

10. 都市域縮退策による環境負荷削減可能性 検討のための推計システム

後藤 直紀¹・柴原 尚希^{2*}・加知 範康²・加藤 博和²

¹独立行政法人都市再生機構埼玉地域支社埼玉中央開発事務所

(〒336-0973 埼玉県さいたま市緑区大字南部領辻4124)

²名古屋大学大学院環境学研究科(〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町C1-2(651))

* E-mail: shibahara@nagoya-u.jp

本研究では、都市空間構造と環境負荷発生量の関係を詳細に分析するために、都市域の建築物・インフラの建設・運用・維持管理・廃棄活動や、その上で行われる諸活動に伴う環境負荷を、約500m四方のメッシュ単位でLCAを用いて推計するモデルシステムを構築している。建築物・インフラストックの時間的・空間的变化をコーホートモデルによってシミュレートしている。環境負荷としてCO₂など5種類を取り上げ、さらにそれらの統合評価も行っている。システムを実際の都市に適用した結果、居住人口あたり環境負荷は都心より郊外の方が大きいことがわかる。また、コンパクトシティ化策を評価したところ、建築物・インフラのライフタイム内で再編時の発生環境負荷を供用段階の削減分で回収できることが示される。

Key Words : *urban structure, life cycle assessment, compact city, cohort model*

1. はじめに

地球温暖化に代表される地球規模での環境問題に対応するため、各分野で膨大な資材・エネルギーを投入・消費する都市域における対策が国際的に緊急の課題となっている。日本においても、2007年3月に「地球温暖化対策地域推進計画策定ガイドライン」が改定され、地方自治体レベルでの地球温暖化対策の計画策定、実施が本格化しつつある。

しかし、日本の都市では、高度経済成長期以降、人口増加やモータリゼーション進展を背景に、都市域のスプロールの拡大が進展してしまっている。このような都市は、自動車利用による環境負荷発生量が多くなる上、道路や上下水道といったインフラの必要量も人口に比して多くなるため、その維持管理・更新活動に伴い発生する環境負荷量も多い傾向があると考えられる。したがって、長期的かつ抜本的な環境負荷削減のためには、都市空間構造の見直しが必要である。

このような認識を踏まえ、近年では「コンパクトシティ」の概念が、環境負荷が少なくQOL(Quality Of Life)の高い持続可能な都市・地域構造を実現するものとして認

識され、富山市や青森市において既に政策として実施されている。しかし、コンパクトシティへの再編がそのまま低環境負荷型の都市空間構造の構築であるとは即断できない。まず、コンパクトシティ化が諸活動による環境負荷を削減する効果を実証する必要がある。そして、それが確認されたとしても、都市域を再編する際には、既存建築物の廃棄や建築物・インフラ群の新規建設による環境負荷の発生が伴うことから、その考慮も必要となる。

本研究では、都市内の建築物・インフラの建設・維持管理・運用・更新・廃棄活動や、その上で行われる諸活動に伴い生じる環境負荷が都市構造によっていかに変化するかを、定量的かつ包括的に推計するモデルシステムを構築することを目的とする。そのために、都市・地域LCA(Life Cycle Assessment)の手法を用いて、都市域の多種のライフサイクル環境負荷を包括的に推計するシステムを構築する。その際、既往研究ではなされていない詳細な空間単位(約500m四方に細分化した4次メッシュ<約0.263km²>単位)で推計を行う。さらに、これを実都市に適用することで、都市空間構造と発生環境負荷の関係を分析するとともに、コンパクトな都市空間構造への再編が環境負荷削減効果を生じ得るかについて検討を行う。

2. 都市域ライフサイクル環境負荷推計システム

(1) 都市システム LCA の特徴

都市システムを対象とするLCAは、単一の建築物・インフラを対象とするLCAと異なる特徴がある。単一建築物・インフラにおける「ライフサイクル」は、工業製品と同様に、原料採取、材料製造、製品製造・建設、運用、維持管理、廃棄のプロセスである。一方、都市システムの場合、システムを構成するすべての建築物・インフラを、各時間断面で総和して考える。各建築物・インフラのライフサイクルの間にはそれぞれズレがあるため、都市システムの「ライフサイクル」の各段階は、同時並行的に現れていくことになる。

