

13. 環境・経済・社会のトリプル・ボトムラインに基づく都市域の持続可能性評価システムの構築

鈴木 祐大^{1*}・加知 範康²・戸川 卓哉¹
柴原 尚希¹・加藤 博和¹・林 良嗣¹

¹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)）

²財団法人豊田都市交通研究所（〒471-0026愛知県豊田市若宮町1-1）

* E-mail: yutas@urban.env.nagoya-u.ac.jp

都市の持続可能性に空間構造が与える影響を、環境・経済・社会の「トリプル・ボトムライン」の観点から評価するシステムの構築を目的とする。これら各観点からみた都市の持続可能性を定量的に表現する指標を定義し、これらの値を小地区単位かつ時系列で将来推計することを可能とする。本システムを、人口減少と都市域拡散が進む実際の地方都市に適用し、住宅地面積に変化がなく、人口が現状のトレンドで推移していくと仮定して、2006年から2050年にわたる予測を行った。その結果、1) 人口1人あたり環境負荷はわずかに増加し、2) 1人あたりインフラ維持費用は全域で急激に増加し、いずれもその傾向は郊外部で顕著にみられる。また、3) 2006～10年と2046～50年の2期間の比較から、QOL（Quality Of Life）の環境効率・費用効率はともに低下するため、持続可能性の低い都市域になることが示される。

Key Words : *urban sustainability, quality of life, life cycle environmental load, infrastructure maintenance cost, eco-efficiency*

1. はじめに

21世紀、日本は人口減少・超高齢化・経済成熟期を迎える。このような状況では、従来型の「モータリゼーション依存型市街地拡大戦略」を継続していたのでは、人口や経済規模に対して市街地供給が過剰となる。その結果、多くの資源を非効率に消費し、多額の市街地維持費用を必要とするとともに、多くの環境負荷を発生させる都市構造になってしまうことが懸念される。さらに、散漫な都市構造に起因する諸問題は様々な経路を通じて最終的に住民の生活環境質（Quality Of Life : QOL）を損なうことにもつながる。

これらの問題は、都市の「持続可能性」を低下させる事象として捉えることができる。持続可能性とは1987年に「環境と開発に関する世界委員会（ブルトラント委員会）」¹⁾が作成した報告書において取り上げられた「持続可能な発展（Sustainable Development : SD）」という概念に基づくものである。そこでは、「持続可能な発展とは、将来の世代が自らの欲求を充てんする能力を損なうことなく、今日の世代の欲求を満たすような発展」

と定義されている。しかし、この定義は抽象的なものにとどまっている。

持続可能性を具体的に評価するアプローチの1つに「トリプル・ボトムライン（Triple Bottom Line : TBL）」²⁾がある。TBLは、1997年にイギリスのサステナビリティ社のジョン・エルキントン氏によって提唱された概念で、企業活動を「経済」だけではなく、「環境」と「社会」を含めた3つの視点から評価するというものである。これは企業の社会的責任（Corporate Social Responsibility : CSR）における基本的な概念となった。

TBLは企業活動にとどまらない評価フレームであり、その後EUも持続可能性の3要素として取り入れた。また、国連持続可能な開発委員会（Secretariat of the United Nations Commission on Sustainable Development : UNCSO）³⁾や国連開発グループ（United Nations Development Group : UNDGO）⁴⁾が発表している持続可能性の評価指標をはじめとして、持続可能性評価に関連した多くの調査・研究⁵⁾がTBLの3つの要素に着目した整理を行っている。そして、本研究が評価対象とする都市にも、この枠組みを当てはめることができる。

表-1 都市の持続可能性評価に関する既往研究の例

著者	対象地域のスケール	評価指標	土地利用・交通施策の評価	概要
清岡・谷口ら ⁶⁾	市町村およびそれに相当するメッシュ	環境負荷 (CO ₂ , 食物, 材木, 土地など)	あり	エコロジカル・フットプリント指標により, 市町村レベルの土地利用政策の影響を評価.
川久保・伊香賀ら ⁷⁾	市区町村	域内総人口, 域内総生産, CO ₂ 総排出量	なし	人口予測モデルをベースに, 都市の環境/経済/社会に関する3つの指標を予測・推計し, 持続可能性を評価.
山崎・上田ら ⁸⁾	東京都市圏を197ノ ーンに分割(おおよ そ市区町村)	コンパクト指標, 持続可能性指標(経済成長・ 環境負荷・生活の質), 事業便益	あり	都市構造及び持続可能性について応用都市経済モデルを用いて予測し, それに対する対応策について評価.
石井・日野ら ⁹⁾	規定なし(町丁目 であると予想される)	人への負荷, 環境への負荷, ふれあい, 賑わい, モビリティ, アクセシビリティ	なし	持続可能な都市の具体例としてヒューマニティ・タウンを定義し, 独自に選定した指標群で仮想都市を評価.
池田・谷口ら ¹⁰⁾	町丁目	自動車燃料消費量, 環境問題への意識など	あり	住区を土地利用や基盤整備状況からタイプ分けし, 自動車利用や都市滞留等の様々な項目を定量化し, コンパクト化施策の影響を評価.

本研究では, 都市域の持続可能性を TBL の観点から評価するシステムの構築を目的とする. 具体的には, 1) TBL の各構成要素を定量表現する指標を定義し, それを小地区単位かつ時系列で現在から将来まで推計するモデルシステムを構築し, 2) 推計された3つの指標に基づき都市域の持続可能性を検討する方法を示す. 最後に, 3) 実都市を対象としてシステムを適用し, 将来状況について推計を行う. 本システムによって, 例えばコンパクトシティ施策が都市の持続可能性に及ぼす影響を TBL に即して定量的に評価できるようになる.

2. 本研究の位置づけ

日本において, 都市を対象とした持続可能性評価に関する既往研究はいくつか存在する(表-1). 評価指標の体系および推計対象となる地域のスケール単位は様々であるが, 土地利用・交通施策が都市の持続可能性にどれほどの影響を与えるかを評価する場合, 清岡・谷口ら⁶⁾, 川久保・伊香賀ら⁷⁾, 山崎・上田ら⁸⁾のように市町村程度の単位では, 都市域の空間構造の影響を十分に把握することができない. 小地区を推計単位とした研究として, 石井・日野ら⁹⁾の手法は, 町丁目単位での評価が可能であるが, 各個人の観点からの指標を設定しており, 自治体を含めた都市の持続可能性評価には至っていない. 池田・谷口ら¹⁰⁾も, 町丁目での施策評価が可能であるものの主に交通行動と環境負荷に関する指標から行うものであり, 持続可能性評価の観点から適当な指標を取り上げるには至っていない.

