

都市空間構造改変施策に伴う 各種環境負荷のライフサイクル評価システム

林 良嗣¹ ・ 加藤 博和² ・ 北野 恭央³ ・ 喜代永 さち子⁴

1 フェロー 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科地圏環境工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

2 正会員 博(工) 名古屋大学大学院助手 工学研究科地圏環境工学専攻

3 正会員 修(工) 玉野総合コンサルタント(株) 地理情報部 (〒461-0004 名古屋市東区葵一丁目3番15号)

4 学生会員 名古屋大学大学院博士課程前期課程学生 工学研究科地圏環境工学専攻

都市が地球や地域に及ぼす環境負荷の定量的評価は、環境問題に対処するための都市施策の検討にとって必要不可欠である。本論文では、都市空間構造の環境負荷低減型への改変を検討することに焦点を当て、都市の社会基盤施設や建築物から発生する各種環境負荷を推計するためのモデルシステムを構築することを目的としている。推計のための方法論としてライフサイクルアセスメント(LCA)の考え方を導入し、さらに社会基盤施設や建築物の立地変更に伴う交通活動への影響を加えた「拡張ライフサイクル環境負荷(ELCEL)」での評価を可能としている。また、各種環境負荷を重み付けした統合評価値「環境への優しさ指数(EFP)」の導入も試みている。本システムを用いて、住宅仕様や都市空間構造改変策を検討し、ライフサイクル環境負荷の削減に対する有効性を確認している。

Key Words : life cycle assessment (LCA), environmental impact, urban structure, cohort model

1. 序論

現代都市は、資源・エネルギーの消費や廃棄が大量かつ集中的に発生する場であり、結果として発生する各種環境負荷が様々な環境問題を深刻化させている。人類や生態系が健全に存続しつづけるためには、都市からの環境負荷発生をいかにして削減するかについて取り組むことが必須の課題の1つである。

これに対する試みとして、環境負荷の少ない都市空間構造に関する幾つかの提案が従来からなされている。例えば、Dantzig ら¹⁾による 200 万人が居住可能な直径 2,650m、8 階建ての Compact City や、尾島²⁾による高さ 1,000m、1 辺 100m のハイパービルディング、イギリス都市計画協会(TCPA)³⁾による都市規模別の環境負荷の少ない都市形態(Social City Region)の提案がそれである。しかしこれらの提案においては、都市形成後の環境負荷削減が可能かどうか主として議論されており、そのような都市へ移行する過程で発生する環境負荷、つまり新規施設建設や既存施設廃棄による膨大な環境負荷・建設廃棄物の発生については必ずしも考慮されていない。現実の都市を提案された都市形態に移行することを考え

ると、この両者がかなり異なった形態であることから、移行に伴う環境負荷は無視しがたい量になることが確実である。したがって、環境負荷の少ない都市空間構造に関して検討するためには、都市の完成後のみならず、変化の過程での環境負荷を含めた長期的推計が必要である。

また、環境負荷は多種多様であり、中には相互にトレードオフ関係を持つ場合も多い。したがって、都市空間構造の改変によってある環境負荷の発生量が削減できたとしても、別の環境負荷の発生量が増大することも考えられる。近年は地球温暖化への関心が高いため、環境負荷指標として CO₂ が取り上げられることが多くなっているが、他の主要な環境負荷についても把握しておく必要がある。特に、都市空間構造改変に伴って問題になるのは、建築物や社会基盤施設の更新に伴う膨大な建設廃棄物の発生であり、その追跡は重要である。

そこで本研究では、長期的な都市空間構造改変施策の実施に伴う各種環境負荷の変化を推計するためのシステムの構築を行うことを目的とする。環境負荷の評価手法として、施策の波及効果まで把握することの特徴とする LCA (Life Cycle Assessment) の手法を導入するとともに、都市構造の変化を時系列的に把握する手法とし

て、人口予測にしばしば用いられるコーホートモデルの手法を適用し、これらを組み合わせたモデルシステムとする。さらに、システムによる評価の事例として、環境負荷削減シナリオ実施による環境負荷を推計する。

2. 都市空間構造改変策の環境負荷評価へのLCA適用における留意点

(1) 「都市活動のライフサイクル環境負荷」の定義

都市空間から発生する環境負荷の全体を図-1に示す。本研究では都市空間構造改変策を分析対象とするため、それによって変化が見込まれる土地利用変化と、波及的・長期的に影響が生じる交通、生産・生活活動を扱う必要がある。それらは互いに影響を及ぼしあっており、例えば土地利用の変化によって交通状況が変化し、それによって生産・生活活動も変化する。また交通状況の変化が長期的には土地利用にも影響を及ぼす。

