

地球環境制約を前提としたバックキャスティング・アプローチによる都市空間構造導出手法*

Derivation of Urban Structure by Backcasting Approach Considering the Global Environmental Constraints*

戸川卓哉**・加藤博和***・鈴木祐大****・林良嗣*****

By Takuya TOGAWA・Hirokazu KATO・Yuta SUZUKI・Yoshitsugu HAYASHI

1. 背景と目的

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た。このような都市は、自動車走行に起因する温室効果ガス（Green House Gas: GHG）排出が多い上、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り、その維持管理・更新活動に伴い発生するGHGも多くなると考えられる。したがって、長期的かつ抜本的なGHG削減のためには、都市空間構造の見直しが必要である。一方で、ある程度の地球温暖化が進み、気候変動が起きることを想定し、その結果生じる降水特性変化等を織り込んだ都市計画見直しの検討も併せて必要となる。

このような認識を踏まえると、21世紀の日本では地球環境面からの制約に対応しつつ、国民が享受する生活の質（QOL）をアウトカム指標とする土地生産性を高め、人口減少下で各地域の身の丈にあったコンパクトな空間を形成する「スマート・シュリンキング(美しい縮退)」戦略が内包される都市経営への転換が必要である。

しかし、例えば近年注目されている、コンパクトシティを実現する施策が、GHGを削減するかどうかの証明は実はまだ十分ではない。コンパクトシティがGHG排出の少ない構造であることが確認されたとしても、そのための都市域再編に伴う既存建築物の廃棄や建築物・インフラ群の新規建設はGHGを発生させ、さらに多大な費用と労力が必要となることから、その考慮も必要となる。

本研究は、地球温暖化問題への対応を前提として、なおかつ人口減少・少子高齢化や社会資本劣化などの諸課題に対応し、高いQOLを持続的に提供しうる都市空間構造を見だし形成するための戦略をバックキャスティング・アプローチによって導出することを目的とする。

*キーワード：地球環境問題、土地利用、市街地整備

**正員、修（情報科学）、名古屋大学大学院環境学研究所
（名古屋市中種区不老町、TEL:052-789-2773、

E-mail:togawa@urban.env.nagoya-u.ac.jp)

***正員、博（工）、名古屋大学大学院環境学研究所

****学生員、学（工）、名古屋大学大学院環境学研究所

*****フェロー、工博、名古屋大学大学院環境学研究所

既報³⁾では、都市域における建築物・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GHGの都市空間構造による変化を定量的かつ包括的に推計するために、LCA(Life Cycle Assessment)の手法を用いて、都市域のGHG排出を推計するモデルシステムを構築した。本研究ではさらに、都市域の社会・経済面からの持続可能性を評価する手法も組み込むことで、持続可能な都市空間構造を検討するモデルシステムとする。このモデルシステムを実都市へ適用し、持続可能な都市空間構造の検討を試みる。

2. 研究方法

(1) バックキャスティングによる地球環境問題に対応した都市空間構造導出の枠組

まず、バックキャスティングにおける基準となる都市の持続可能性をどのような指標に基づき評価すべきかを検討する。本研究では「トリプル・ボトムライン」

(Triple Bottom Line : TBL)¹⁾のアプローチを採用する。TBLは人間活動を「経済」「社会」「環境」の3つの視点から評価するものである。国連持続可能な開発委員会 (Secretariat of the United Nations Commission on Sustainable Development: UNCSD)²⁾をはじめ持続可能性評価指標に関する多くの調査・研究がTBLの3要素に着目した整理を行っている。

都市にTBLを当てはめると、例えば「経済」は自治体の経済・財政状況、「環境」は都市活動に伴う環境負荷、「社会」は都市居住者のQOL水準及び個人格差、に対応付けることができる。なお、ここでの環境負荷とは広域・地球レベルの環境に影響を与えるGHG発生量等であり、騒音や大気汚染等の局地的な生活環境への影響はQOLの中で評価されることになる。