国立環境研究所がまとめた持続可能な発展指標(Sustainable Development Indicator: SDI)の分類¹¹⁾(表-2)では, 76の持続可能性評価指標が挙げられている. こ

れは包括的な整理であり, 実際に国・地域・都市などの地区を評価する場合, これらの指標の中から測定可能でかつ重要な指標を評価することが求められる. 本研究では, 都市域を対象とし, かつそれを細かい地区に分割して分析を行うため, その空間単位に見合った指標選択を行う必要がある. そこで, 日本の多くの都市が直面している, 自治体財政の逼迫や低炭素社会実現に向けたGHGs 排出量削減や人口流出防止といった課題を評価することを可能とするために, 都市域の持続可能性に関する TBL の3要素を表現する指標として, インフラ維持管理・住宅の更新・交通活動から発生する「環境負荷」, 「インフラ維持費用」, 住民が享受する「QOL」, を取り上げる. これらの指標は, 推計に必要なデータが小地区単位でも入手可能であり, 様々な都市域へ適用できる. ただし, 表-2にこれらの指標を位置づけてみると, 多様な要素のうち一部しか包括していないことがわかる. この中には, 都市域レベルでは問題とならないものや, 日本では取り上げる必要が低いものもあるが, 取り上げるべきものもある. 今後, 評価指標についてはより精査する必要があると考えている.

その上で本研究では, 上記3要素を表現する指標の空間分布やその時間的変化を把握することができ, 地区間および世代間での格差の発生についても分析を行うことができるシステム開発を行った.

3. 持続可能性評価システムの構築

(1) システムの全体構成

図-1にシステムの全体構成を示す. 各指標の推計は, 既報¹²⁻¹⁴⁾に従う. 将来人口・インフラ量・住宅量は, コーホート要因法によるモデルを用いて推計する. 都市域

表-2 持続可能な発展指標 (SDI) の分類¹⁾

社会	環境	経済
社会統合指標	環境統合指標	国の経済力
貧困と依存	気候変動	資本と投資
経済的不平等	オゾン層破壊	貿易(輸出入)
性別間差別	大気環境	国家等の財政状態
世代間格差	農業と畜産業	家計の財政状態
地域格差	土壌	ビジネスと産業
民族/移民差別	化学物質	エコビジネス
社会的排除(身体障害者を含む)	土地利用	エネルギー使用
労働	ランドスケープ(景観)	運輸(輸送・交通)
労働環境	森林	物質利用
栄養状態	砂漠化	廃棄物発生と処理
食の安全	都市化	リサイクル
死亡率、平均寿命、健康	沿岸域	制度
公衆衛生、飲用水	漁業	持続可能な発展に向けた戦略
アルコール	水量	環境管理と政策
育児	水質	モラルと法令遵守
教育	エコシステム	国際レジーム
基礎学力	絶滅危惧種	科学と技術
文化、余暇、時間	災害	司法
家族・親族	騒音	対策での連携と協働
社会とのつながり、責任、参加	放射線	
国際協力(連携)	環境汚染の認知	
住居	水循環	
子どもの生活環境	バイオハザード	
サービス・公共施設	資源	
情報	自然とのふれあい	
犯罪		
社会保障		
人口変動		
平和・不和		
精神		

※  が本システムが包括する指標

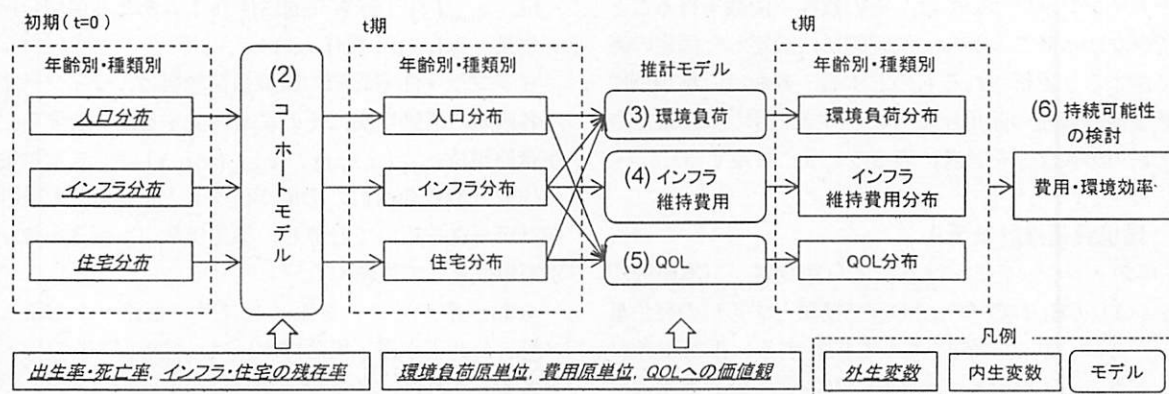


図-1 システムの全体構成 (カッコ内の番号は3章の節番号と対応)

を約 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。これは、なるべく詳細な単位で各指標を推計し積み上げることで、都市空間構造との関係をマイクロレベルで分析するためである。

(2) 将来人口・インフラ量・住宅量の推計モデル

a) 人口推計モデル

将来人口は国立社会保障・人口問題研究所が提供している小地域簡易将来人口推計システム¹⁹⁾を用いて推計する。1995 年および 2000 年の男女別、年齢 5 歳階級別人口を用いて求めた、合計特殊出生率・生残率・人口移動

率を外生変数とし、コーホート要因法によって 2005 年から 5 年おきで予測する。合計特殊出生率・死亡率は将来にわたり年齢階級毎で一定であると仮定する。また、人口移動率は立地施策によって異なることになる。本研究は、分析単位時間を 1 年とするため、5 年おきとなっている予測値を線形補間して 1 年ごとのデータを得る。

