

自動車への依存が低い場所で都市構造リスクが高くなることを明らかとしている。

安立ら¹¹⁾は、都市サービスが消滅する都市構造リスクに着目してどのような都市サービスで構成される地区において、このリスクが顕在化する可能性が高いかの考察を行っている。その結果、快速停車駅のような都心部から少し離れた地区の自動車に依存していない人に多く負荷がかかるという、従来の郊外からの消滅という考え方からは外れた地区・人においてリスクが高いことを示している。

清水ら¹²⁾は、都市郊外部における高齢化および人口減少が進展しつつある住宅団地からの消滅の考え方、消滅に伴う様々な費用（例えば、引っ越しに伴う金銭的・非金銭的費用に対する住民への補償金）と便益（例えば、消滅団地の住宅やインフラの維持管理費用および建て替え・大規模更新費の節約）を整理し、消滅の条件および消滅の最適タイミングの算出方法を提案している。提案した方法を千葉県船橋市の2つの郊外住宅団地に適用したケーススタディの結果、一方の住宅団地の住宅建て替えのタイミングに、当該団地の全住民がもう一方の住宅団地に移住することが社会的に望ましいこと等が示している。

谷口ら¹³⁾は、都市のコンパクト化による防災上の諸課題への影響について、整備・政策メニューを検討するためのシステムである SLIM CITY を実際の都市に適用し、水害軽減のシナリオを盛り込むことで、都市コンパクト化政策と水害軽減方策の連携可能性について検討し、その有効性を明らかにしている。

千原ら¹⁴⁾は、地域の QOL の維持・向上を目的とし、将来の人口減少による生活サービス施設の消滅を考慮しながら、居住地の集約先の選定と集約を行うタイミングの算出を行っている。熊本県山都町のケーススタディの結果、基本的には QOL の低い郊外部から移転すべきとなるが、QOL が比較的高い地域であっても、生活サービス施設消滅に伴う QOL 低下が大きければ移転すべきと結論付けている。

■ 「小さな拠点」に関する先行研究論文

「小さな拠点」に関する論文としては、以下の2つの論文が挙げられる。

森尾ら¹⁵⁾は、今後の「小さな拠点」の検討における示唆を得るために、全国を対象に現状の施設配置で「小さな拠点」の数とその分布、「小さな拠点」が成立する人口規模等を把握するとともに、「小さな拠点」及び周辺地域の人口動態と人口維持機能について分析を行っている。また、「小さな拠点」とバス路線や「道の駅」との位置関係、バス路線がある地域の人口動態についても分析を行っている。谷口ら¹⁶⁾は、「小さな拠点」の事例である地域が、生活サービス施設の種類等からどのような特徴があるかを整理している。谷口らの結果では、「小さな拠点」の類型化で全体の6割を占めた F. 公的施設型拠点や G. 低集積拠点では生活利便性施設数が少なく、これらの拠点が将来的にも拠点と呼べるだけの客観的妥当性を有しているかは改めて吟味すべきであると結論付けており、拠点に必要な生活利便施設を確保できるように拠点を形成すべきだと考えられる。

④ ライフスタイル変革

ライフスタイル変革に関する具体的な取り組みは、公共交通の利用促進、エコ通勤などのように、1人1人のモビリティ（移動）を、社会的にも個人的にも望ましい方向（過度な自動車利用から公共交通等を適切に利用する等）に変化することを促す、コミュニケーションを中心とした交通政策であ

るモビリティ・マネジメントを中心に行われている。国土交通省では、モビリティ・マネジメントの基本的な考え方や各地での取組事例を紹介するパンフレットを作成している。また、一方、ライフスタイル変革に関する学術的な研究は、土木学会、日本都市計画学会、日本モビリティ・マネジメント会議（Japanese Conference On Mobility Management : JCOMM）など多くの学会において多数報告されている。例えば、土木学会からは書籍「モビリティ・マネジメントの手引き」、日本モビリティ・マネジメント会議では、モビリティ・マネジメントの「実務発展」と「技術発展」を目指して、国内の様々な取り組みや研究を JCOMM 賞として毎年表彰している。

