2 都市集積から発生・派生する環境負荷の分類⁹⁾

LCA 手法を用いて都市施設からの環境負荷を評価する際に多くの研究では、発生する環境負荷を対象となる構造物に帰属させて算定してきた。しかし、都市集積から発生・派生する環境負荷には、建設・維持管理・解体の構造物の更新によって直接発生する負荷だけではなく、構造物を利用して行う都市活動によって発生する負荷の存在を無視することは出来ない。さらに環境負荷の多くは構造物の立地する地区内だけではなく地区外においても発生しており、構造物の製品連鎖 (Product Chain) 上での負荷と同時に都心での活動を支える地区外での環境負荷を評価する必要があることから、本研究では以下のような分類を行った。

(1) 負荷の属性による分類

都市施設に起因する環境負荷と都市活動に起因する環境負荷に分類する。前者は、建築物及び道路・鉄道・水道施設 (浄水場・処理場・水道管など)・発電所・ガス管・廃棄物処理場などのインフラ施設の建設・維持管理・解体に伴う負荷を含む。建設や維持管理段階において使用される資材の生産・加工・運搬に伴う負荷もこの分類に含まれる。後者は、居住・生産・業務活動など施設の利用や運用に伴って発生する環境負荷で、エネルギーの消費や交通の走行、代謝基盤の運用に伴い発生する負荷を含む。

(2) 負荷の発生場所による分類

さらに地区内部で発生する環境負荷の他に、地区内の構造物の建設と更新やそこでの活動を支えるために地区の外部で発生する環境負荷も評価する。前者は、建設工事に伴って発生する負荷や都市活動に伴う消費など、都心地区内で発生するものであり、後者は、構造物の資材生産、運搬、解体ステージからの負荷や遠隔地で発電する際の環境負荷、都心で活動する人々の地区までの交通アクセスに伴う負荷などを含む。

属性による分類と発生場所による分類を組み合わせ、都市集積から発生・派生する環境負荷を区分 1~4 に分類する。区分 1 には施工現場において建設工事によって直接発生する環境負荷、区分 2 には都市施設の建設・維持管理のために使用される資材の生産・加工・運搬に伴う環境負荷、区分 3 には都市構造物を利用して行われる都市活動の結果として直接発生する環境負荷、区分 4 には都市活動を行うために必要となる環境負荷がそれぞれ含まれる。各区分の概念図を図 1 に示す。

図1 区分の概念図

3 都市集積からの環境負荷のライフサイクル算定手順

本研究では都市集積からの負荷として CO_2 と廃棄物について算定したが、本稿では CO_2 について取り上げる。

都市基盤としては、建築物、地下鉄、道路、上下水道、エネルギー供給基盤として電力施設・ガス供給施設、廃棄物処理施設を取り上げる。都市集積から発生し、派生する CO_2 の算定手順のフローを図 2 に示す。詳細については別稿を参照されたい^{6), 7), 8)}。登記簿謄本等をもとにして建築物の建設年度・用途・構造・規模データを入力して、資材生産・資材運搬・施工・運用・保守・大規模改修・解体の 7 つの各ステージごとに使用する資材量とエネルギー量の消費インベントリを原単位を用いて算出する。さらに

CO_2 発生量原単位を用いて環境負荷をライフサイクルで算定する。 CO_2 発生量原単位には土木学会の暫定推奨値¹⁾を用いる。この値は産業連関表を基礎データとして利用し、積み上げ法も部分的に併用して産業間の波及効果を含めている。建築物に関する原単位には、運用時には文献調査⁹⁾による値、運用時以外には総合エネルギー統計と着工床面積から算出した値を用いる。建築物以外の基盤に関する原単位には文献調査^{1), 3)}による値を用いる。7 つのステージのうち、施工に伴う負荷を区分 1、資材生産・資材運搬・保守・大規模改修・解体に伴う負荷を区分 2、運用に伴う負荷を区分 3 及び 4 に配分して区分別に算定する。

更新後の建築物では、現状の建物の施工期間 t_1 、運用期間 t_2 、解体期間 t_3 および権利調整などによる再開発までの待機期間 t_4 について、 t_1 は建築物の構造・階数・延床面積によって決定される内生変数とする。 t_2 , t_3 , t_4 は外生的に決定する。建築物ごとの着工年度 (T_0) を入力すると、現状の建築物の解体年度、更新後の建築物の施工開始年度、運用開始年度が一意的に決定されるシステムにした。建築物の運用期間や更新猶予期間、及び更新後の建築物の建蔽率、敷地面積、用途は操作的に変更できるシステムを採用した。4 章のケーススタディでは、それぞれ 50 年、0 年、50% とし、敷地面積は更新前後で同一、更新後の用途は一律に事務所と仮定した (図 3)。