以上を踏まえ、バックキャスティング・アプローチによる都市空間構造導出の具体的なフローを図-1に示す。1)まず、分析対象都市におけるGHG削減目標が設定される。2)次に、現状の土地利用が継続した場合における各メッシュのGHG発生量・居住者のQOL・市街地維持費用を時系列で推定し、3)それら3要素に関する各メッシュの効率性を評価する。4)その上で、将来の気候変動によって災害危険性が上昇する地区での防災目的

のインフラ建設など、適応的施策の実施可能性を検討する。5)非効率な地区の都市的利用を中止（撤退）した場合について3要素を再び計算し、最初に設定されたGHG削減目標が達成されるかをチェックする。ここで再計算を行うのは、撤退地区からの転入によって非撤退地区の人口が増加し、非撤退地区のGHGが増加する可能性があるためである。GHG削減目標が達成されていない場合は、再び3要素に基づき効率性の評価を行い、目標が達成されるまで繰り返す。最終的に実現される都市空間構造における、住民のQOLや市街地維持費用の状況から設定した効率性指標に基づいて、施策を実施することの妥当性に関する考察を行う。

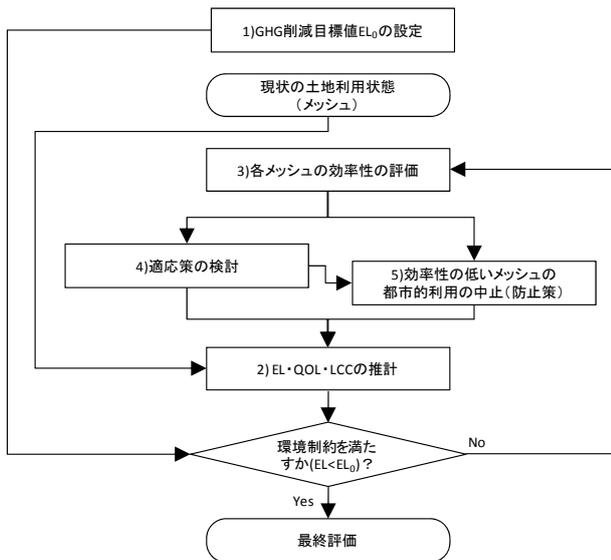


図-1 バックキャスティングによる都市空間構造導出プロセス

(2) 市街地の効率性評価と適応・防止策

GHG排出量とQOLおよび市街地維持費用(C)の3要素から各メッシュを評価し、適応策や防止策の実施検討（撤退地区選定）するために、式(1)と式(2)で定義される指標を用いる。

$$CF = \frac{\sum_t QOL(t)}{\sum_t C(t)} \quad (1)$$

$$EF = \frac{\sum_t QOL(t) - \sum_t C(t)}{\sum_t GHG(t)} \quad (2)$$

式(1)は、各メッシュの費用効率性を表し、分子にその土地で享受できるQOL、分母にその土地を維持するための市街地維持費用が計上されている。将来、気候変動によって災害危険性が増大しQOLが低下する場合、それを緩和するインフラ整備が費用効率の観点から可能

であるかを検討するための指標として式(1)が適していると考えられる。

式(2)は各メッシュの環境効率性を表し、分子にはQOL（貨幣評価値）からCを引いた値、すなわちそれぞれの地区で発生している余剰を、分母にはその土地から生じる環境負荷（本研究ではGHG排出量）を計上している。GHGを目的変数とした効率性を表現する指標であり、防止策の検討に適していると考えられる。

ここでは、現状の居住者にとっての値ではなく、将来的な利用を考慮した値でなければならない。したがって、各期のGHG排出量、QOLおよび市街地維持費用の時間積分値を式(1)、式(2)の評価指標に用いている。