なお、将来人口予測の空間単位は市町村とし、推計値を各メッシュに配分する。これは、将来人口予測の空間単位が 4 次メッシュのように小さい場合、外生変数に関する不確定要素の影響を大きく受けてしまうことから、その影響を緩和するための措置である。配分比

率として、2005年国勢調査地域メッシュ統計におけるメッシュ人口とそれが属する地域の人口との比率を用い、この比率が将来にわたり一定であると仮定する。

b) インフラ・住宅量推計モデル

人口推計と同様に、対象地域における将来のインフラ・住宅量の推計もコーホート要因法により行う。t年のメッシュiにおける経過年数aのインフラk・住宅hの存在量を $X(t, i, a, korh)$ とすると、t+1年におけるその残存量 $X(t+1, i, a+1, korh)$ は式(1)のように推計される。(推計単位は後述の表-5を参照)

$$X(t+1, i, a+1, korh) = R(t, i, a, korh) X(t, i, a, korh) \quad (1)$$

ここで、 $R(t, i, a, korh)$ ：経過年数aのインフラk・住宅hのt年からt+1年への残存率。

t+1年の新規建設分は $X(t+1, i, 1, korh)$ として表現される。

住宅については構造別に築年数を説明変数とする残存率関数を設定する。パラメータは小松・加藤ら¹⁶⁾が算出している全国平均値を利用する。ただし、割合の高い木造戸建て住宅に関しては、後述する分析対象都市である上越市の実績値に適合するように平均値を補正した値を用いる。図-2に補正前後それぞれの残存率曲線を示す。この補正によって、上越市の住宅更新量を再現することができる。

一方インフラについては、その残存率関数を得ることができなかったことから、便宜的に、設定した固定の寿命に達すると更新されるものとする。寿命は、種類別に「減価償却資産の耐用年数等に関する省令¹⁷⁾」に規定された耐用年数などを参考に表-3のように設定する。

(3) 環境負荷推計モデル

t年のメッシュiにおける環境負荷物質j(本研究では $j = \text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}, \text{SO}_x, \text{NO}_x$ の5種類とする)の発生量 $E(t, i, j)$ は、式(2)~(5)によって推計する。推計対象はインフラk(k=道路, 上水道, ガス管, 公共下水道, 集落排水, 合併処理水槽, 公園)・住宅h(h=木造戸建, RC戸建, RC集合), および旅客交通とする。

$$E(t, i, j) = E_{\text{infra}}(t, i, j) + E_{\text{house}}(t, i, j) + E_{\text{trans}}(t, i, j) \quad (2)$$

$$E_{\text{infra}}(t, i, j) = \sum_a \sum_k e_{\text{infra}}(a, k, j) X(t, i, a, k) \quad (3)$$

$$E_{\text{house}}(t, i, j) = \sum_a \sum_h e_{\text{house}}(a, h, j) X(t, i, a, h) \quad (4)$$

$$E_{\text{trans}}(t, i, j) = e_{\text{trans}}(j) N(t, i) \quad (5)$$

ここで、 $E_{\text{infra}}(t, i, j)$ ：インフラ起源の環境負荷物質発生量、 $E_{\text{house}}(t, i, j)$ ：住宅起源の環境負荷物質発生

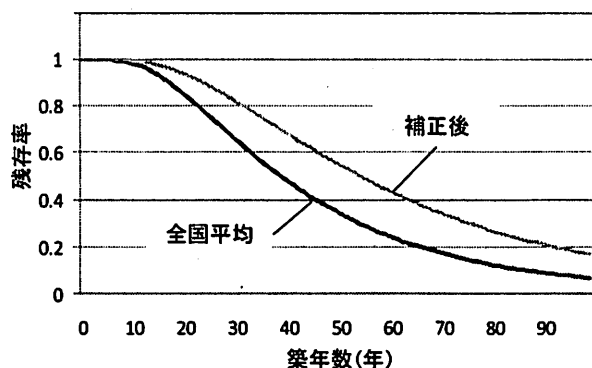


図-2 木造戸建て住宅の全国平均と補正後残存率

表-3 各インフラ寿命の設定値

対象	寿命 (年)
道路	10
上水道	40
ガス管	30
公共下水道	50
集落排水	50
合併処理浄化槽	50
公園	なし

量、 $E_{\text{trans}}(t, i, j)$ ：旅客交通起源の環境負荷物質発生量、 $e_{\text{infra}}(a, k, j)$ ：インフラkの環境負荷物質発生量原単位、 $e_{\text{house}}(a, h, j)$ ：住宅hの環境負荷発生量原単位、 $e_{\text{trans}}(j)$ ：旅客交通に伴う1人あたり環境負荷発生量、 $N(t, i)$ ：居住人口。

インフラ・住宅起源の環境負荷物質は、ライフサイクル各段階の活動年次にそのまま発生するものとする。発生量原単位 $e_{\text{infra}}(a, k, j)$ 、 $e_{\text{house}}(a, h, j)$ は、日本建築学会作成(2006年改訂)の原単位をもとに標準的な設計と統計データを用いて計算し、供用年数(=経過年数a)別原単位として整備する。

なお、ネットワーク系インフラ(道路・上水道・ガス管・公共下水道・集落排水)は、幹線以外を推計対象とする。これは、メッシュ間をつなぐ幹線は、コンパクト化施策などの都市構造改変策の実施後においても、地域内の移動・搬送のために残す必要があり、施策実施効果に寄与しないと考えられるからである。

また、旅客交通に伴う環境負荷物質jの発生量原単位 $e_{\text{trans}}(j)$ は、既報¹²⁾に従い1人あたり年間発生原単位として整備する。具体的には、各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(6)に代入して1人あたり年間旅客交通環境負荷発生量を求め、原単位とする。

$$e_{\text{trans}}(i, j) = \sum_m 365.25 e(m, j) \bar{l}(i, m) s(i, m) c(i) \quad (6)$$

ここで、 $e_{\text{trans}}(i, j)$ ：1人あたり年間旅客交通起源の

環境負荷物質発生量 [kg-CO₂/人 year] (単位は、環境負荷物質が CO₂ の場合), $e(m, j)$: 交通手段 m (m =鉄道, バス, 自動車, 自動二輪, 自転車, 徒歩) の環境負荷発生量原単位 [kg-CO₂/人 km], $\bar{l}(i, m)$: 交通手段 m による平均トリップ長 [人 km/trip], $s(i, m)$: 交通手段 m の分担率 [trip/trip], $c(i)$: トリップ生成原単位 [trip/人 day].