さらに、都市の生産・生活活動や交通活動は、社会基盤施設や建築物といった都市ストックによって支えられている。社会基盤施設や建築物のライフサイクル環境負荷に関しては、既往研究によってLCA手法の整備が進んでいるが、そのほとんどは評価対象を施設や建築物自体に限定している。しかし、都市ストックの態様は、それ自体のライフサイクルにわたる環境負荷(Life Cycle Environmental Load <LCEL>)を規定するとともに、その上で行われる都市活動に伴う環境負荷を波及的・長期的に変化させる要因ともなる。そこで本研究では、加藤⁹⁾による「Extended Life Cycle Environmental Load (ELCEL)」の概念を適用する。これは、対象とする施設・建築物自体のライフサイクルでの環境負荷に加え、供用段階での間接的・波及的な影響を考慮した環境負荷を推計することにより、対象が環境に及ぼす影響をより包括的に評価するための概念である。すなわち、土地利用変化や都市内施設・建築物の建設・維持管理・廃棄に伴う環境負荷と、それらを利用する生産・生活活動に伴う環境負荷、そして交通に伴う環境負荷がELCELに該当する。さらに、都市全体のELCELを、その集合体を構成する各施設・建築物のELCELの総和として定義し、これを推計するためのモデルを構築することが必要である。

本研究では、社会基盤施設や建築物のELCELのシステム境界として、立地変更施策の実施に伴う交通活動への影響までを扱うものの、それに伴って波及的に生じる工業・商業施設等の立地変化や、さらに社会経済全般に及ぶ影響に関しては扱っていない。これらの検討を行うためには、立地変化予測モデル等を新たに導入する必要がある。

(2) 既往の研究事例と本研究の特徴

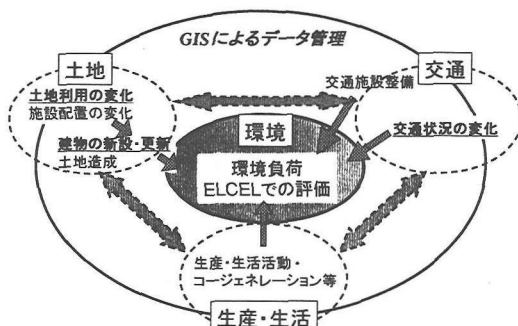


図-1 都市活動とそれに伴う環境負荷発生全体フレーム

複数の社会基盤施設・建築物に対する最初のLCA適用事例としては、花木⁹⁾によるニュータウンを対象とした研究がある。これは、ニュータウンの土地造成・建設工事・供用までを扱い、効率的なエネルギー利用のための施設配置変更や各工事の工法への代替案の効果分析を行っている。これは、従来の単体構造物・建築物に対するLCAの延長線上にある研究といえる。

盛岡⁹⁾は、大阪市の都心(中ノ島地区)を対象として都市施設のLCAを行い、CO₂と廃棄物の現況発生量を推計するとともに、施策実施による都市活動の変化による発生負荷変化の推計を行っている。この研究は、単体構造物・建築物を対象としたLCAを、それらの集合体としての都市に応用し、空間計画の立場から負荷削減施策の分析を行った最初の事例である。また、既存の都市を対象として、その再開発に伴う環境負荷をELCELの考え方によって評価している点も特徴的である。ただし、分析の基本単位が構造物・建築物となっているため、都市全体を表現するためには膨大なデータの収集・管理が必要となることや、土木計画・交通計画の分野で従来から蓄積されてきた交通需要や都市内立地変化を予測するモデルでは分析単位を主にゾーン(地区)とするため、構造物・建築物を分析単位とするモデルとの整合がとれず、立地や交通に関する諸施策の実施効果の分析にあたって既往モデルの知見を生かすことが困難であるという問題点がある。

一方、LCAを用いていないものの、都市から生じる環境負荷をゾーンベースで推計した例として、黒田⁷⁾の神戸市を対象とした研究がある。現状のCO₂発生量と、土地利用・交通・エネルギーに着目した都市政策シナリオによるCO₂削減量の推計を行い、施策間のCO₂排出へのトレードオフを考慮して排出量最小化施策の組み合わせを決定している。しかし、LCAを用いていないために、施策実施に必要な追加設備のLCELが考慮されておらず、施策導入による負荷削減量が過大に推計されていることや、CO₂排出量が最小となる土地利用に至る過程で発生する負荷発生が考慮されていないなどの問題がある。

表－1 本研究で評価の対象とする施設・建築物

分類	都市施設	細分類	LCI手法			耐用年数
			建設	維持管理	廃棄	
1)住宅	戸建住宅	木造、S造	①	①	①	コーホートモデル
	集合住宅	RC・SRC造	①	①	①	コーホートモデル
2)住宅以外の建築物	オフィス、ホテル、公共施設、商業施設	RC・SRC造	①	①	①	50年
3)交通施設	道路	アスファルト舗装道路	①	-	①	15年
	地下鉄		②	②	-	60年
4)清掃施設	清掃工場		①②	①	①	15年（プラント） 50年（建物）
	破碎工場		①②	①	①	15年（プラント） 50年（建物）
5)処理施設	下水処理場		-	①	-	-
	污泥焼却場（下水）		-	①	-	-
	管きよ（下水）		①	-	①	50年
	浄水場（上水）		-	①	-	-
	配水・給水管（上水）		①	-	①	50年
6)公園・緑地		都市公園、緑地	①	-	①	20年