(2) 評価対象範囲の設定

本研究で構築するシステムの評価対象とする空間・時間的範囲を定義する。

a) 空間的システム境界

本研究では、建築物・インフラの複合体である都市を「1 都市システム」として捉え、そのシステムを構成する建築物・インフラがライフサイクルで発生する環境負荷はもとより、これらの上で行われる諸活動に伴い生じる環境負荷も評価範囲として扱う。表-1 に評価対象とする建築物・インフラの種類を示す。建築物のうち住宅のみを対象とし、業務に供される建築物は扱わない。インフラについては道路・鉄道・上下水道・公園を扱う。また、交通活動については、旅客交通分に限って推計を行う。建築物内で行われる諸活動については、建築物の運用段階として建築物起源の環境負荷に含めて扱う。

b) 時間的システム境界

2000年から2049年までを対象期間とし、1期5年を単位として計算を行う。

(3) LCA の手順

a) インベントリ分析：評価する環境負荷と使用原単位

環境負荷原単位として、日本建築学会作成(2006年改訂)のもの¹⁾を使用している。そこで提供されているのは、地球温暖化に寄与する二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)、また、酸性化や大気汚染に寄与する硫黄酸化物(SO₂)と窒素酸化物(NO_x)であり、本研究でもこれら5種の環境負荷をインベントリ分析の対象として扱う。

b) インパクト評価：各環境負荷の統合化

LCA におけるインパクト評価とは、地球温暖化、オゾン層、大気汚染、酸性雨、富栄養化といった環境影響カテゴリ毎に、インベントリ分析により求められた各環境負荷物質の重要度・役割を評価するとともに、場合によっては統合化までを行うプロセスである。

表-1 分析対象とライフタイムの設定

分類	都市施設	細分類	耐用年数	備考
建築物(住宅)	戸建住宅	木造	25年	民生(家庭)部門含む
		R造	35年	
	集合住宅	木造	25年	
		RC・SRC造	50年	
交通施設	道路	アスファルト舗装を仮定	10年	「切削オーバーレイ工事」を対象 走行分は交通活動に計上
	鉄道		—	
処理施設	下水管渠		35年	
	配水管		35年	
公園	都市計画公園	住区基幹・都市基幹・特殊公園	30年	
交通活動	—	旅客交通	—	ELCEL として評価

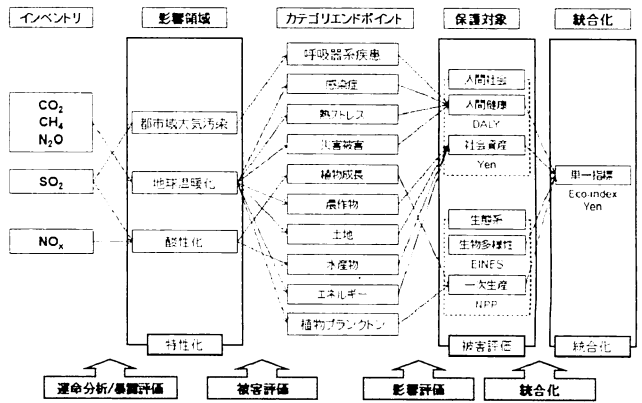


図-1 本研究で扱う環境負荷インパクトのパス(LIME2に従う)

本研究では、日本版被害算定型ライフサイクル環境影響評価手法(Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling : LIME)の第二版(LIME2)の統合化指標²⁾を用いる。本研究で扱う各環境負荷が与えるインパクトは、LIME2では図-1に示すように定義されている。各矢印において、「特性化係数(各影響領域に及ぼす潜在的影響度を評価するための係数)」「被害係数(保護対象に対して与える被害量を評価するための係数)」「統合化係数(すべての環境影響を単一指標に換算するための係数)」が定量化されている。これらを用いて、統合化指標(コンジョイント分析による貨幣換算の単一指標、単位[円])を算出する。

(4) インベントリ分析の詳細

インベントリ分析のフローを図-2に示す。

a) 建築物・インフラの環境負荷発生量—概略 LCI 手法

本研究では、都市空間構造再編施策のような詳細な仕様データが得られない計画段階における評価を行うため、製品を対象としたLCI(Life Cycle Inventory)において都市全体の膨大な建築物やインフラ、諸活動の環境負荷推計に必要な各々の投入資材量等を厳密に把握することは不可