各指標を用いた評価結果に基づき、適応策の検討を行う。気候変動に伴う洪水特性の変化を緩和できるインフラ整備の必要性を評価し、必要であればインフラ整備を行うシナリオを設定する。

次に、環境効率EF、費用効率CFを考慮し、都市的利用可能空間の限度の決定を行う。市街地の各メッシュの効率性指標に基づいて、評価結果の低いメッシュから順に、削減目標を満たすまで撤退地区の選定を行なう。

また、資源生産性（資源の投入量当たりの財・サービスの生産量）の改善度合を表す概念の1つであるファクターの値を用いて市街地縮退政策を評価する。

$$FC \equiv \frac{CF_{with}}{CF_{without}} \quad (3)$$

$$FE \equiv \frac{EF_{with}}{EF_{without}} \quad (4)$$

ここで、FCは政策実施の有無(with/without)における対象都市全体の費用効率CFのファクター、FEは政策実施の有無(with/without)における対象都市全体の環境効率EFのファクターを表す。

4. 都市の持続性評価システム

都市構造変化によって、GHGとQOLおよびCが様々な因果経路をたどって変化する。これらを定量的に把握することができる推計システムを構築する。システムの全体構成を図-2に示す。建築物・インフラの複合体である都市を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GHG・維持費用はもとより、これらの上で行われる諸活動に伴い生じるGHGや住民のQOL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、表-2にQOLの評価項目を示す。

詳細な仕様データが得られない計画段階において、

都市全体の膨大な建築物やインフラ、諸活動の GHG や費用等の推計に必要な各々の投入資材量等を、詳細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・建設費用・維持費用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量を推計する。

現在および将来の建築物・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の推計に必要な情報をメッシュ単位で集計する。将来値は、コーホート要因法を基本とした将来人口推計モデル、住宅量推計モデル、インフラ量推計モデルの3つのモデルを用いて推計する。また、推計の空間単位は、約 500m 四方の 4 次メッシュ(約 0.263km²)とする。対象期間を、2000 年から 2049 年までとし、1 期 5 年を単位として計算を行う。

旅客交通活動に伴う CO₂ 発生量については、第 3 回全国都市交通特性調査(全国パーソントリップ調査)の結果を用いて、1 人・1 年あたりの原単位として整備する。その際、公共交通分担率に関しては QOL の構成要素の 1 つである AC 指標(公共交通のみを対象として計算した AC)を説明変数に用いたロジットモデルによる推定値を利用している。モータリゼーションの進展した地方都市では公共交通分担率が低い領域に偏ったデータしか得られず、推定結果が不安定になることから、名古屋市を対象とした区単位のデータを利用して図-3に示すロジットモデルを作成し利用している。⁴⁾これによって、空間構造変化が AC 変化を通じてモーダルシフトを生じることによる CO₂ 低減効果を計測することが可能となる。

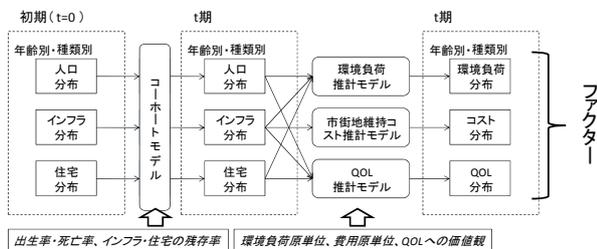


図-2 評価システムの全体構成

表-1 推計対象とする建築物・インフラ

| 分類 | 都市施設 | 細分類 | ライフタイム |
|-------------|--------|----------------|-------------------|
| 建築物 (住宅) | 戸建住宅 | 木造 | 残存率 (全国平均)に基づく |
| | | R造 | |
| | 集合住宅 | 木造 | |
| | | RC・SRC造 | |
| 交通施設 | 道路 | アスファルト舗装を仮定 | 10年 |
| 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 | - |