交通手段としては自動車・鉄道・徒歩の 3 種類を想定して、以下の手順で交通基盤の走行段階における CO_2 発生量を算定する (図 4)^{10), 11)}。まず、各建築物の延床面積データを用途別に集計し、発生交通量原単位を用いて自動車のトリップ数を求め、さらに大阪市の区別のモード分担率に基づいて外生的に与えたモード分担率を用いて鉄道のトリップ数を得る。それらに別途求めた平均トリップ長及び CO_2 発生量原単位を用いて全体の CO_2 発生量を求める。

図 2 都市集積からの CO_2 算定のフロー

図 3 都市更新スケジュール

図 4 交通基盤からの CO_2 算定のフロー

4 中之島西部地区における試算

4.1 対象地区の概要

中之島西部地区を対象として都市集積から発生・派生する環境負荷を試算する（図 5）。対象地区は大阪市の都心部に位置しており、堂島川と土佐堀川にはさまれ、面積 33ha を持つ。業務施設を中心にホテルや文化施設が数多く立地するが、大阪大学医学部の跡地をはじめとして駐車場や空地もあり、いくつかの再開発事業が現在構想、計画されている。1997 年時点では建築施設の延床面積が約 78 万 m^2 、遊歩道や高速道路を除いた一般道の総面積が 68603 m^2 となっている。

建築物の更新について以下の前提を設けて、2000 年から 2049 年までの 50 年間の累計 CO_2 発生量を算定する。①解体された建築物から順に設定容積率の建築物に更新されていくとする。②1997 年時点では対象地区全体の容積率は平均で約 307%だが、中之島西部地区に対して指定されている法定容積率を面積をもとに加重平均した建設可能容積率は約 700%となる。そこで現状の容積率を前提とする「現状更新型シナリオ」と 600%の開発を行う「高度利用型シナリオ」を採用する。③現状で空地となっている区域には、所属するブロック内で最も早く更新される建築物の着工年度と合わせて事務所

図 5 中之島西部地区地図

が着工される。

4.2 都市集積から発生・派生する環境負荷特性

中之島西部地区における現状データをもとに、現状更新型シナリオと高度利用型シナリオにおける CO_2 発生量の算定結果を図 6 に示す。更新される時期を考慮すると、容積率の差は必ずしもライフサイクル CO_2 の発生量と一致しない。基盤別に算定した結果、水道基盤・廃棄物処理基盤からの負荷は他の基盤からの負荷に比べて小さい（図 7）。一方で、交通基盤やエネルギー基盤に起因するライフサイクル CO_2 が大きい。

区分別に算定した結果、地区外の都市活動に伴い地区外で派生する負荷である区分 4 が全体の大部分を占めており、都市施設の建設・維持管理のステージで地区内で直接発生する負荷である区分 1 は他の区分と比較して小さい（図 8）。都市施設の建設・維持管理に伴い地区外で派生する負荷である区分 2 の大部分は建築物に起因しており、各インフラ施設に起因する負荷は小さい。都市活動において地区内で直接発生する負荷である区分 3 の内訳は、交通基盤の地区内の自動車走行と、エネルギー供給基盤のうち地区内でのガスの燃焼による。

都市活動に伴う CO_2 発生の主要因は、交通走行（交通基盤区分 3, 4）、エネルギー使用（エネルギー基盤区分 3, 4）、建築物の建設（建築物区分 1, 2）である。区分 1+2 と区分 3+4 を比較すると、後者が全体の 80%

図 6 容積率別 CO_2 発生量

図 7 600%更新における
基盤別 CO_2 発生量 (2000-2049)

以上を占め、都市活動に対する対策が有効かつ重要と言える。また区分 1+3 と区分 2+4 を比較すると、後者が全体の 90%以上を占め、都市活動・基盤整備が環境面で外部に大きく依存していることが明らかになった。

5 環境負荷削減施策の評価

5.1 環境負荷削減施策の設定

環境負荷削減施策を、ビルディングマネジメント・ユーティリティマネジメント・空間マネジメントの三種類に分類する¹²⁾。本研究で採用

した施策とその設定を表 1 に記す。

街区共同化において用いたアルゴリズムを図 9 に示す。既存の道路構造などから街区としてのまとまりをブロックとし、対象地区を 22 ブロックに分割した。ブロックの平均の敷地面積は約 1ha となった。各ブ

ロックごとに t 年度の延床面積を算定して、その中で運用寿命を超える建物の割合が $x\%$ を超えるとブロック全体が更新されるシナリオを採用した。 t と x は操作的に変更できるシステムを採用し、ここでは t の初期値として 1998 年、 x として 70% の値を用いた。