能である。そこで、各建築物・インフラについて標準的な設計を想定し、その建設・維持管理・運用・更新・廃棄活動において、その単位(例えば、住宅延べ床面積や、下水管渠1m等)あたりの環境負荷を推計して原単位とする。これに空間単位で集計される建築物・インフラのライフサイクル各段階の活動の数量(例えば、下水管渠の更新量等)を乗じて総和をとることで、総環境負荷発生量を推計する。

b) 旅客交通に伴う環境負荷発生量

旅客交通活動に伴う環境負荷発生量を 1 人・1 年あたりの原単位として整備する。対象都市を調査地域に含む第 4 回中京都市圏パーソントリップ調査(PT 調査)の結果から、各 4 次メッシュにおけるトリップ生成原単位、交通手段分担率、交通手段別トリップ長を推計し、それらを式(1)に代入して旅客交通環境負荷発生量原単位とする。この値に、各メッシュ居住人口を乗じて、対象メッシュの旅客交通起源環境負荷発生量が推計される。

$$[e_{trans}(X)]_i = \sum_k e(X)^k l_i^k s_i^k c_i \cdot 365.25 \quad (1)$$

- $e_{trans}(X)$: 1 人年間旅客交通起源環境負荷排出量[kg・X/人年]
- $e(X)$: 環境負荷排出原単位 [kg・X/人 km]
- l : 平均トリップ長 [人 km/trip]
- s : トリップ手段分担率 [trip/trip]
- c : トリップ生成原単位 [trip/人日]
- k : 交通手段(鉄道・バス・自動車・自動二輪・自転車・徒歩)
- i : メッシュ番号
- X : 環境負荷物質(CO₂, CH₄, N₂O, SO_x, NO_x)

c) サブモデル

都市域における現在および将来の居住人口、建築物・インフラの分布状況を把握するために、GIS(地理情報システム: Geographical Information System)の位置情報から、住宅延べ床面積や下水管渠延長距離など環境負荷推計に必要な情報をメッシュ単位で集計する。縮退策を実施しない場合の将来値については、コーホート要因法を基本とした以下の2つの将来予測モデルを用いて推計する。

将来人口推計モデル: 国立社会保障・人口問題研究所³⁾が提供している小地域簡易将来人口推計システムの推計方法に従い、すでに生存している人口については将来生命表を用いて年々加齢していく人口を推計し、新たに出生する人口については将来の出生率を用いて推計する。ある期の人口は期間の最初と最後の 2 時点間の平均値とする。また、4 次メッシュのように狭い空間単位で人口推計を行うと不確実要素の影響を大きく受けてしまうため、将来人口の分布については、対象地域を幾つかに分割したある程度大きな地域単位で将来人口を予測し、各メッシュにその予測人口を配分する方法をとる。人口の配分比率として、2000 年国勢調査地域メッシュ統計⁴⁾に

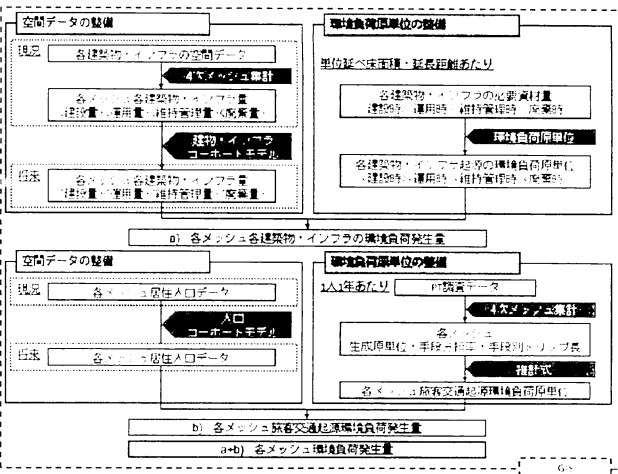


図-2 本システムにおける環境負荷発生量推計フロー

表-2 対象地域の概要(2000 年)

人口 [人]	351,101
面積 [km ²]	290.11
人口密度 [人/km ²]	1,210
世帯数 [世帯]	126,815

(出典: 平成 18 年度版豊田市統計書)