各種環境負荷 j の統合評価には、日本版被害算定型ライフサイクル環境影響評価手法第二版 (The second version of Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling: LIME2¹⁸⁾) を用いる。この手法においては統合化係数 (全ての環境影響を単一指標にするための係数) が算出されており、式(7)に示すように被害の量 (インパクト) が統合化指標 (貨幣評価された単一指標, 単位 [円]) として算出できる。

$$E = \sum_p \sum_j IF(p, j) E(j) \quad (7)$$

ここで、 $IF(p, j)$: 環境負荷物質 j の影響領域 p を通じた統合化係数。

(4) インフラ維持費用推計モデル

t 年のメッシュ i におけるインフラ維持費用 $C(t, i)$ は式(8)で推計する。推計対象インフラは環境負荷と同じである。なお、ネットワーク系インフラ (道路・上水道・ガス管・公共下水道・集落排水) は、環境負荷推計モデルと同様に幹線以外を推計対象とする。

$$C(t, i) = \sum_a \sum_k c_{infra}(a, k) X(t, i, a, k) \quad (8)$$

ここで、 $c_{infra}(a, k)$: 単位量あたりの維持費用。

(5) QOL推計モデル

市街地内各地区における居住者の QOL は、既報¹⁴⁾に従って推計する。まず、QOL は a) 社会資本や公共・民間施設の充実度、眺望や景観の良好度、災害からの安全性といった居住地区における環境の物理量と、b) そこに居住する個人の主観的な価値観によって決定されるとする。a) については交通利便性 (ACoessibility: AC), 居住快適性 (AMenitvity: AM), 災害安全性 (Safety & Security: SS), の 3 つの要素からなる「生活環境質向上機会 (Life Prospects: LPs)」を QOL の構成要素と定義し用いる。さらに LPs を説明する階層構造を表 4 のように定義する。

この LPs に b) 居住者の QOL に対する価値観を表す重みを乗じたものを QOL 値と定義し、式(9)~(11)に示すように定式化する。

$$QOL(g, i) = w^T(g) LPs(i) \quad (9)$$

表-4 QOL 構成要素 (LPs) の階層構造¹⁴⁾

分類	評価要素	指標
交通利便性 (AC: ACoessibility)	就業施設利便性	就業場所への AC
	教育・文化施設利便性	高校, 美術館・博物館, 図書館への AC
	健康・医療施設利便性	病院への AC
	買物・サービス施設利便性	大型小売店への AC
居住快適性 (AM: AMenitvity)	居住空間使用性	1人あたり居住延べ床面積
	建物景観調和性	建物高さばらつき
	周辺自然環境性	1人あたり緑地面積
	局地環境負荷性	交通騒音レベル
災害安全性 (SS: Safety & Security)	地震危険性	地震による期待損失余命
	洪水危険性	洪水による期待浸水深
	犯罪危険性	年間街頭・侵入犯罪件数
	交通事故危険性	年間人身事故発生件数

$$w^T(g) = [w(g, AC) \ w(g, AM) \ w(g, SS)] \quad (10)$$

$$LPs^T(i) = [AC(i) \ AM(i) \ SS(i)] \quad (11)$$

ここで、 $QOL(g, i)$: 個人属性グループ g のメッシュ i での QOL (1 人あたり), $w(g)$: LPs 各要素に対する価値観 (重み) ベクトル, $LPs(i)$: 生活環境質向上機会ベクトル, $AC(i)$: 交通利便性, $AM(i)$: 居住快適性, $SS(i)$: 災害安全性。

QOL の計測尺度には、医療・環境リスクの分野で利用されている QALY (Quality Adjusted Life Year) 値を用いる。QALY 値は、生存年数を QOL によって調整したものであり、単位は「年数」または「日数」となる。

算出方法の詳細は既報¹⁴⁾を参照されたい。

(6) ファクターによる持続可能性の評価

ここまでで求めた諸指標を用いて、本研究では、SD の定義¹⁾「将来の世代が自らの欲求を充てんする能力を損なうことなく、今日の世代の欲求を満たすような発展」を参考に、「都市域が持続可能である」ことを「インフラ維持費用と環境負荷物質を削減しつつ、現世代と将来世代の QOL を向上させること (=TBL が改善していること)」と定義する。これを定式化すると、式(12)~(14)に示す条件を同時に満足することと捉えることができる。

$$QOL(t + \Delta t) \geq QOL(t) \text{ for } \forall t, \Delta t = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$C(t + \Delta t) \leq C(t) \text{ for } \forall t, \Delta t = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$E(t + \Delta t) \leq E(t) \text{ for } \forall t, \Delta t = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

しかしながら、これらの条件をすべて満たすことは極めて困難であることから、本研究では条件を緩和し、資

源生産性（資源の投入量あたりの財・サービスの生産量）の改善度合いを検討する概念の1つであるファクター¹⁹⁾を用いて、式(15)～(17)に示す条件を設定する。

$$Fc(t, t') = \frac{CE(t')}{CE(t)} \geq 1, \forall t < t' \quad (15)$$

$$Fe(t, t') = \frac{EE(t')}{EE(t)} \geq 1, \forall t < t' \quad (16)$$

$$CE(t) = \frac{QOL(t)}{C(t)}, EE(t) = \frac{QOL(t)}{E(t)} \quad (17)$$

ここで、 $CE(t)$ ：時点 t における費用効率（Cost-Efficiency）、 $EE(t)$ ：時点 t における環境効率（Eco-Efficiency） $Fc(t, t')$ ：2時点間 (t, t') における費用効率 CE のファクター、 $Fe(t, t')$ ：2時点間 (t, t') における環境効率 EE のファクター。

ファクター Fc, Fe は、費用効率 CE や環境効率 EE の分母にあたる C や E の値が増加する（すなわち、式(13)・(14)を満たさない）としても、それ以上に QOL 値が増加すれば、式(15)・(16)を満たす。これを本研究では「改善の」持続可能性評価方法として用いる。