注：①組み合わせ法、②産業連関分析の応用

以上の問題点に対し、本研究では ELCEL 概念を導入することによって、既往 LCA 研究で一般に行われてきた同一機能の代替案比較にとどまらず、さらに都市空間を変化させる施策の実施に伴う環境負荷変化の推計を可能としている。さらに、本研究では次の点に配慮している。

a)評価対象範囲と分析単位：対象範囲は名古屋市中心部とし、分析は第3回中京圏パーソントリップ調査の基本ゾーン（総数 108、ほぼ小学校区に相当）を単位として行う。この方法では、ゾーン内の施設・建築物を平均化して扱わざるを得ないための弊害は否めないが、ゾーンベースの立地モデル・交通モデルと組み合わせることによって LCA を都市空間施策の効果に関する分析に適用できることが大きなメリットである。

b)対象施設：表－1に、分析の対象とする施設・建築物の種類と、適用する LCI (Life Cycle Inventory) 手法、設定耐用年数をまとめている。盛岡らの研究と同様に、建築物・交通施設・上下水道・廃棄物処理を扱っている。また、既存緑地の開発や緑地・公園の新規整備に伴って生じる、緑地・公園の樹木による CO₂ 固定効果も扱う。下水処理場と浄水場（上水）において建設・廃棄を扱っていないのは、対象都市においてこれらの施設が新規建設・廃棄されておらず、既存施設を補修しながら使用し続けていることから、この補修分については維持管理に含まれているためである。また、工場などの施設は、本研究で扱う施策の直接的な対象とはしていないことから、推計対象には含めていない。

住宅の耐用年数に関しては、3章で説明する住宅コーホートモデルによって推計を行う。

c)環境負荷評価指標：黒田らは CO₂、盛岡らは CO₂・

エネルギー消費・廃棄物発生を扱っている。その他、既往のインフラ LCA 研究の多くは CO₂ やエネルギー消費を評価指標としてきた。本研究では、LCA の特徴の 1 つである各種環境負荷の網羅的把握と統合評価を行うために、鶴巻ら⁹⁾の内包環境負荷原単位を用いて、CO₂・エネルギー消費・廃棄物発生・水資源消費、NO_x・SO_x・BOD・COD・T-N・T-P を合わせた計 10 項目の環境負荷の Inventory を作成する。

さらに、推計した複数の環境負荷を 1 つの指標に統合し、負荷間のトレードオフを考慮可能とするために、加藤ら⁹⁾によって定義された統合評価値「環境への優しさ指数」(EFP: Environmental Friendliness

Point) を導入する。これは「ターゲット法」と呼ばれる方法を用いて定義されており、具体的には、a)推計した環境負荷を、地球温暖化 (CO₂)・酸性化 (NO_x、SO_x)・水質汚濁 (COD、T-N、T-P)・大気汚染 (NO_x、SO_x)・エネルギー消費・廃棄物発生¹⁰⁾の 6 カテゴリーに分け、各カテゴリ内で環境影響の大小に比例した重み付け (characterization) によって物質量から環境影響ポテンシャル量への変換を行い、b)各環境影響ポテンシャル量を、その環境基準や埋蔵量・許容発生量との比で規準化し、カテゴリ間の重み付けを行う、という方法である。ターゲット法は、LCA に関する研究や実施事例において広く用いられており、アンケート調査による方法に比べて科学的客観性が高いと考えられている。ただし、環境基準等の設定の妥当性が難点であり、特に本研究では都市空間構造の長期的変化を評価することから、重み付け値の時間変動が大きな問題となる。例えば、廃棄物発生に関する重み付け値は、最終処分場の容量制約によって設定している。日本の大都市では廃棄物処分に関する状況が逼迫していることから、本研究で用いる廃棄物発生¹⁰⁾の重み付け値も大きくなっているが、この値は廃棄物発生量そのものや、最終処分場の新規建設動向によって変化するものである。本来的には、このような環境基準等の変化に伴う重み付け値の時間変動が内生化されることが必要であるが、そのためには環境負荷発生と環境基準等変化との関係を経年的に予測する必要があり、それは非常に困難であることから、本研究では便宜的に、重み付け値を時間によらず一定値に設定している。この場合、一般に環境負荷発生が多くなるほどその後の環境基準等をより厳しくする必要が出てくると考えられることから、EFP 指標では値の増加を過小評価していることになる。

年齢 t	0	1	2	3	...	総戸数
年次 y						
y	$C_{0,y}$	$C_{1,y}$	$C_{2,y}$	$C_{3,y}$	...	$\sum C_{t,y}$
y+1	$C_{0,y+1}$	$C_{1,y+1}$	$C_{2,y+1}$	$C_{3,y+1}$	...	$\sum C_{t,y+1}$
y+2	$C_{0,y+2}$	$C_{1,y+2}$	$C_{2,y+2}$	$C_{3,y+2}$	...	$\sum C_{t,y+2}$
y+3	$C_{0,y+3}$	$C_{1,y+3}$	$C_{2,y+3}$	$C_{3,y+3}$	...	$\sum C_{t,y+3}$