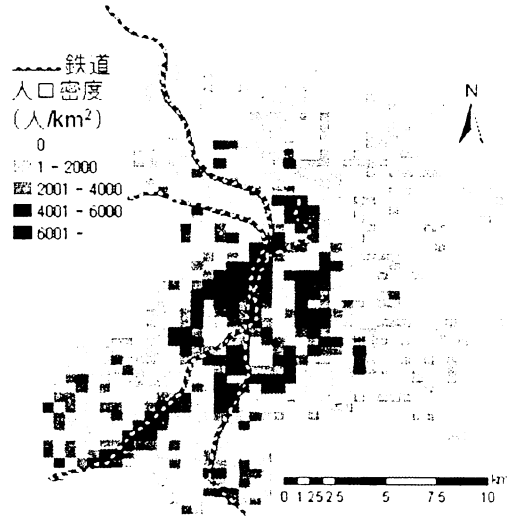


図-3 対象都市における居住人口の空間分布(2000 年)

における 4 次メッシュ毎人口分布と、分割地域単位における人口との比を用い、この比が将来にわたり一定であると仮定する。

将来建築物・インフラ量推計モデル: 対象地域における将来の建築物・インフラの存在量は、次の年次への残存率を表わす $R_{a,t}$ を用いて、 $t+1$ 年における経過年数 $a+1$ の存在量 $P_{a+1,t+1}$ は式(2)のように表される。表-1 で設定した耐用年数内であれば $R_{a,t}=1$ 、耐用年数を迎え除却もしくは更新される場合には $R_{a,t}=0$ となる。

$$P_{a+1,t+1} = R_{a,t} \cdot P_{a,t} \quad (2)$$

ライフタイムは、「減価償却資産の耐用年数等に関する省令」に規定された耐用年数を参考に、表-1 のように

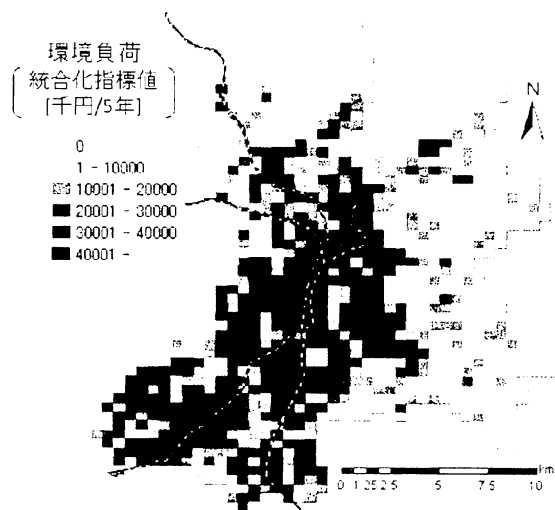


図4 環境負荷発生量合計値

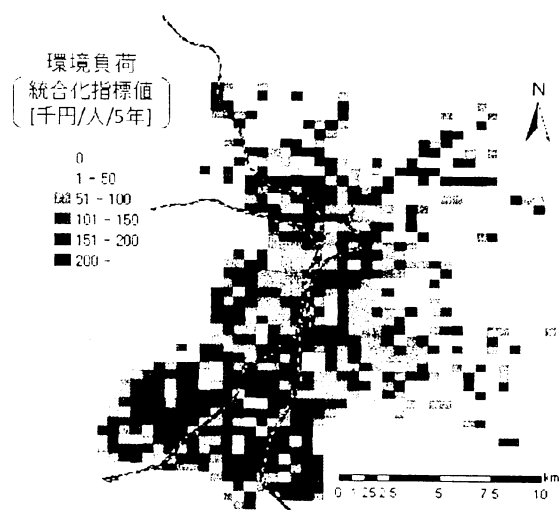


図5 環境負荷発生量(居住人口あたり)

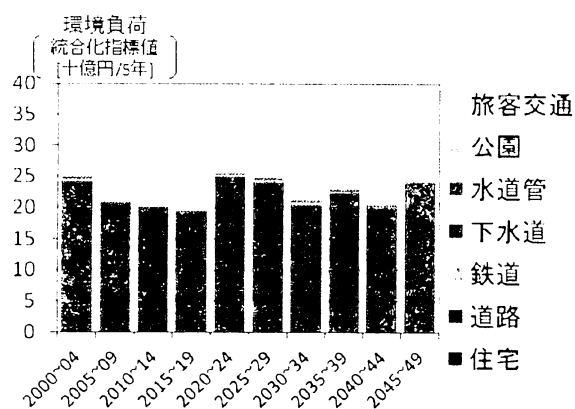


図6 環境負荷発生量時間分布(建築物・インフラ・活動別)