⑤ CO₂削減

CO₂ 削減（気候変動の緩和）に関する政策的な議論は、気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change : IPCC）の第 3 作業部会の評価報告書（最新の報告書は、第 5 次評価報告書（Fifth Assessment Report : AR5）「気候変動 2014－気候変動の緩和（Climate Change 2014 - Mitigation of Climate Change）」）、低炭素まちづくりを促進するために 2012 年度に成立した「都市の低炭素化の促進に関する法律（エコまち法）」などを通じて行われている。また、低炭素まちづくり計画の作成を支援するツールとして「二酸化炭素削減効果シミュレーション・ツール（CO₂-Reduction Effect Simulation Tool : CREST）などが、国交省から自治体向けに配布されている。しかし、エコまち法による低炭素まちづくり計画を作成した自治体は、2016 年 1 月 1 日現在 21 自治体（2014 年 11 月 1 日現在 16 自治体）にとどまっており、現時点では大きな広がりを見せていない。一方、CO₂削減（気候変動の緩和）に関する学術的な研究は、土木学会、日本都市計画学会など多くの学会において、交通行動・都市構造の変化、技術革新といった視点から多数報告されている。

参考文献

- 1) Yukiko Hirabayashi, Roobavannan Mahendran, Sujan Koirala, Lisako Konoshima, Dai Yamazaki, Satoshi Watanabe, Hyungjun Kim & Shinjiro Kanae, Global flood risk under climate change, Nature Climate Change 3, 816–821, 2013.
- 2) 佐藤歩, 川越清樹, 風間聡, 森杉壽芳, 気候モデルを利用した日本列島洪水リスク評価, 水工学論文集, 53, 847-852, 2009.
- 3) 社会資本整備審議会, 新しい時代の都市計画はいかにあるべきか. (第二次答申), 2007.
- 4) 国土交通省, 2012 年の都市の低炭素化の促進に関する法律, http://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/eco-machi.html (参照 : 2016 年 3 月 26 日)
- 5) OECD, Green Growth Studies Compact City Policies, 2012.
- 6) 水野伶那, 佐尾博志, 大西 暁生, 神奈川県における浸水発生に適応した住宅の再配置による被害額の軽減効果, 水文・水資源学会誌 28(5), 245-260, 2015.
- 7) 国土交通省, モビリティ・マネジメント, <http://www.mlit.go.jp/common/000234997.pdf>, (参照 : 2016 年 3 月 26 日)
- 8) 土木学会土木計画学研究委員会土木計画のための態度・行動変容研究小委員会, モビリティ・マネジメントの手引き, 土木学会, 2005.
- 9) IPCC, Climate Change 2014 - Mitigation of Climate Change, 2014.

10) 国土交通省 都市局 都市計画課, 二酸化炭素削減効果シミュレーション・ツール利用マニュアル, 2014.

⑥ コベネフィットモデル

気候変動の適応策 - 緩和策の実施を都市・地域縮退がもたらすコベネフィットの駆動力としてとらえ、図のようなコベネフィットモデルを考案し、各アローが示す「災害リスク最小化」、「コンパクト化・治水安全度向上」、「ライフスタイル変革」、「CO₂削減」という 4 要素について研究事例の調査を実施した。

(1) 災害リスク最小化 (洪水/土砂災害)

現在、グローバルスケールでの気候変動の洪水・渇水リスクの変化を推定する研究が進んでいるものの、日本スケールでの推定は未だ精度上の課題が残り、特に洪水に関しては、堤防破堤の考慮等、技術的課題も残っており、適応策立案に耐えうる計画論的な外力設定は大きな課題である。

(2) コンパクト化・治水安全度向上

都市のコンパクト化 (コンパクトシティ) に関する政策的な議論は、各種答申や法律を通じて行われてきている。一方、コンパクトシティに関する学術的な研究は多数報告されており、一部の都市では既に都市構造再編の取り組みも始まっている。一方治水安全度の向上については、平成 9 年以降、各水系での河川整備基本方針、整備計画の立案がすすみ、現在治水安全度の向上の取り組みが進行中である。

(3) ライフスタイル変革

心理学的アプローチによる交通・居住地選択行動の変容を促す研究が多く実施されてきている。例えば、書籍「モビリティ・マネジメントの手引き」(土木学会)、日本モビリティ・マネジメント会議などでの研究報告、活動など。