図-2 住宅コーホート

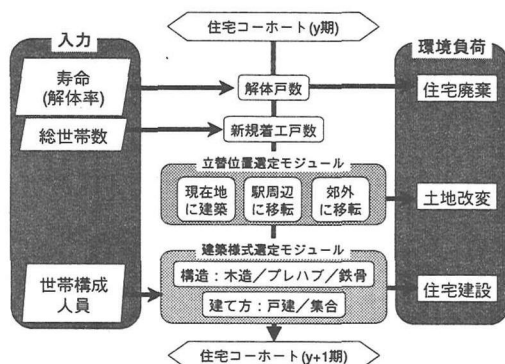


図-3 住宅コーホートモデルのフロー

d) 将来予測の前提シナリオ: 本モデルで必要となる外生変数については、現在のトレンドの延長をとるか、現在値をそのまま与えている。対象地域（名古屋市）全体の人口・世帯数は名古屋市の予測値を参考にそれを延長して用いており、人口は2020年から減少し、住宅の建て方や構造種別に影響する世帯あたり人口は現在のトレンドで漸減すると仮定している。

3. 評価システムへの住宅コーホートモデルの導入

本研究では、都市内の住宅に対する施策として、省エネ化と耐用年数の延長を扱う。黒田らの研究では、環境負荷削減施策の実施に伴う効果を実施後のある時間断面で推計している。しかし、実際には、施策実施による都市空間構造変化の過程で、建物の更新を中心とした環境負荷が発生するため、それを考慮することが重要である。そのため、本研究では住宅を対象とした建物コーホートモデルを構築し、経年での建物更新や更新建物を駅周辺へ立地誘導することによる負荷の変化を扱う。

住宅コーホートの例を図-2に示す。各年齢（ t 歳）における住宅の解体率 $1-r_t$ （人口分析における死亡率に相当、 r_t は残存率<生存率>）を用いて y 期の解体戸数 $\sum_t r_t C_{ty}$ を、また新規着工率（出生率）から y 期の新規着工戸数 C_{0y} を求め、これらを加減することで $y+1$ 期

における $t+1$ 歳の総戸数 $\sum_{t+1} C_{t+1,y+1}$ が計算でき、住宅の年齢構成の変化を経年的に追跡することができる。本研究では、このコーホートモデルを名古屋市内の住宅に適用している。さらに、コーホートは各ゾーンに設定し、コーホートの更新にあたっては、図-3に示すように新規建物の位置や建築様式の選定も同時に行うことで、これらを変更する施策の実施効果も分析可能としている。

推計に必要な変数のうち解体率は、名古屋市内のデータが得られなかったため、野城¹⁰⁾による全国を対象とした建て方別構造別のデータを適用している。またこのデータに従って1期を5年としている。一方、新規着工率については、あらかじめシナリオで与えられたゾーン別の世帯数増減を用いて、ゾーン別に設定する方法をとっている。住宅の建て方別（戸建/集合）の割合については、ゾーン別の世帯あたり人口に関する予測結果を利用し、従来のデータを用いて推定した世帯あたり人口と建て方別割合との関係式を利用して予測を行っている。世帯あたり人口は漸減の傾向にあり、世帯あたり人口が減るほど集合住宅の割合が増えることから、集合住宅の建設が将来的に増加する傾向になる。また、構造種別（木造/S造/RC・SRC造）についても経年的に変化すると考えられるが、本研究ではそれを予測することができなかったため、便宜的に平成5年度住宅統計調査による区ごとのデータを基本とし、これを区内の各ゾーンに世帯比率を考慮して配分している。

4. 各施設・建築物の環境負荷推計手法

(1) 適用する LCI 手法

対象とする各都市内施設・建築物に適用したライフサイクル環境負荷推計（LCI）の手法は表-1に示したとおりである。基本的には①組み合わせ法を適用し、入手データの制約に応じて②産業連関分析の応用を併用している。

①組み合わせ法：各施設・建築物の建設・維持管理・廃棄やそれを利用する諸活動において、その単位あたり必要な原材料の量を「原材料マトリックス」として、既往のデータからあらかじめ作成する。それに各施設・活動の量を乗じることで、環境負荷発生の原因となる原材料消費量が推計され、さらに産業連関表から求められる内包環境負荷原単位を乗じて環境負荷を求める。使用する原単位は、前述の鶴巻らによる1990年の産業連関表（91分類）を基にした多項目内包環境負荷原単位である。この原単位は、1990年の単位生産者価格あたりの発生負荷量として表されている。一方、大部分の原材料・エネルギー消費量は物量ベースで求められているため、価格ベースに変換する必要がある。そのため、建設物価資料をもとに各原材料の量を1999年価格に変換し、それを建