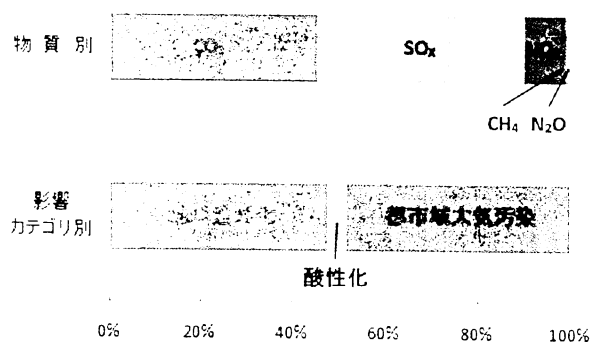


図7 環境負荷発生量割合(合計値)

設定する。

3. 実都市への適用

(1) 対象都市の概要

評価対象都市として愛知県豊田市(2005 年 4 月の合併前の区域)を取り上げる。豊田市は、愛知県のほぼ中央に位置し、自動車産業を中心とした全国有数の工業都市である。名古屋市まで 1 時間以内で通勤可能でありながら名古屋市への通勤者は少なく、独立性の高い都市である。

対象都市の基本データを表-2 に、居住(夜間)人口の空間分布を図-3 に示す。中心駅や市役所の位置する都心部には人口が相対的に多く居住しているが、都心部から離れるにつれて人口密度の低い地区が多くなっており、都市域が低密に広がっていることがわかる。

(2) 環境負荷発生量の空間分布

環境負荷発生量の統合化指標値(貨幣評価値)の空間分布を図-4 に示す。後述のように、大部分は住宅・旅客

交通起源のため、多量に発生する地区は、図-3 の居住人口が多い地区と同様の分布傾向となる。そこで、居住人口あたり環境負荷発生量の推計結果を図-5 に示す。この分布から、郊外部が相対的に多くの環境負荷を発生していることがわかる。大半は、農地から転用された居住地がスプロール状に広がっている地区である。

(3) 環境負荷発生原因の割合

環境負荷の統合化指標値の推移について、図-6 に建築物・インフラ・活動別でみたものを示す。住宅・旅客交通に伴う環境負荷が大きな割合を占めることがわかる。2020 年～2029 年の住宅が高い値となるのは、高度成長期に建設された住宅が更新時期を迎えるためである。

図-7 に、物質別および影響カテゴリ別に評価期間の合計でみた割合を示す。CO₂とSO_xによる影響が大きいことがわかる。特にSO_xは、発生量はCO₂と比べると相対的に少ないが、少量でも環境に与える影響が大きいことから、統合化指標値では大きな割合を占めている。

(4) DID 内外の居住人口あたり環境負荷の違い

DID(Densely Inhabited District：人口集中地区)と DID 外に

分けて居住人口あたり環境負荷発生量(2000~04 年)とその内訳を集計した結果を図-8 に示す。この結果から、DID 外居住者の方が 1 人あたり環境負荷発生量が約 14% 大きいことがわかる。特に、住宅や道路、水道管からの環境負荷発生量は DID 外居住者の方が大きくなっている。これは、郊外の方が住宅延べ床面積が大きく、居住人口あたりインフラ供給量も大きいためである。以上から、DID 外から DID に人口を移転させるコンパクト化策が環境負荷削減効果を持つ可能性が示唆される。

なお、旅客交通による環境負荷発生量は、DID 居住者と DID 外居住者として大差はなかった。本研究では、自動車分担率や世帯当たり自動車保有台数が全国平均から突出して高い豊田市を対象としているが、DID 内外問わず自動車を利用する居住者が多いという傾向は、日本の地方都市に共通である。しかし、都心部では公共交通整備や歩行者・自転車利用促進に配慮する施策が実施しやすく、それにより交通起源環境負荷発生量を低下させることは可能であると予想される。

4. 都市域縮退策実施に伴う環境負荷変化の分析

(1) 施策の設定

現状において居住人口あたり環境負荷発生量が大きく、かつ市街化調整区域やスプロールしている地域の居住者を都心付近に移転させるといふ、都市域縮退策を実施した場合の環境負荷削減効果を分析する。施策の詳細設定を表-3 に示す。

移転地区は対象都市面積の約15%でありながら、居住人口は全体の約1.5%である。市街化調整区域であるとともに、豊田市の都市マスタープランでは自然的利用を目指す地区とされている。また、図-5より居住人口あたり環境負荷発生量が多い地域である。一方、集結地区は対象都市面積の約0.3%であり、居住人口は全体の約0.5%である。中心駅である豊田市駅の北北西約2kmに位置するものの、市街化調整区域であるため、人口集積が進んでいない。