表-2 QOL 構成要素

| 分類 | 評価要素 | 指標 |
|-----------------------------------|--------------|---------------------|
| 交通利便性 Accessibility :AC | 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 Amenity :AM | 居住空間使用性 | 1人あたり居住延床面積 |
| | 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 Safety & Security :SS | 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 |

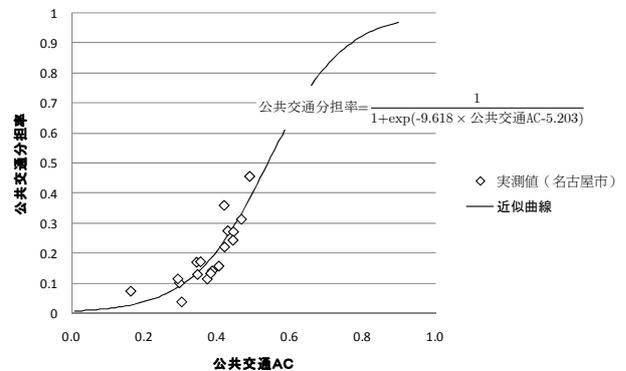


図-3 公共交通 AC と公共交通分担率との関係

5. 実都市への適用

新潟県上越市を対象としてモデルシステムの適用を行い、以下に示す知見を得た。

(1) 対象都市の概要

上越市の概要を図-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。さらに、近年、郊外へのスプロール化が著しい。2つの中心市街地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上に、郊外部のバイパス沿いにも大規模商業施設等が展開している。さらに北陸新幹線（長野新幹線）延伸開業に伴い、市南部の農業地域に新駅の開設が決まっている。このため、今後もスプロールの進展が懸念されている。また、上越市は最深積雪377cm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っている。モデルでは、除雪費用は道路の維持費用に組み込まれる形で反映される。

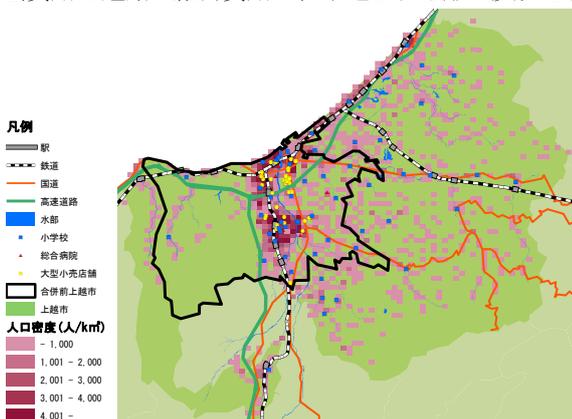


図-4 新潟県上越市の概要

(2) メッシュレベルでの3要素の評価

1人あたりGHG・インフラ維持費用・QOLの都市全体の平均値の経年推移を図-5に示す。GHGは、2006年から2015年にかけて減少し、その後は緩やかに上昇している。これは、経年的に住宅更新量は減少していくが、反対にインフラ更新量が増加していくためである。インフラ維持費用は、大きく上下に変動しながら長期的には増加している。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、集落排水の更新時期が重なる2035年からは大きな上昇がみられる。QOLは2005年から2050年の間、ほぼ一定に推移している。これらの結果は、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情報となり得る。

次に、1人あたりGHG・インフラ維持費用・QOLの、2005年から2050年にかけての累積値の空間分布を図-6

～図8に示す。1人あたりGHGは都心部よりも郊外部で大きい。これは、郊外部の方がインフラ量が多く、交通行動においても自動車分担率が高いためである。また、都心部でも近年に開発が行われた地区では、1人あたりのインフラ・住宅が多めに整備されていることから値が大きい。1人あたりインフラ維持費用も郊外部で大きい。GHGと比べて都心と郊外との差が鮮明である。1人あたりQOLについても都心部よりも郊外部で大きい。都心部の住宅では1人あたりの床面積に換算した場合、十分な広さが確保されていないことが原因であると考えられる。都心の周辺でも、健康・医療施設や就業施設へのアクセス性に優れている高田駅の南東部で大きな値を示している。さらに、近年開発されている春日山地区でも、比較的大きくなっている。