以上で求められる指標を用いることにより、例えば、都市域を縮退させる施策の実施における利用抑制・促進候補地区の選定に活用することができる。

4. 実都市への適用

(1) 分析対象都市の概要

構築したシステムを新潟県上越市に適用する。上越市の人口分布と鉄道網を図-3に、推計した将来人口を図-4に示す。上越市は1971年4月に高田市と直江津市が合併して成立したため、旧来からの中心市街地を2つ持っているが、近年、郊外へのスプロール化が著しい。その中間の春日山地区に市役所があり、その周辺に住宅・商業施設が増加している。その上、北陸新幹線（長野新幹線）延伸開業に伴い、市南部に新駅の開設が決まっており、今後多極化によるスプロールが懸念されている。上越市は最深積雪377cm（1945年）を記録したことがある日本有数の豪雪地帯であり、スプロールに伴う除雪費用の増大も問題となる。本研究では、除雪費用は道路の維持費用に含まれる形で反映される。

(2) BAUシナリオでの将来予測結果

本研究で扱うのは、人口・インフラ量・住宅量が全域において現状のトレンドで推移すると仮定したシナリオ（Business As Usual：BAU）である。すなわち、人口の移動率は現状のまま推移し、またインフラや住宅は2005年現在整備されているものが将来にわたって維持・更新されていくものとし、面的拡大・縮小はないものとする。更新は、前年に廃棄された分だけ、同じ場所に新規建設することとする。

分析は、a) 各指標の経年推移、b) 各指標の1人あたり値の空間分布、c) 環境・費用効率の変化（ファクタ

表-5 使用データ一覧

使用データ	単位	集計方法	出典
道路 ²⁰⁾	m ² (道路面積)	右記(1)に記載されている各路線属性を右記(2)に付加し、各メッシュ内存在量を算出	(1)橋梁台帳・道路台帳 (2)GIS on Demand
上水道	m (管渠延長)	上水道供給区域を分割したシートごとの存在量を算出し、各メッシュの上水道供給区域面積に応じて配分	水道施設管理図
ガスパ	m (管渠延長)	ガスパ供給区域を分割したシートごとの存在量を算出し、各メッシュのガスパ供給区域面積に応じて配分	ガス施設管理図
公共下水道	m (管渠延長)	各年次の管渠総延長を公共下水道供給区域に配分し、各メッシュの公共下水道供給区域面積に応じて配分	下水道処理区域図
集落排水	m (管渠延長)	記載されている各年次の管渠総延長を集落排水供給区域に配分し、各メッシュの集落排水供給区域面積に応じて配分	集落排水整備計画図
合併処理槽	基 (整備基数)	公共下水道・集落排水整備区域外の建物数に応じて、記載されている総基数を配分	上越市生活排水処理基本計画
公園	m ² (公園面積)	各公園面積を誘致圏域に配分	数値地図 2500(国土地理院発行)
住宅	m ² (延床面積)	各メッシュ内住宅存在量を上越市住宅構造割合に応じて配分	平成17年国勢調査
交通関連指標 (平均トリップ長)	人 km/trip	3次メッシュ(1km×1km)単位でデータを集計し、サンプル数が30以上のメッシュはそのデータ、30未満は上越市の平均値を使用	平成17年全国都市・パーソントリップ調査
交通関連指標 (トリップ生成原単位)	trip/人 day	3次メッシュ(1km×1km)単位でデータを集計し、サンプル数が30以上のメッシュはそのデータ、30未満は上越市の平均値を使用	
交通関連指標 (トリップ手段分担率)	trip/trip	3次メッシュ(1km×1km)単位でデータを集計し、サンプル数が30以上のメッシュはそのデータ、30未満は上越市の平均値を使用	

²⁰⁾ 国道、県道、市道、農道は対象にしない。

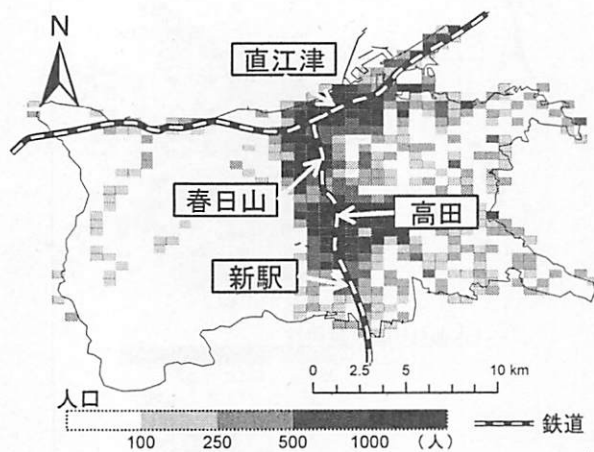


図-3 上越市の人口分布と鉄道網

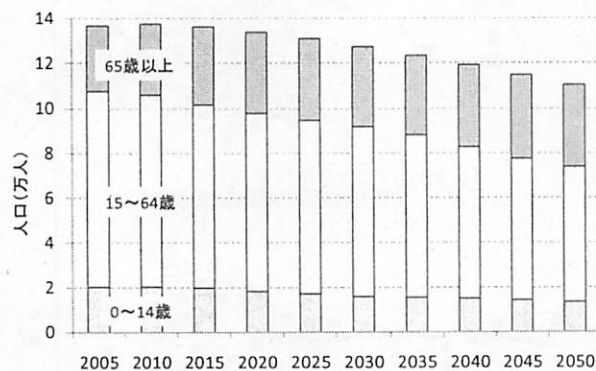


図-4 上越市の将来推計人口

一), の視点から行う。分析の対象期間は 2005 年から 2050 年までとする。使用するデータ一覧を表-5 に示す。

環境負荷・インフラ維持費用原単位, QOL への価値観, 交通関連指標についても将来にわたり一定(2005 年値)であると仮定する。また, 本来ならば, 3 章の(4)で述べたように, ネットワーク系インフラは, 幹線以外を推計対象とする必要があるが, 公共上下水道・集落排水については, 入手可能なデータの性質上, その分類が困難なため, 全管を推計対象とした。

a) 各指標の経年推移

1 人あたり環境負荷・インフラ維持費用・QOL の経年推移を図-5 に示す。

環境負荷は, わずかに増加していく。図-6 にその内訳を示す。大部分を住宅内での人間活動と旅客交通が占めており, BAU の場合, これらが将来にわたって変化しない。しかし, 割合が小さい住宅起源の 1 人あたり環境負荷が増加するため, 全体としてはわずかに増加する結果となった。