(4) CO₂削減

CO₂削減に関する政策的な議論は、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 3 作業部会の評価報告書、「都市の低炭素化の促進に関する法律 (エコまち法)」などを通じて行われている。また、土木学会、日本都市計画学会など多くの学会で、交通行動・都市構造の変化、技術革新に関する研究が多数報告されている。

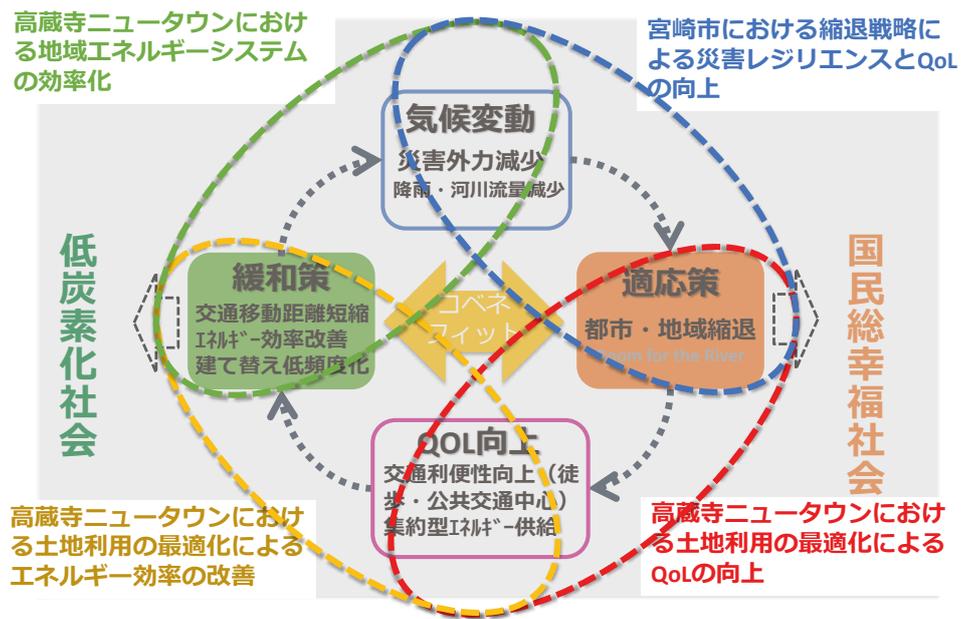


図-69 QoL と環境効率の向上を介した適応策・緩和策評価のフレームワーク

(2) 都市・地域縮退がもたらすコベネフィットの評価モデルシステム開発

(a) 詳細地区スケールでの空間～環境コベネフィットの評価指標の定式化

(1)での研究事例調査の結果を基に、都市・地域構造の変化が低炭素性その他様々な要素に及ぼす効果について定式化を行った。既に申請者らは、CO₂排出量、QOL尺度、インフラ維持費用の3つを評価指標を500mメッシュ単位で計量可能なモデルを開発しており、これを改良した。CO₂排出量は、コンパクト化に伴う移動距離や交通機関選択の変化を考慮できるよう旅客交通起源分のモデル詳細化を行う。QOL尺度は、従来考慮してきた機会獲得性・居住快適性・安心安全性の3要素に加え、地域コミュニティの強さや文化的な蓄積を含めた評価を可能とするようにした。インフラ維持費用はそれも含めた包括的な住民サービスの費用を算定できるようにした。これらについて、都市・地域構造やインフラ供給状況による変化を検出可能な関数としてモデル化を行った。

i) QOL 評価システム

近年様々な政策を「生活の質」や「豊かさ」を表す指標で評価する試みが多数行われている。日本における先駆けとして、1974年に国民生活審議会から「社会指標—よりよい暮らしへのものさし」が公表された。その後、1985年には、経済企画庁(現内閣府)から「国民生活指標」が、1992年には「新国民生活指標(PLI)」が策定された。この指標は活動領域に「住む」、「費やす」、「働く」、「育てる」、「癒す」、「学ぶ」、「交わる」の8項目を、生活評価領域に「安全・安心」、「公正」、「自由」、「快適」の4項目を設定し、人々の生活の豊かさを評価した。これらは項目間の統合がされていないため、項目間のトレードオフの関係や、施策代替案による効果の優劣の評価を行うことが困難である。