(3) 地区レベルでの効率性評価

以上で推計された詳細地区レベルのGHG・QOL・市街地維持費用に基づき、評価指標CFおよびEFを計算した結果を図-9、図-10に示す。

CF、EF値はともに鉄道沿線となっている都心部で高い値を示している。この結果は、都心部への縮退が環境・社会・経済の3要素を考慮した上での効率的な都市構造の1つであることを示唆している。

一方で、一部の郊外でも高い値を示している。この理由は、1人あたりQOLの評価値が非常に高い値を示したためである。その評価値は都心の5倍以上で算出されており、実感覚とも乖離がある。この理由としては、住宅コーホートの設定において新規住宅建設量が現状の1人あたり延床面積の水準を維持するように設定されているため、人口が減少しても都心の1人あたり住宅延床面積は狭小なまま改善されず、郊外に比べ比較的に不利に評価されたことが考えられる。また、住居以外の都市的土地利用の価値を考慮していないことも、都心部を過小に評価する要因となっている。このことから、住宅更新のルールやQOLの評価指標を精査することが課題として挙げられる。

(4) バックキャストिंगによる撤退地区の選定

2章で示した、バックキャストिंगのフローにもとづき、評価指標CF・EFに従って、20メッシュ(5%)づつ撤退を行なった場合のGHG削減量とQOL減少量および市街地維持費用(C)削減量との関係について検討する。なお、このとき撤退地区の人口は被撤退地区の現在の人口割合に基づき均等に配分されるものと仮定している。

図-11に縦軸にGHG削減割合、横軸に撤退に伴い減少するQOL割合をプロットした結果を示す。また、比較対象としてランダムに選択したメッシュから撤退を

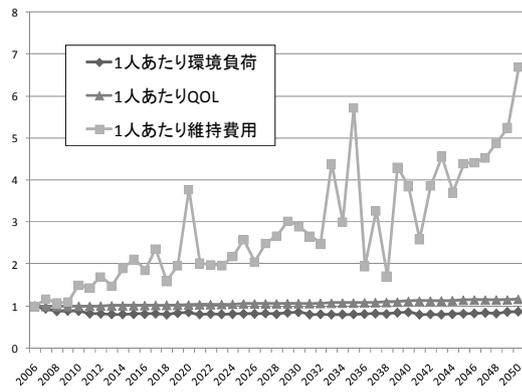


図-5 各要素の経年変化

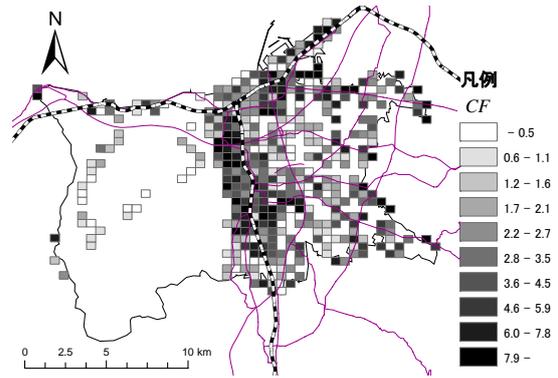


図-9 CFの分布

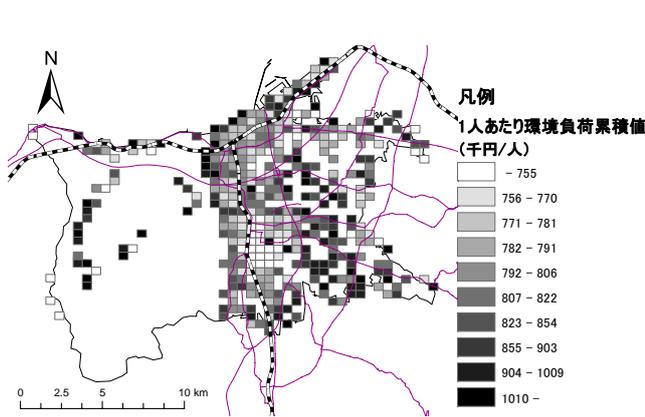


図-6 1人あたりGHG(2005年～50年累積値)