インフラ維持費用は, 乱高下しながら長期的には増加していく。これは更新時期を迎えるインフラが年々増加していくことによる。特に, 下水道, 集落排水の更新

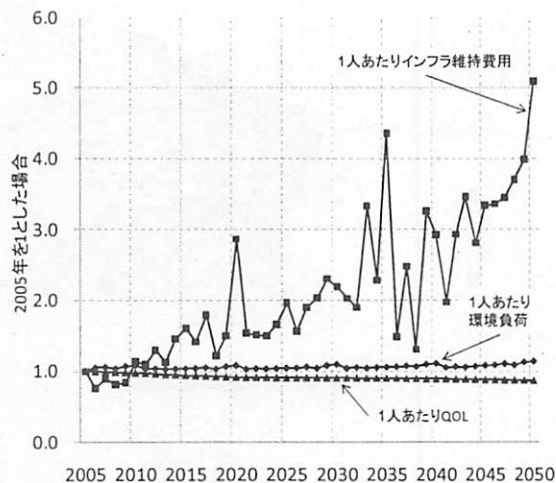


図-5 各指標の経年推移推計結果

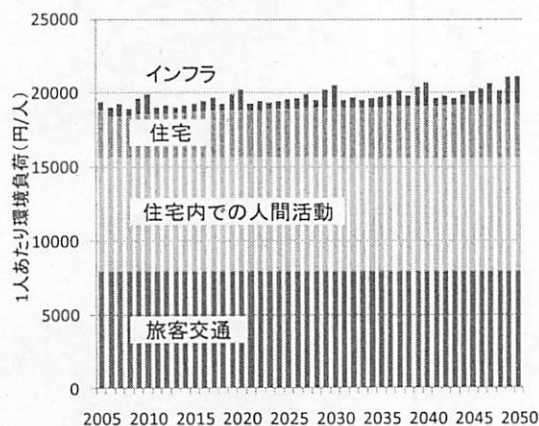


図-6 1 人あたり環境負荷内訳の推移

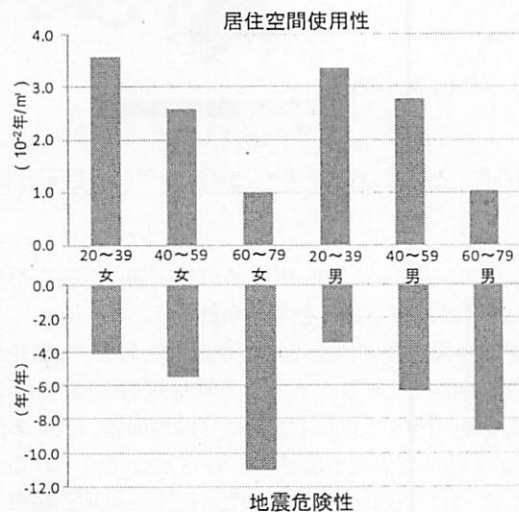


図-7 居住空間使用性と地震危険性の重みパラメータ値

時期が重なる 2038 年からは大きな上昇がみられる。この推計は, 都市構造改編策をどの時期に実施することが費用面からみて効率的であるかを検討するための有益な情報となり得る。費用面のみを考慮した場合には, 大規

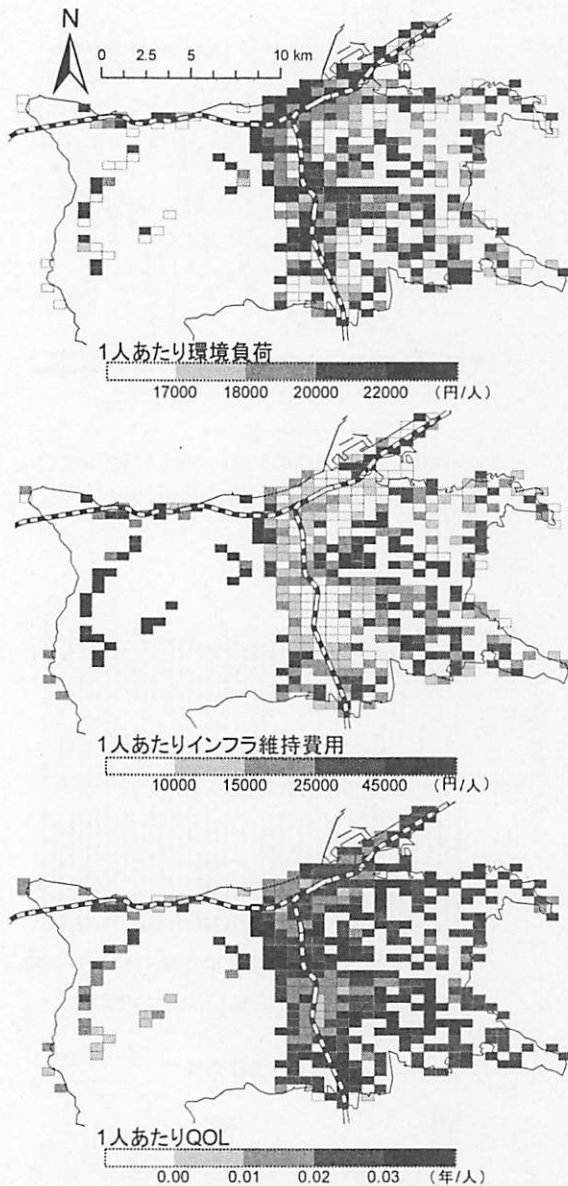


図-8 各指標の2005年～2009年の平均の空間分布

模な更新が起こる 2038 年直前が都市構造改編を行う有力なタイミングであると考えられる。

QOL は減少傾向にある。主要要因として、a)居住空間使用性の指標である 1 人あたり居住延床面積、b)周辺自然環境性の指標である 1 人あたり緑地面積（表4 参照）、c)年齢・性別で異なる価値観、の 3 つが考えられる。最初の 2 つは、BAU の場合、供給延床・緑地面積は一定としている一方、人口が減少するため、1 人あたり居住延床・緑地面積は増大し、QOL を上昇させるというものである。最後の 1 つは、人口構成の変化によって、1 人あたり居住延床面積や地震危険性に大きな重みを持つ年齢層（図-7 参照）が減少するというものである。全体としては最後の 1 つの影響が大きいことから、QOL