都市の空間的環境から生活の質を定量的に計測する研究も多数現れた。例として、吉田ら(1992)は、環境特性、個人属性などの客観的変数から、生活の質を評価する方法を提示した。加知ら(2006)は、生活環境質を居住者の価値観によって重み付けしつつ、人間の余命に換算することで、生活環境を小地区単位で定量的に評価する手法を構築した。また、社会資本整備について生活の質から評価する研究も存在する。その例として、林ら(2004)はPLIを参考にして生活質に基づく評価方法で、仮想の社会資本整備による効果を計測した。土井ら(2006)は、海岸整備をQOL概念に基づいて評価した。しかし、これら生活の質に基づく評価手法では、道路整備の実事業を評価するに至っていない。

本研究では、Myers(1998)および加知ら(2006)に従い、生活環境質(Quality Of Life: QOL)が、施設の充実度などの居住環境の物理量を表す生活環境質向上機会(Life Prospects: LPs)と、住民の主観的な価値観から決定されるものとする。

以上で定義した生活環境質の評価式を、加知らを参考に式(2.1)のように定義する。

$$QOL_{ig} = \mathbf{w}_g^T \cdot \mathbf{LPs}_i \quad (2.1)$$

ここで、 QOL_{ig} は個人属性グループ g の地区 i での QOL 値、 \mathbf{w}_g は個人の主観的な価値観、 \mathbf{LPs}_i は地区 i での生活環境質向上機会とした。

生活環境質向上機会の評価要素は既往研究を参考に表 9 のように設定できる。

表-21 生活環境質向上機会の評価項目

構成要素		評価項目
I	経済・雇用機会	通勤利便性
		雇用継続機会
		住宅資産価値
II	生活・文化機会	医療機会
		余暇機会
		買物機会
III	居住・移動快適性	居住快適性
		走行快適性
		周辺快適性
IV	安心安全性	ネットワーク信頼性
		災害危険性
		事故危険性
V	環境負荷性	景観調和
		大気環境
		音環境

アンケートより、価値観 w の重みを表すパラメータの推定を行う。居住地の選択確率は、二項ロジットモデルで表現できるものとし、構成式を式(2.3)、(2.4)に示す。

$$P_k^X(m) = \frac{\exp(\boldsymbol{\beta}^X \cdot \mathbf{x}_m^X)}{\exp(\boldsymbol{\beta}^X \cdot \mathbf{x}_m^X) + \exp(\boldsymbol{\beta}^X \cdot \mathbf{x}_n^X)} \quad (2.3)$$

$$U_{ik}^X = \boldsymbol{\beta}^X \cdot \mathbf{x}_i^X + \varepsilon_{ik} = \beta_1^X x_{i1}^X + \beta_2^X x_{i2}^X + \beta_3^X x_{i3}^X + \varepsilon_{ik} \quad (2.4)$$

ここで、 $P_k^X(m)$ は個人 k が構成要素 X によって居住地 $i(m$ または $n)$ に m を選択する確率、 $\boldsymbol{\beta}^X$ は構成要素 X の評価指標の係数ベクトル、 \mathbf{x}_i^X は構成要素 X の評価指標ベクトル、 U_{ik}^X は個人 k の構成要素 X による居住地 i に対する好ましきである。式(2.4)におけるパラメータ $\boldsymbol{\beta}$ は居住地選択に関する部分効用であり、生活環境に対する価値意識を示す。このパラメータを最尤推定法を用いて推定する。

重みパラメータは LPs 各要素のパラメータと、基準とした計測指標のパラメータの相対的な重みとして換算される。住宅賃料を基準とした際の評価項目 j の重みパラメータ w_{mj} と、地震による損失余命を基準とした際の評価項目 j の重みパラメータ w_{lj} を算出する式を、それぞれ式(2.5)、(2.6)とする。