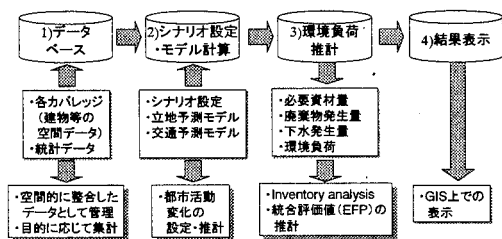


図-4 推計システムの全体構成

設計計要覧¹³⁾のデフレータを用いて1990年価格に変換する。さらに、産業連関表から得られる各原材料の粗付加価値分を差し引いて生産者価格に変換したものを用いる。廃棄時については、建設時に使用した資材が廃棄されるものとして、その重量から発生負荷を算出している。

②産業連関分析の応用：一部のデータについては、金額ベースでしか得られないものがあるため、その場合には、前出の内包環境負荷原単位（金額ベース）をそのまま乗じて環境負荷を推計する。

なお、本モデルでは、内包環境負荷原単位を利用した環境負荷推計のほかに、一般廃棄物、上水需要量・下水発生量の推計も行う必要がある。一般廃棄物については、年間1人あたり一般廃棄物発生重量を、人口や生産額で説明する重回帰モデルを作成している。また、各ゾーンの発生量推計値から回収車両の清掃工場とゾーン間のOD表を作成し、最短経路による配分を行って車両走行による負荷を計算する。上下水については、需要量・発生量の推計結果から、必要となる資材量を推計する。その後、シナリオやモデルの出力結果を用いて環境負荷の推計を行う。

また、交通活動に伴う環境負荷は、各ゾーンの立地量から交通需要予測モデル（四段階推計法）を用いて各道路・鉄道区間の交通量および燃料・電力消費量を求め、さらに内包環境負荷原単位を乗じて環境負荷を推計している。

(2) 推計のためのコンピュータ・システム

本研究では、都市全体の施設・建築物を推計対象とすることから、必要となる膨大な空間データの取り扱いを簡略化することが重要である。そこで、ワークステーション上で動作するGIS（地理情報システム）ソフトウェアのArc/Infoおよびその言語であるArc Macro Language (AML)を用いてシステムをプログラム化している。また、ユーザーの操作性を高めるために、GUIによる対話式メニューを作成している。

システムは図-4に示すように、1)データベース、2)シナリオ設定・モデル計算、3)環境負荷推計、4)結果表示の4つのモジュールから構成される。1)データベースモ

表-2 設定した施策シナリオ

分類	施策	設定	効果・影響 (①BAUとの比較)
BAU	①BAU	すべてトレンド	—
住宅仕様	②耐用年数増加	平均耐用年数を2倍	・建設廃棄物減少 ・廃棄建物減少によるエネルギー消費減少
	③断熱性能向上	冷暖房エネルギー消費を30%削減	・建物利用時エネルギー消費量減少 ・建設時発生負荷増加
	④主要駅付近への住宅誘導	更新住宅のうち鉄道結節点・終点駅がないゾーンの住宅をあるゾーンに誘導	・地下鉄分担率上昇 ・自動車総トリップ長減少
都市空間構造	⑤緑地新設	空地の緑地化	・CO ₂ 固定

ジュールでは、各種の空間データを主題図(カバレッジ)として属性データとともに管理している。環境負荷原単位などの空間に関係しないデータは、単純なデータベースとして管理する。2)シナリオ設定・モデル計算モジュールは、各種施策に伴う影響を予測する部分である。本研究では、3章で説明した住宅コーホートモデルのほかに交通需要推計モデルを構築しており、さらに立地や交通に関する他のモデルを追加することも容易な設計としている。3)環境負荷推計モジュールは、2)の結果を用いて環境負荷を4(1)節のLCI手法に基づいて推計し、さらに統合評価値であるEFPを推計する。最後の4)結果表示モジュールで、元データやモデル計算結果、および環境負荷推計結果の表示を行う。

5. モデルシステムを用いた施策分析

(1) 検討する施策オプション

本システムを用いて、都市のインフラ・住宅の更新や配置変更、および交通施設整備に関する各種施策の実施に伴うLCELおよびELCELの分析が可能である。本稿ではそのうち、表-2に挙げた住宅仕様および都市空間構造変化に関する施策を1991年から実施した場合について、その後50年間のLCEL・ELCELの推計結果を示す。「①BAU (Business As Usual)」は、すべての施策が現状のトレンドで推移した場合である。住宅仕様に関する施策(②, ③)および都市空間構造改変に関する施策(④, ⑤)については、単独実施とともに、複数の施策を組み合わせた場合についての推計も行っている。

(2) 住宅仕様変更施策に伴うLC環境負荷の変化

図-5に、「①BAU」、「②住宅耐用年数増加」（新規住宅の平均耐用年数を従来の2倍とした場合）、「③断熱性能向上」（冷暖房エネルギー消費を従来の30%削減した場合）についての、住宅起源LC-CO₂の推移を示す。①の場合、1991～95年から2036～40年までの50年間