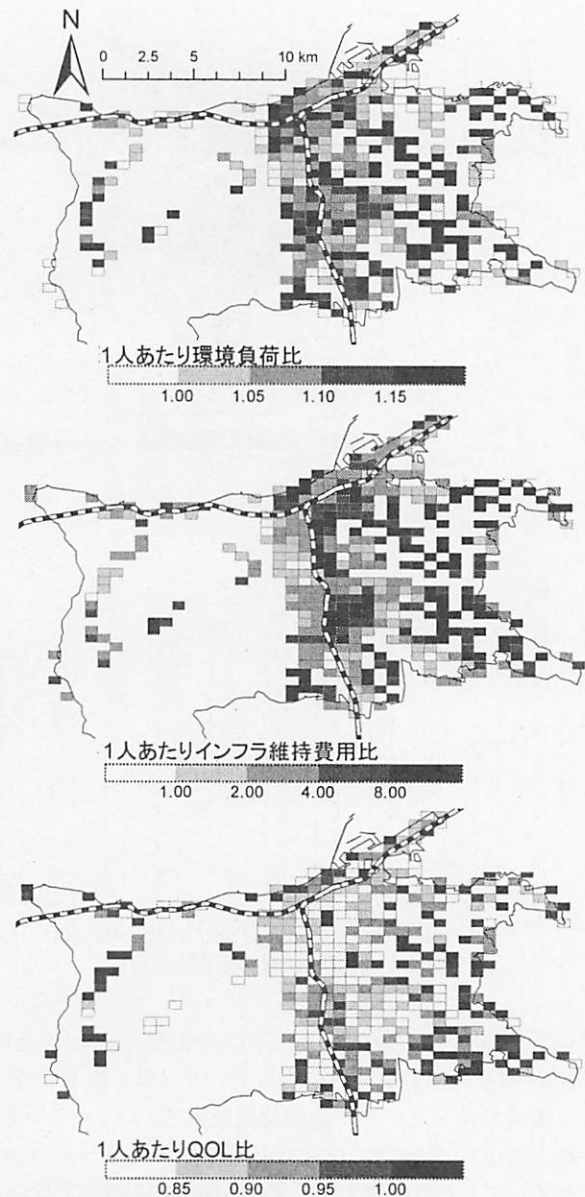


図-9 各指標の空間分布 2 時点比較（2046 年～2050 年の平均/2005 年～2009 年の平均）

は減少する結果となっている。このことは、単純に現状を維持していくだけでは QOL を維持向上させていくことはできず、年齢構成の変化を考慮した施策の実施が必要であることを意味している。

b) 各指標の空間分布の変化

1 人あたり環境負荷、インフラ維持費用・QOL の 2005 年～2009 年平均の空間分布推計結果を図-8 に示す。

環境負荷については中心部（直江津・春日山・高田）と郊外部で違いはほとんどみられない。しかしながら、値が低い地区がいくつか見られる。これは、その地区に新しい住宅が多く、2005 年～2009 年に住宅更新が行われることが少ないためである。逆に値が高い地区は、古い住宅が多いため 2005 年～2009 年に住宅更新が頻繁に行わ

れると考えられる。

インフラ維持費用については、中心部では、郊外部に比べ値が低いことがわかる。これは、本研究で対象としているインフラは、人口の多寡に関わらず人口存在地区には一定量整備する必要があるためである。つまり、郊外部では、中心部に比べインフラの利用効率が悪くなる。

QOLについては郊外部で高くなっていることがわかる。これはQOLの構成要素である居住快適性（1人あたりの延べ面積）が郊外部で高いことに起因している。一方、交通利便性については、上越市のような自動車依存型の都市では、自動車利便性によってほとんど決まり、道路網整備状況は中心部と郊外部でそれほど差がないため交通利便性が全域でそれほど大きく変化しない。したがって、QOLが居住快適性に大きく依存する形となった。

次に1人あたり環境負荷、インフラ維持費用・QOLの2005年～2009年平均と2046年～2050年平均の比の空間分布を図-9に示す。1より小さいところは値が減少した地区、1より大きいところは値が増加した地区である。

環境負荷は2005年から単調増加していく（図-5）ため、ほとんどのメッシュで値が増加していることがわかる。しかしながら、わずかながら値が1より低い地区が散見される。この地区では、新しい住宅が多く、2005年～2009年より2046年～2050年の方が住宅更新が多く行われるためである。

インフラ維持費用については増加しているメッシュがほとんどである。特に人口減少が大きい郊外部は、1人あたりインフラ維持費用の増加が相対的に大きい。この結果より、全域で人口規模に合うような住宅・インフラ供給量の削減が必要であることがわかる。

また、1人あたりQOLはほぼ全域で減少するが、増加する地区も散見される。増加地区は、減少地区とは逆に、人口構成の変化により1人あたり居住延床面積や地震危険性に大きな重みを持つ年齢層（図-7参照）が増えたことに起因している。

c) ファクターの変化

費用効率と環境効率の改善度（ファクター） F_c, F_e の値から都市域の持続可能性を検討する。費用効率は0.20倍（ $F_c=0.20$ ）、環境効率は0.83倍（ $F_e=0.83$ ）となっており、費用効率性の観点から都市域の持続可能性が大きく低下する方向に進んでいくことがわかる。