$$w_{mj} = \frac{\beta^j}{\beta^{money}} \quad (2.5)$$

$$w_{Lj} = \frac{\beta^j}{\beta^{LLE}} \quad (2.6)$$

ここで、 β^j を評価項目 j のパラメータとし、 $money$ は住宅賃料、 LLE は災害危険性による損失余命とする。

本年度は、福島県沿岸域を対象に住民の生活環境の定量的評価のための基礎となる GIS データベースを構築するとともに QOL 構成要素の算定を実施した。ここでは、住民の QOL を定量的に評価するため、先行研究で作成した QOL 評価システムを援用する。このシステムは、QOL 値を社会資本や公共・民間施設へのアクセス性を表す交通利便性 (AC)、居住性や景観の良好度を表す居住快適性 (AM)、および災害や事故・犯罪に対する災害安全性 (SS) の 3 分類からなる、居住地区における環境を左右する物理量 LPs と、そこに居住する住民の主観的な価値観を表す重み (w) との積和によって決定されると定義する。表 10 にその概要を示す。

また、小地区単位でのエネルギー利用特性の把握を目的として、再生可能エネルギーや未利用エネルギーの GIS データベースを整備した。今後は、バイオマス等も含めて評価対象を拡張し、既存の QOL 評価との統合を目指す予定である。

さらに、対象地域における将来の人口分布に関するシナリオ構築に着手した。コーホートモデルを用いた自治体単位でのマクロ推計からは、津波被災者の高台移転・再定住化が完了後も新地町・相馬市・南相馬市の 3 市町で約 14,000 人が避難生活を続けることとなる共に、定住人口に対して急速な高齢化が進展する可能性があることが明らかになった。次年度は、自治体が公表している復興計画に関する情報収集や避難者の中長期的な居住地選択傾向の分析に基づき、マクロ推計値をダウンスケールし人口分布に関する中長期シナリオを設計する。その上で、代替的なシナリオ間を QOL の観点から比較評価することにより、中長期の復興プロセスに対する計画支援情報を提供することを目指す。

表-22 QOL 各評価要素

分類	評価要素	LPs 算出の考え方
交通 利便性 Accessibility (AC)	就業利便性	就業地までの所要時間で評価。今回は各メッシュから最寄の駅までの所要時間(徒歩(4km/時)と自動車(20km/時)の平均速度(12km/時)での移動を想定)で評価。交通行動モデルのアウトプットである通勤にかかる期待最小費用を時間価値(40円/分)で割戻すことにより算出。
	教育・文化利便性	最寄の小学校と中学校までの平均所要時間(徒歩(4km/時)での移動を仮定)で評価。また、通学路の特性を考慮して道路ネットワークを考慮せず、目的地まで直線での移動するものと仮定。
	健康・医療利便性	最寄の一般病院までの所要時間(徒歩(4km/時)と自動車(20km/時)の平均速度(12km/時)での移動を想定)で評価。
	買物・サービス利便性	最寄の商業施設までの所要時間(自動車(20km/時)での移動を仮定)で評価。道路ネットワークを考慮せず、目的地まで直線で移動するものと仮定。交通行動モデルのアウトプットである私事交通にかかる期待最小費用を時間価値(40円/分)で割戻すことにより算出。
居住 快適性 Amenity (AM)	居住空間使用性	国勢調査 H22 から市町村毎で人口 1 人あたり居住延床面積を算出。世帯の平均延床面積を推計し、平均世帯人数で除算した。
	建物景観調和性	周辺の建物の統一感で評価する。対応するデータが存在しないため基本的には 0.5 と設定。シナリオ分析ではオプションとして変化した場合を分析。

	周辺自然環境性	徒歩圏内に緑地が存在しているかどうかで評価。800m 圏内に 1 ヘクタール程度のまとまりがある森林がある場合 1, 農地(田畑)がある場合 0.5 と設定。森林・農地は国土数値情報の土地利用細分メッシュより作成。
	局地環境負荷性	交通騒音レベルで評価する。対応するデータが存在しないため基本的には 0.5 と設定。シナリオ分析ではオプションとして変化した場合を分析。
災害 安全性 Safety & Security (SS)	地震危険性	地震によるリスク。耐震設計基準にもとづいて、表層地盤における地震の主要動(S波)の伝わる速度が 0~200m(沖積層・軟弱地盤相当)で 1, 200~400m で 0.5, 400m 以上(洪積層相当)で 0 とする。データソースは地震ハザードステーション。
	洪水危険性	ハザードマップより得られるデータに基づき、100 年に 1 度の確率で発生する豪雨により床上浸水のリスクがある場合 1, 床下浸水のリスクがある場合 0.5, 洪水リスクが全くない場合は 0 と設定。
	犯罪危険性	年間街頭・侵入犯罪件数。対応するデータが存在しないため基本的には 0.5 と設定。シナリオ分析ではオプションとして変化した場合を分析。
	交通事故危険性	年間人身事故発生件数。対応するデータが存在しないため基本的には 0.5 と設定。シナリオ分析ではオプションとして変化した場合を分析。