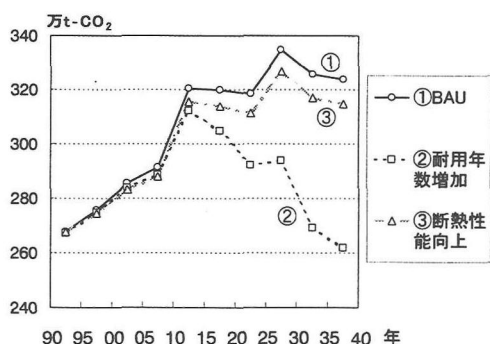


図-5 住宅施策実施に伴う住宅LC-CO₂の推移

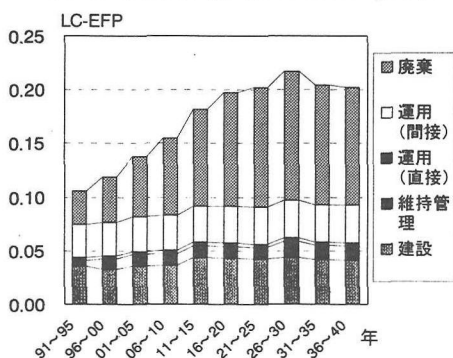


図-6 ①BAUでの住宅LC-EFPの推移と内訳

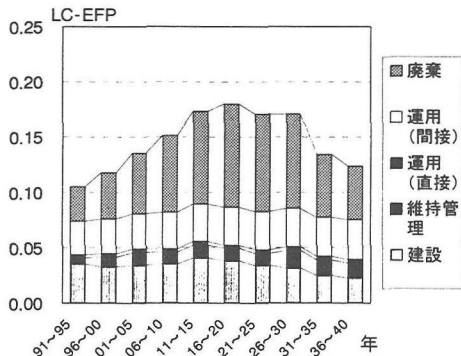


図-7 ②住宅耐用年数が2倍に増加した場合の住宅LC-EFPの推移と内訳

で21.0%増加している。②の場合は、耐用年数増加に伴って、後になるほど解体や新規建設に伴う環境負荷が削減されることから、2011～15年以降はLC-CO₂が減少に転じ、2036～40年においては1991～95年比で2.1%減、BAU比で19.1%減となっている。他の環境負荷についても、LC-エネルギーが1991～95年比2.9%増(2036～40年のBAU比15.4%減)、LC-NO_xが6.2%減(同23.7%減)、LC-廃棄物が51.8%増(同65.0%減)となると推計され、長期的に見ると負荷削減効果が非常に高いことが分かる。

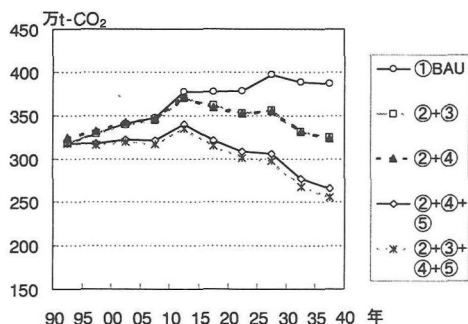


図-8 都市構造改変施策実施に伴う住宅・社会基盤施設のLC-CO₂の推移

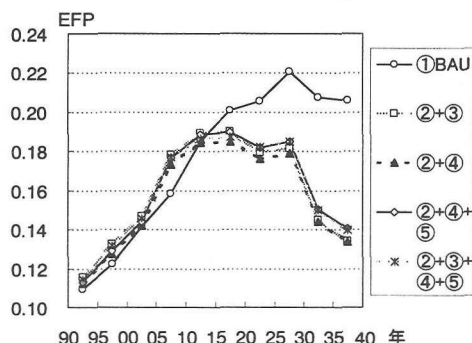


図-9 都市構造改変施策実施に伴う住宅・社会基盤施設のLC-EFPの推移

一方、③の場合、2036～40年のLC-CO₂はBAUに比べて2.7%減少しているものの、1991～95年比で17.6%増となっている。これは、住宅の運用分が断熱効果の増加によって1991～95年比で8.5%増にとどまっているにもかかわらず、断熱化による建築資材増加が上乗せされているためである。他の環境負荷についても比較すると、LC-エネルギーで16.3%増(2036～40年のBAU比2.0%減)、LC-NO_xで17.9%増(同0.5%減)と推計されている。

次に、①と②の場合の住宅起源LC-EFPについて、経年変化と内訳を示したのが図-6および図-7である。①においては、建設時の負荷は、戸建住宅建設が減少する一方で集合住宅建設が増加することから、ほぼ横ばいとなっている。また、廃棄が全体に占める割合が大きく、2036～40年においては全体の54.1%を占めている。これは、本研究で用いたEFP指標では廃棄物の重み付けが大きくなっているためである。②の場合、建設時の負荷が着工戸数減に伴って減少するとともに、維持管理、廃棄による負荷も減少している。結果的に、LC-EFPの合計も2021～25年以降は減少に転じ、2036～40年にはピーク時の2016～20年と比べて28.6%減少すると推計される。