施策実施プログラムとして2つのシナリオを設定する。2005~09年の期間に、供用年数が何年であろうと全住宅・インフラを解体・移転する「①強制縮退シナリオ」と、2005年以降の各期に更新時期を迎える住宅を順次解体・移転していく「②漸次縮退シナリオ」である。

移転地区メッシュにおいては、住宅と非幹線系の道路・下水管渠・水道管を解体・廃棄する。集結地区では、施策実施時期における、その地区の居住人口あたり住宅延べ床面積・インフラ量を一定として、人口増加の割合に合わせて、新規に住宅や各インフラの整備量を決定す

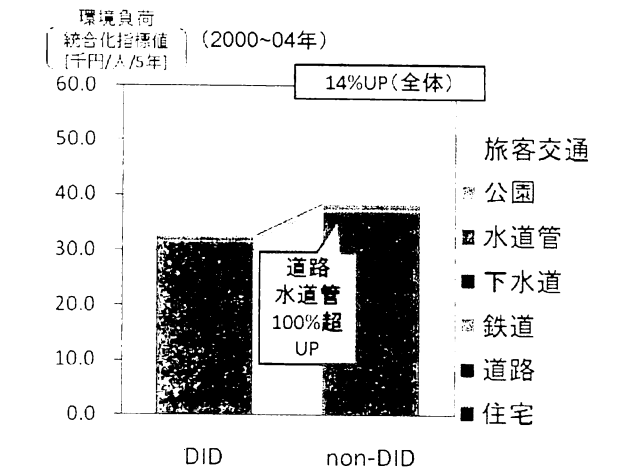


図-8 DID内外の居住人口あたり環境負荷の比較

表-3 都市域縮退策詳細設定	
位置	図-9 参照
移転地区の概要	都市北東部の市街化調整区域で、居住人口あたり環境負荷発生量の大きい地区 2005~09 年平均人口：5,646 人(全体の 1.5%) メッシュ数：186(全体の 14.7%)
集結地区の概要	都心に近く、かつ人口集積が進んでいない地区 2005~09 年平均人口：1,906 人、メッシュ数：4
人口の割り振り	各メッシュに等分
施策実施シナリオ	①強制縮退シナリオ：2005~09 年に全移転 ②漸次縮退シナリオ：2005 年から更新時期に来る住宅から順次移転

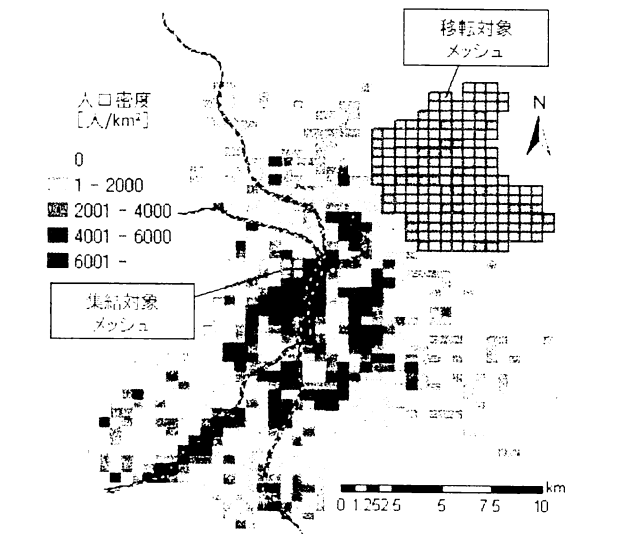


図-9 移転・集結地区

る。住宅はRC造集合住宅に居住すると仮定し、移転者はその土地の旅客交通関連指標(トリップ生成原単位・交通手段分担率・手段別平均トリップ長)を基に交通活動を行うものとする。移転地区における廃棄に伴う環境負荷発生量と、集結地区における新規建設に伴う環境負