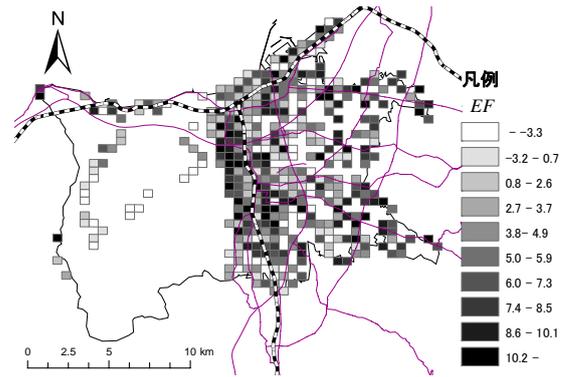


図-10 EFの分布

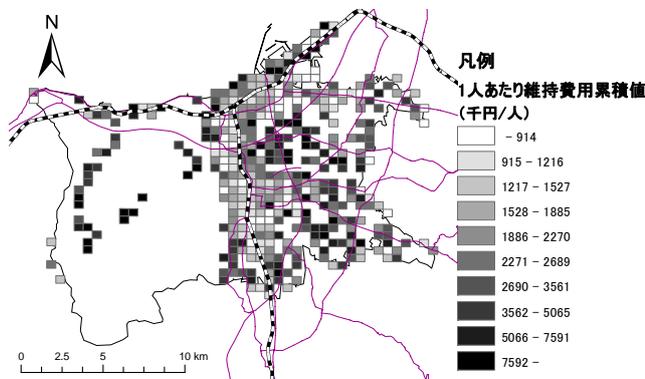


図-7 1人あたり費用(2005年～50年累積値)

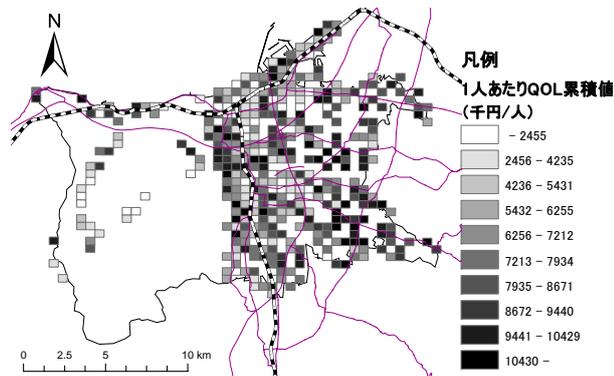


図-8 1人あたりQOL(2005年～50年累積値)

行った場合についても示している。例えば GHG20%の削減を達成するためには、EF にしたがって撤退地区を選定した場合、非効率な地区からの全体の 20%にあたるメッシュで撤退が必要になることが分かる。一方、CF にしたがって撤退地区を選定した場合、30%の撤退が必要である。このとき、市街地縮退に伴う総 QOL の低下分は CF で 10%程度、EF で 7%程度になる。したがって、ランダム撤退時の 23%減に比べて大幅に QOL の低下が防がれている。

GHG 削減と同時に削減される市街地維持費用の関係をプロットした結果を図-12に示す。QOL と同様に指標にしたがって、地区を選定した方が、効率的に維持費用の削減ができていることがわかる。