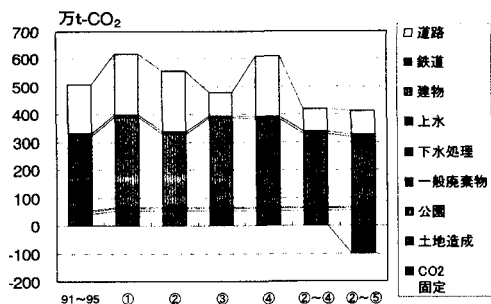


図-10 施策実施に伴う ELC-CO₂ の変化

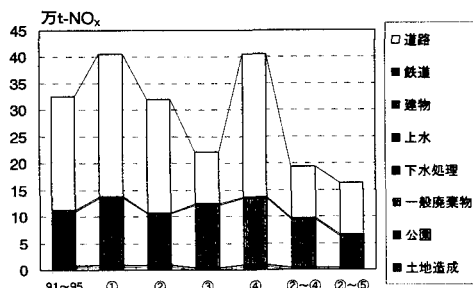


図-11 施策実施に伴う ELC-NO_x の変化

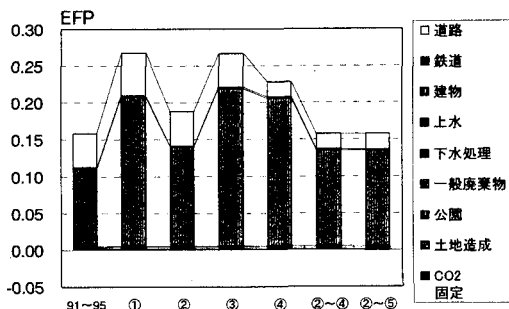


図-12 施策実施に伴う ELC-EFP の変化

(3) 都市構造改変施策実施に伴う LC 環境負荷の変化

表-2に示した施策のうち、前節の施策②、③に加え、「④主要駅付近への住宅誘導」（各期に更新される住宅のうち鉄道の結節点・終点となっている駅がないゾーンにあった住宅を、鉄道結節点駅があるゾーンに移転・新築する）と、さらにそれによって空いた土地を緑化する「⑤緑地新設」を行った場合を想定し、各施策実施に伴う住宅および社会基盤施設に関する LC-CO₂ と LC-EFP を推計した結果を図-8、図-9に示す。ここで、緑地による CO₂ 固定効果については、市村ら¹²⁾による面積 1ha あたり 30t-C という値を用いる。

「①BAU」の場合、LC-CO₂ は 1991~95 年から 2036~40 年までの 50 年間で 21.6% 増加する。②・③を同時に実施する場合には、2015 年までは増加するが、それ以

降は減少し、2036~40 年では 1991~95 年比で 2.2% 増（2036~40 年の BAU 比 16.0% 減）にとどまる。②・④の場合も同様の傾向をとり、50 年間の増減はほぼゼロとなる。②・④・⑤を同時実施した場合、樹木による CO₂ 固定効果によって LC-CO₂ が 1991~95 年比で 31.5% 減少し、さらに③を併せて実施すると 34.6% 減となる。なお⑤ケースでは、1991~2040 年の間に、名古屋市の総面積 326km² に対し、約 91km² もの既存宅地が主要駅周辺に移転し、空地が緑地に転換される計算になっている。

また、LC-EFP については、①の場合、50 年間で 89.0% 増加となるが、②~⑤を実施した場合は 21.2% 増にとどまる。各ケース間の実施効果にはほとんど差がないのは、EFP に廃棄物が大きく寄与しており、いずれの施策も廃棄物削減効果が大きい②を含むためである。

(4) 各種施策実施に伴う ELCEL 変化の比較

住宅・社会基盤施設自身の LCEL に加えて、都市構造（住宅立地）に伴って変化する交通活動の環境負荷を含め、表-1で挙げた住宅・社会基盤施設全体の ELCEL を推計した結果が図-10~図-12である。この図では、「①BAU」における 1991~95 年（左端の項目）および 2036~40 年の ELCEL と、各施策を 1991 年から実施した場合の 2036~40 年における ELCEL を、CO₂・NO_x・EFP で示している。なお、図中の「一般廃棄物」は、家庭や業務から発生して行政が収集する分であり、各社会基盤施設・建築物から発生する廃棄物（大部分は産業廃棄物）の分は各項目の中に別途含まれている。

これらの図から、a)ELCEL の大部分が道路（自動車）および建物（住宅）に起因すること、b)NO_x のような大気汚染では道路が、廃棄物の寄与が大きい EFP では住宅がより多くの割合を占めること、c)②~⑤の施策を同時実施することで、2036~40 年の ELC-CO₂・ELC-NO_x・ELC-EFP を 1991~95 年比（BAU 比）でそれぞれ 39.1% 減（49.8% 減）、51.9% 減（61.4% 減）、1.1% 減（41.5% 減）に抑制できること、が分かる。