ii) 地域エネルギー事業の実態解析

① はじめに

地球温暖化問題や福島第一原子力発電所事故等を受けて中長期エネルギー需給の見直しに対する不透明感が増す中、持続可能な社会の実現のため、その基盤として地域資源を活用した分散型エネルギーの利用拡大に注目が集まっている。得に、東日本大震災を契機として、大規模集中型のエネルギーシステムへ大きく依存してきた状況を見直し、電熱の併給や地域の未利用資源活用が可能となる分散型システムを導入する取り組みがより活発になっている。分散型のエネルギーシステムは低炭素・省エネルギーに加えて、災害耐性、エネルギー地産地消を通じた地域活性化等の観点からその有効性が指摘されている¹⁾。また、地方の自治体においては、地域資源を有効活用した分散エネルギーシステムの導入に伴い、住民や企業の支払うエネルギー料金が地域で環流することによる経済活性化への期待も大きい。

また、日本のエネルギーフローを俯瞰して考えた場合、発電時発生する排熱や、民生部門の熱利用部門が非効率であることが指摘されている。このような状況を改善する方法の一つとして発電排熱を有効活用するコージェネレーションシステムが考えられる。しかしながら、既存の発電方法に対して高コストとなる等の理由によりコージェネは発電設備全体の 3%に留まり、現時点では十分に普及していない。日本の 2030 年の CO₂ 排出量削減目標を定めた「約束草案」²⁾においてエネルギーの面的利用が対策としてリストアップされるとともに、その前提となっている「長期エネルギー需給見直し」³⁾においては、2030 年のコージェネレーション導入量の数値目標 (1190 億 kWh 程度) が設定され、それを支える燃料供給体制を整備していく旨が明記されている。

一方で以下のように技術進歩も報告されている。近年、デンマーク等の欧州では、第 4 世代熱供給 (4th Generation District Heating, 4GDH) と呼ばれる 55°C 程度の低温の温水を媒体として利用するシステムの導入が進んでいる。供給温度を下げることにより、電熱併給ユニットを高い効率で運転することを可能とし、多様な未利用熱源の熱供給ネットワークへの接続が可能となる。また、媒体と環境温度との温度差が小さくなるため、熱供給ネットワークからの熱損失を削減できる。このようなメリットのため、地域熱供給のコストが低下し、適用範囲が拡大している⁴⁾。日本においても、北海道・下川町において 4GDH の技術を活用した地域熱供給システムの社会実装が進みつつある。

以上のように、分散型システムのデザインには、エネルギー需要密度や地域特有の再生可能エネル

ギー・未利用エネルギーのポテンシャル等の地域条件を考慮して多様なエネルギー変換機器の中から適切なものを選択し組み上げることが必要不可欠であるため、その導入ポテンシャルは不透明であり、定性的な議論に留まっている。そのため、導入適地の特定や今後の普及状況の予測等のポテンシャルの把握および、その社会・環境・経済への影響の評価は急務である。

② 目的

これまででも、実データに基づき地域エネルギーシステムの実態研究が実施されてきた。名古屋ら⁵⁾では、全国123プラントを対象として、省エネルギー性に影響を与える要因を分析している。また、曹・尾島⁶⁾では東京都心部におけるプラントの稼働実態を明らかにしている。これらの研究はエネルギー効率の観点から、地域エネルギーシステムの実態を明らかにしているが、コスト面での検討や今後の普及可能性に関する議論は十分ではない。一方、佐土原ら⁷⁾では、今後のポテンシャルに関する議論が展開されているが、未利用エネルギーを中心とした既存技術に基づく検討が実施されており、コージェネレーション等の技術に関しては検討されていない。また、小田ら⁸⁾ではコージェネレーションの都市規模別の導入ポテンシャルが評価されているが、都市構造を概略化しているため、実体的な事業性を考慮した検討とはなっていない。