5.2 環境負荷削減施策の効果試算結果

各環境負荷削減施策の高度利用型シナリオにおける削減効果の算定結果を図 10 に示す。図中の容積率 300% 増加による発生量とは、現状更新型シナリオと、高度利用型シナリオにおける環境負荷削減施策なしの場合の CO_2 発生量の差を表しており、比較対象として表示する。省エネルギーやモーダルシフトなどユーティリティマネジメントに分類される施策の効果が最も大きい。空間マネジメントに分類される施策も 100kt-C 以上の効果を持つことがわかる。一方で廃棄物リサイクルや高さ規制は、それぞれ廃棄物発生量や景観といった他の環境指標で考える際に重要となる施策であるが、ライフサイクル CO_2 という観点から見た場合には効果がない。各施策の効果を合計すると容積率 300% 増加による発生量の 102% となる。すなわち各施策を導入した場合、高度利用を行いつつも現状の CO_2 発生量水準を維持することが可能であることが示唆される。

図 8 600%更新における
区分別 CO_2 発生量 (2000-2049)

表 1 環境負荷削減施策の設定

施策分類	施策名	内容
ビルディング	エコテリアル	建築物の建設や維持管理において使用される資材のうち、セメントがポルトランドセメントから高炉セメントへ 100% 転換、鋼が高炉鋼から電炉鋼へ 50% 転換
	廃棄物リサイクル	建築物の解体に伴い発生する廃棄コンクリート等を再生工場へ運搬して再生骨材に転換。建築物の建設や維持管理において骨材として使用
ユーティリティー	省エネルギー・燃費改善	建築物の運用段階において使用されるエネルギー量を 30% 省力化
	モーダルシフト	自動車の走行段階において、走行燃費が向上し、発生 CO_2 原単位が 90% 減少
空間	東街区集中利用	中之島西部地区における全延床面積を東街区に集中して配分
	街区共同化	更新の際、ブロックごと一体化させて更新
	高さ規制	容積率をそのままに、建築物の高さを 10F に規制。建蔽率を増し、建築面積を増加させることによって容積率は維持する

図 9 街区共同化のアルゴリズム

図 10 各施策による CO_2 排出削減量

6 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ①都市集積から発生・派生する CO₂ において大きなシェアを占めるものは、建築物の運用時のエネルギーの消費、交通の走行、建築物の建設である。そして施設の基盤の更新に起因する負荷よりも活動に起因する負荷が大きな割合を占め、ともに都市内で発生する負荷よりも都市外で派生する負荷が十分に大きい。
- ②省エネルギー、自動車の燃費改善といったエネルギー使用量を直接的に削減させる施策以外にも、モーダルシフト、共同化、駅周辺地区重点開発など、エネルギー使用量を削減させる方向に社会を誘導する施策も、削減施策として有効である。

環境負荷削減施策を都市更新条件と組み合わせてシナリオを作成して評価し、都市環境政策や計画の立案などに展開する議論に関しては別稿にて報告する予定である。

謝辞

本研究は科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業（CREST）の「社会実験地での循環複合体のシステム構築と環境調和技術の開発」（研究代表 盛岡通）の一環として行われ、研究を進めるに当たりその支援を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会地球環境委員会「土木建設業における環境負荷評価（LCA）検討部会平成 7 年度調査研究報告書」
- 2) 酒井寛二「土木建設物の二酸化炭素排出量原単位の推定」, 土木学会第 4 回地球環境シンポジウム講演集, pp43-48, 1996
- 3) 井村秀文ら「下水道システムのライフサイクルアセスメントに関する研究：LCE を指標としたケーススタディ」, 環境システム研究, vol23, pp142-149, 1995
- 4) 伊藤武美ら「二酸化炭素排出抑制技術・システムのニュータウン建設への適用」, 環境システム研究 vol.24pp250-259, 1996
- 5) 藤田壮ら「都市更新にともない発生する環境負荷のライフサイクル評価に関する研究」, 第 6 回地球環境シンポジウム講演論文集 pp57-62, 1998
- 6) T.Fujita, et al; Life-Cycle Estimation of Environmental Emission from Urban Development Process, Proceedings of The Third International Conference on Eco Balance – Progress in LCA for a Sustainable Society – pp163-168, 1998
- 7) N.Urushizaki, et al; Life Cycle Estimation of Environmental Emission for Urban Structures, Proceeding of CREST International Workshop 1999, pp165-176, 1999
- 8) T.Nakahara; Estimation Package for Life Cycle Environmental Emission of Urban Renewal Alternatives, Proceeding of CREST International Workshop 1999, pp177-187, 1999
- 9) エネルギー総合管理技術協会「建築物エネルギー消費量調査報告書平成 8 年度」
- 10) 中村英樹ら「都市間道路の横断面構成の相違による CO₂ 排出量のライフサイクル評価」, 環境システム研究 26, pp261-270, 1998
- 11) 第 12 回都市環境システム研究会交通分科会資料「交通部門における CO₂ 排出量のための検討」, 1998
- 12) T.Fujita, A.Murano; Planning Environmentally Sound Urban Renovation Strategies and Estimation of their Performance, Proceeding of CREST International Workshop 1999, pp188-197, 1999