6. 結論

本研究では、都市構造改変施策の実施が都市活動の環境負荷発生に及ぼす長期的影響を LCA 的に評価するモデルシステムを開発した。このモデルはゾーンを分析単位としており、立地や交通に関する既往モデルとの連携が可能である。モデル内には、住宅を対象とした建物コーホートモデルが導入され、住宅の更新過程が再現されることから、都市構造や住宅に対する施策の変更を分析することができる。また、モデルシステムは GIS をプラットフォームとして開発されており、都市空間に関する複雑な各種データの導入や分析が容易となった。さらに、

インフラに関する LCA では従来あまり実施されてこなかった多項目環境負荷の推計と、それらを統合した指標である EFP を用いた評価を行うことができた。

モデルを用いた予測や施策分析によって得られた知見の概要は以下の通りである。

- 1) 現状のトレンドで推移した場合、名古屋市の都市施設・建築物に伴う LC-CO₂ は 1991 年～2040 年の間に約 2 割増加すると推計される。廃棄物も大幅増加し、2021 年以降には 1990 年の約 3 倍となる。しかし、総合的な削減施策の実施によって各環境負荷を減少の方向に転換させることが可能である。
- 2) EFP で評価した場合、全体のうちで廃棄物の占める割合が非常に大きくなる。そのため、住宅の耐用年数増加が建設および廃棄時の負荷の減少を通じて EFP 減少に大きく寄与する。
- 3) 住宅に伴う LCEL は、土地造成や一般廃棄物・下水処理に伴う LCEL に比べて非常に大きく、したがって環境負荷削減において重要な要素である。
- 4) 都市内の住宅を駅周辺に立地転換させることは、交通に伴う環境負荷の削減を通じて ELCEL 減少に大きく寄与する。この量は住宅の耐用年数増加に伴う削減量に匹敵する。
- 5) 住宅立地の駅周辺誘導と同時に空地緑化を実施することで、より大きな CO₂ 削減効果が得られる。

本研究では都市構造改変施策に伴う環境負荷削減効果のうち、立地集中に伴うヒートアイランド現象変化や、コジェネレーション・地域冷暖房システム導入可能性変化については推計を行っていない。今後はこれらをモデルに取り込みつつ、都市空間構造に関するより幅広い施策分析への応用を考えている。

参考文献

- 1) G. B. Dantzig et al: Compact City; A Plan for Livable Urban

Environment, W. H. Freeman and Company, 1973.

- 2) 尾島俊雄：建築が地球環境に与える影響 IV エコシティ、社団法人日本建築学会、1992.
- 3) A. Blowers: Planning for a sustainable environment; A report by the Town and Country Planning Association, Earthscan, p.150-189, 1993.
- 4) 加藤博和：交通整備による環境インパクトの計測手法としてのライフ・サイクル・アセスメント、交通工学 Vol.33 No.3, pp.81-86、1998.
- 5) 伊藤武美、花木啓祐、本多博：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.24、pp.250-271、1996.
- 6) 藤田壮、盛岡通、村田昭人：都市集積地区から派生するライフサイクル二酸化炭素の評価の都市マネジメントへの展開についての考察、環境システム研究 Vol.27、pp.355-364、1999.
- 7) 黒田勝彦、池亀建治、杉山郁夫、池島賢治、西田純二：都市における CO₂ 排出抑制政策の総合的・定量的評価に関する研究、土木計画学研究・講演集 No.22(1)、pp.655-656、1999.
- 8) 鶴巻峰夫、野池達也：LCA における多項目環境負荷量の定量化に関する研究、環境システム研究 Vol.25、pp.217-226、1997.
- 9) 加藤博和、林良嗣、大浦雅幸：新規交通施設整備に伴う環境負荷変化の LCA に基づいた評価モデル、環境システム研究論文発表会講演集 Vol.28、2000.
- 10) 野城智也：建設量と現存量の比較に基づく建物の寿命分布の試算、日本建築学会計画系論文集第 464 号、pp.101-111、1994.
- 11) 建設省建設経済局、建設統計要覧.
- 12) 市村恒土、岡田孝幸、柳井重人、丸田頼一：都市公園における樹木の二酸化炭素固定効果に関する研究、第 34 回日本都市計画学会学術研究論文集、pp.1-6、1999.

A LIFE CYCLE ESTIMATION SYSTEM OF VARIOUS ENVIRONMENTAL LOADS IN URBAN SPACE RESTRUCTURING

Yoshitsugu HAYASHI, Hirokazu KATO, Yasuo KITANO and Sachiko KIYONAGA

Environmental issues resulting from the restructuring of urban space is a common problem among urban areas. In order to address these issues, it is necessary to evaluate the global and local impacts of the environmental load being generated. This paper presents a model system to estimate the major environmental load in a city. The model highlights the treatment of most infrastructure and buildings comprising the study area. Environmental load is estimated using the method of Life Cycle Assessment (LCA). The model also estimates the impact of additional buildings and infrastructures to the environmental load. The estimated values of environmental load are summarized as an integrated indicator referred to as "Environmental Friendliness Point" (EFP). Finally, the effectiveness of the model is clarified by applying various house-building measures and urban spatial structural changes.