GHG20%の削減を達成時の都市全体の費用効率 CF と環境効率 EF の改善度（ファクター）を検討する。指標 CF にしたがって、撤退地区を選定した場合 FC (式(3))は 1.36 倍、FE (式(4))は 1.25 倍となっており、指標 EF にしたがって撤退地区を選定した場合 FC は 1.28 倍、FE は 1.26 倍となっている。このことから、市街地の集約を行なうことにより GHG 削減目標を達成しつつ効率性を改善できる可能性があることが示された。ただし、今回の推計には移転保証費等、実際の政策実施に必要な経費は含まれていないことに注意が必要である。

6. まとめ

本研究では、地球環境制約を前提としたバックキャスト・アプローチによる都市空間構造の導出方法の枠組みを示した。その過程で、都市域を環境・社会・経済のトリプル・ボトムラインから評価し、その持続可能性を評価する指標を定義した。さらに都市空間構造とCO₂排出量とQOLおよび市街地維持コストとの関係を、詳細な空間単位で分析可能なシステムを開発した。

実際の地方都市に適用しGHG削減制約を前提とした都市空間構造の導出を行った結果、都心部への縮退が環境・社会・経済の3要素を考慮した上での効率的な都市構造の1つであることを示唆している。

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) Sustainability社：<http://www.sustainability.com/>
- 2) UNCSO : Indicators of Sustainable Development: Guidelines and methodologies, 2001.
- 3) N.Shibahara, N.Goto, 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, pp.261-264, 2008.
- 4) 竹下博之、加藤博和：ポテンシャル型アクセシビリティ指標を用いた公共交通整備のモーダルシフト効果分析手法の開発，中村文彦主査：環境負荷低減のための都市部路線バスの活用方策(5章執筆分担)，日本交通政策研究会シリーズA-476, pp.28-38, 2009.

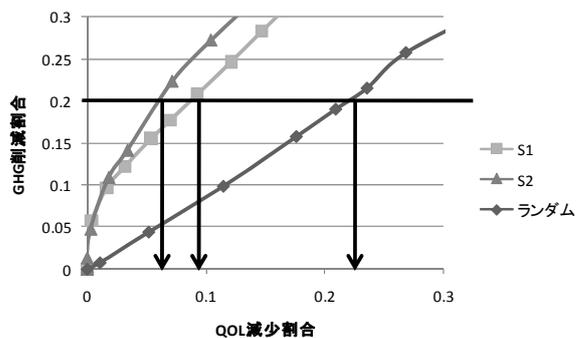


図-1-1 GHG削減目標とQOL減少割合

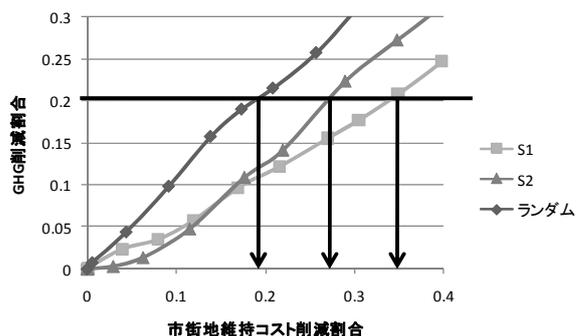


図-1-2 GHG削減目標と市街地維持費用削減割合

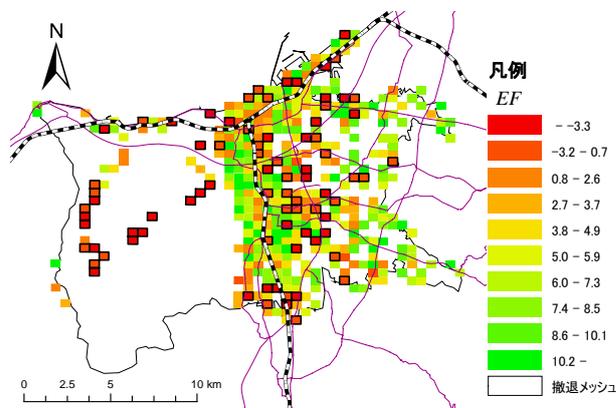


図-1-3 EFに基づく撤退ゾーン (GHG20%削減)