荷を考慮し、かつ移転後の環境負荷発生量の推移を推計することで、施策効果を比較・分析する。

2) 縮退策実施による環境負荷変化

施策を実施した場合(with)と実施しない場合(without)の環境負荷発生量の比(with/without)の推移を図-10 に示す。
①強制縮退シナリオでは、2005～09年に大量の移転を伴うため、実施しない場合よりも相対的に環境負荷が増加するが、その後の供用段階においては各期で削減効果が現われている。また、②漸次縮退シナリオでは、2005～24年までは移転に伴う環境負荷発生量を供用段階の環境負荷削減分で相殺する形で、施策実施による環境負荷変化は生じていないが、移転地区人口の7割以上が移転し終わる2025～29年に削減効果が現れ始め、9割以上が移転し終わる2030年以降は大きく削減効果が生じることがわかる。都市域縮退に伴って現状より低環境負荷型の都市空間構造に変更することができると言える。

そこで、各期の環境負荷発生量の累積値を用いて、移転時に発生する環境負荷を、移転後の供用段階における環境負荷削減量をもって、何年で回収できるかを判断する。施策を実施した場合(with)の累積環境負荷値と、しなかった場合(without)の累積環境負荷値の差を図-11 に示す。②漸次縮退シナリオでは、回収に約25年の歳月を要するものの、建築物のライフタイム以内で回収可能であることがわかる。

また、旅客交通よりも住宅起源の環境負荷の方が縮退による削減効果が大きいいため、累積環境負荷でみると、耐用年数に達していない住宅を更新させる①強制縮退シナリオは、②漸次縮退シナリオよりも累積環境負荷削減量が小さい。

5. おわりに

本研究では、約500m四方のメッシュ単位での都市域ライフサイクル環境負荷推計システムを構築し、都市空間構造と環境負荷発生量との関係分析を、詳細な空間単位で行うことを可能とした。システムを実都市へ適用した結果、得られた成果と知見は以下のとおりである。

- 1) 住宅および旅客交通起源の割合が大半を占める。
- 2) 発生量の大きい地区は、居住人口の大きい地区と重なる。
- 3) 居住人口あたり環境負荷発生量は、都心部で小さく郊外部で大きい。
- 4) 都市域縮退策によって現状よりも低環境負荷型の都市空間構造となる。
- 5) 縮退策実施に伴う廃棄・新規建設起源環境負荷は、

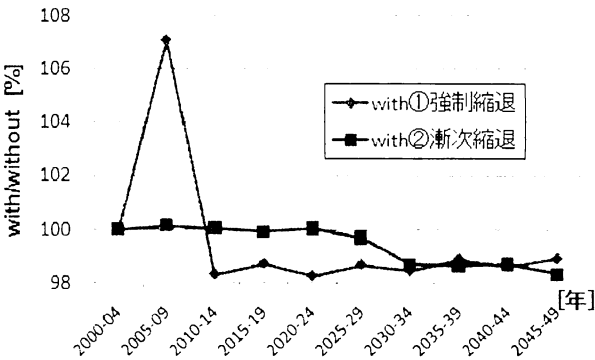


図-10 縮退策実施による環境負荷変化

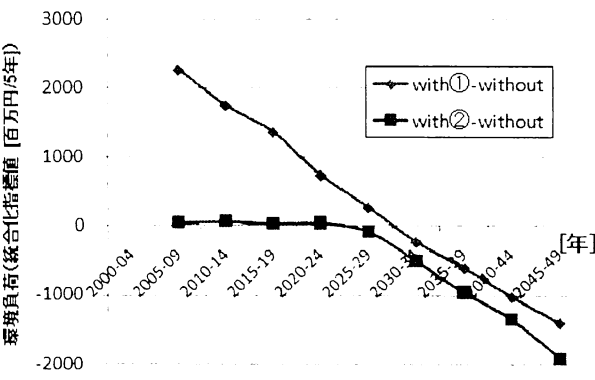


図-11 縮退時発生環境負荷の回収

供用後の削減分で建築物のライフタイム以内に相殺可能である。

- 6) 交通起源環境負荷の削減量が小さいために、強制縮退よりも漸次縮退の方が環境負荷をより多く削減できる。

謝辞：本研究は、環境省・地球環境研究総合推進費(H-072)「持続可能な国土・都市構造への転換戦略に関する研究」の支援により実施された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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～、丸善株式会社、2006。
- 2) 産業環境管理協会：JLCA-LCA データベース 2007 年度 4 版、2007。
- 3) 国立社会保障・人口問題研究所：小地域簡易将来人口推計システム、http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohoku/Shou_S_Jouken.asp
- 4) 財団法人統計情報研究開発センター：平成 12 年国勢調査地域メッシュ統計、2004。