5. まとめ

本研究では、都市域を対象に TBL に対応する各指標（ライフサイクル環境負荷・インフラ維持費用・QOL）を、小地区単位での人口、インフラ、住宅データを用い

たコーホートモデルにより推計した上で、ファクター概念に基づき、都市域の持続可能性を評価するシステムを構築した。

システムを新潟県上越市に適用し、BAU シナリオについて分析した結果、以下に示す知見を得た。

- 1) TBL 各指標の都市域全体での時系列変化を見ると、1人あたり環境負荷は緩やかな増加傾向を見せるが、インフラ維持費用は急激に増加する。また、1人あたり QOL は緩やかに減少する。
- 2) TBL 各指標の空間分布の時系列変化を見ると、1人あたり環境負荷はほとんどの地区で増加する。また、1人あたりインフラ維持費用は一部を除いた全域で増加し、特に郊外部ではその傾向が顕著にみられる。さらに、1人あたり QOL はほぼ全域で減少するが、増加する地区も散見される。
- 3) BAU シナリオの場合、対象都市の環境効率の低下は小さい（ファクター0.83）が、費用効率は大幅に低下（ファクター0.20）する。つまり現状のまま推移すると、特に財政面から持続可能性が失われる懸念が高い。

本研究で残された主な課題は以下の通りである。

- 1) TBL 各指標と、それらを合成した費用効率・環境効率での分析評価にとどまっており、指標群による総合評価には至っていない。
- 2) 「経済」に含まれるべき地域経済（活力）や「社会」に含まれるべきコミュニティのつながりなど、都市域において重要な持続可能性評価指標を十分包括できていない。
- 3) 環境負荷・インフラ維持費用を推計する際に分析地区の特性を考慮した原単位を使用すること、技術や住民意識の経年変化を考慮した原単位を使用すること、による分析精度の向上が必要である。
- 4) 本稿では BAU シナリオの分析のみ行っているが、システムの本来の目的である土地利用・交通施策シナリオの分析を進める必要がある。また、BAU シナリオにおける諸仮定についても見直す必要がある部分がいくつか存在している。

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) 環境と開発に関する世界委員会編：地球の未来を守るために、p.440、福武書店、1987。
- 2) Sustainability 社：<http://www.sustainability.com/>、2009.8。

- 3) UNCSO : Indicators of Sustainable Development: Guidelines and methodologies, 2001.
- 4) UNDG : INDICATORS for Monitoring the Millennium Development Goals, 2003.
- 5) たとえば, 2005 Environmental Sustainability Index - Benchmarking National Environmental Stewardship -, Yale Center for Environmental Law and Policy, 2005.
- 6) 清岡拓未, 谷口守, 松中亮治: エコロジカル・フットプリント指標を用いたローカススケールでの持続可能型土地利用政策の検討, 都市計画論文集, No.40-3, p.55-60, 2005.
- 7) 川久保俊, 伊香賀俊治, 村上周三, 新谷圭右: 将来予測に基づく環境/経済/社会の持続可能性評価手法の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.834-844, 2008.
- 8) 山崎清, 上田孝行, 岩上一騎: 交通インフラ整備の都市構造及び持続可能性へ与える影響分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.39, CD-ROM, 2009.
- 9) 石井裕介, 日野泰雄, 内田敬: 持続可能な都市の評価手法に関する基礎的研究-ヒューマニティ・タウンを目指して-, 土木計画学研究・講演集, Vol.25, CD-ROM, 2002.
- 10) 池田大一郎, 谷口守, 島岡明生: 汎用性の高い都市コンパクト化評価支援システム (SLIM CITY) の開発と適用, 土木計画学研究・論文集, Vol.21, No.2, p.501-506, 2004.
- 11) 国立環境研究所: 国等が策定する持続可能な発展指標 (SDI) のデータベース
<http://www.nies.go.jp/sdi-db/index.php>, 2009.8.
- 12) N.Shibahara, N.Goto, N.Kachi, H.Kato, Y.Hayashi : A System for Estimating Life Cycle Environmental Load from Urban Areas Based on Using the Detailed Land Use Data - An Analysis of the Urban Shrinking Policy -, Proceedings of The 8th International Conference on EcoBalance, CD-ROM(04-04), p.261-264, 2008.
- 13) 加知範康, 山本哲平, 川添豊, 加藤博和, 林良嗣: 市街地拡大抑制策評価のための市街地維持コスト推計システムの開発, 土木計画学研究・講演集, Vol.36, CD-ROM, 2007.
- 14) 加知範康, 加藤博和, 林良嗣, 森杉雅史: 余命指標を用いた生活環境質(QOL)評価と市街地拡大抑制策検討への適用, 土木学会論文集D, Vol.62, No.4, p.558-573, 2006.
- 15) 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/tohkei/ShouS_Jouken.asp, 2009.8.
- 16) 小松幸夫, 加藤裕久, 吉田倬郎, 野城智也: わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告, 日本建築学会計画系論文報告集, No.439, p.101-110, 1992.
- 17) e-Gov 電子政府の総合窓口: 減価償却資産の耐用年数等に関する省令,
<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S40/S40F03401000015.html>, 2009.8.
- 18) 産業環境管理協会: JLCA-LCA データベース 2007 年度 4 版, 2007.
- 19) Weizacker, E, U, V・Lovins, A, B・Lovins, L, H (佐々木健訳): ファクター4, p.352-355, 財団法人省エネルギーセンター, 1998.

(2009.3.6受付)

(2009.7.29受理)

A System for Evaluating Urban Sustainability Based on Triple Bottom Line: Environmental, Economic and Social Aspects

Yuta SUZUKI¹, Noriyasu KACHI², Takuya TOGAWA¹,
Naoki SHIBAHARA¹, Hirokazu KATO¹, Yoshitsugu HAYASHI¹

¹Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

²Toyota Transportation Research Institute

This study aims to build a system for evaluating the sustainability of an urban area from the viewpoint of a triple bottom line that consists of environmental, economic, and social aspects. For measuring this triple bottom line, the life cycle environmental load, infrastructure maintenance costs, and quality of life are quantified as indicators. A cohort model is applied to estimate these indicators based on time serial data in each small district. Urban sustainability can be evaluated by a factor concept—the rate of improvement of cost and eco-efficiency. The system is applied to an actual local city in Japan, where population decline and urban sprawl have progressed, and the changes in urban sustainability indicators from 2006 to 2050 are estimated. The results demonstrate that 1) the per capita life cycle environmental load increases slightly; 2) while the per capita infrastructure maintenance cost increases rapidly across the whole area, the trend is especially remarkable in the suburban area; 3) comparison of the periods between the years 2006-2010 and 2046-2050 show that cost efficiency decreases rapidly and eco-efficiency decreases slightly. This implies that the urban area in the case study city will not develop sustainably.