また、地域エネルギーシステムの個別事例に関する調査研究⁹⁾¹¹⁾は実施されており、その設計手法に関する一定の知見が蓄積されつつある。しかしながら、これらの検討は、実データやマクロ的な枠組みとの関係が十分に議論されてこなかった。

そこで本研究では、実データに基づき既存の地域エネルギーシステムの事業構造やエネルギー需給バランスの実態を検討し、社会経済および環境への影響を評価する。その上で、モデルを用いた数理最適化計算との比較を通じて、境界条件とシステムとの関係を精査することで、既設のシステムの有効活用の方法や新たな地域への普及展開の可能性について議論する。

③ データと基本特性

既存のデータを活用して、既存事例が豊富な首都圏における地域エネルギーシステムの導入状況を検討する。なお、首都圏とは東京都およびその周辺の埼玉県、千葉県、神奈川県を一体とした広域とし、本研究ではこの圏域を空間データを用いた分析を実施とする。ただし、熱供給事業の情報に関してはサンプル数をできるだけ多くするため、上記の首都圏に茨城県と群馬県のデータを加えて分析する。

✓ エネルギー需要の空間分布

首都圏におけるエネルギー需要の空間分布に関するデータを作成する。ここでは、地区スケールでの熱供給事業の実現可能性を検討するため、幹線道路、河川等で分断される可能性が低く、事業実施の検討が可能なまとまりである町長目の単位でデータを整備する。エネルギー需要の推計方法は国勢調査と経済センサスより得られる町長目単位の世帯数と従業員数に排出原単位を乗じることにより算出する。家庭部門の排出原単位は「家庭用エネルギーハンドブック」の報告値(27.7GJ/世帯/年)を用い、業務部門については「総合エネルギー統計」と「経済センサス」より対象地区全体での従業者一人あたりを算出し需要原単位(26.2GJ/人/年)として利用した。評価結果を図-1に示す。(同図には後述する、地域熱供給事業の実施地点についても示している。) エネルギー需要分布は東京都心部と放射状に延びる幹線鉄道の周辺部で高い値を示している。

✓ 地域熱供給事業に関する整理

地域熱供給事業の情報が網羅的にまとめられている「地域熱供給事業便覧」を活用して分析する。ここでは、平成 26 年度版のデータを用いる。

まず、エネルギー製造方法の差異に基づいて以下のように分類する。コージェネレーションシステムを持つ区域もしくはコージェネ施設より排熱を購入する地区を「コージェネレーション (CG) 型」、清掃工場等より排熱を購入する区域を「工場排熱利用 (EH) 型」とし、残った区域のうちヒートポンプによる熱供給能力が全体の 50%以上の区域を「ヒートポンプ (HP) 型」、それ以外を「一般システム (GS) 型」とした。また、規模に関してはべき乗則に従っており平均値に意味を見いだしにくいいため、熱エネルギー需要量が 1,000TJ/年より大きい区域、200TJ/年のより大きい区域、それ以下の区域の 3 つ区分し、それぞれを対象として分析を実施する。

表-1 にそのクロス集計結果を表-2 に規模分類別の概要を示す。ヒートポンプ型のシステムが採用されている区域は小規模地区が多く、CGS 型はやや中規模区域に偏る傾向がある。また、図-1 に地図上にプロットした結果を示す。首都圏において、域熱供給事業は 81 区域で実施されている。地理的な分布をみると、東京の都心部にその大部分が集中している。全体の供給区域の面積は 17km²で、これは山手線の内側の面積 (63km²) の約 1/3 に相当する。また、供給対象の建物延床面積は 36km² である。熱導管の総延長は 325km で、区域あたりの平均は約 4km となっている。販売熱量の地域全体での合計は 15PJ であり、業務での利用が大半を占める。また、冷熱需要が温熱需要に比べて多く、これも冷房需要が多い業務利用が主体であるためであると考えられる。また、事業認可および事業開始の時期は 1990 年代前半に集中している。

また、熱エネルギー製造システムの平均的な加熱能力と冷却能力はほぼ同等であるが、GP 型では加熱能力の方が大きく、HP 型では冷却能力が比較的に大きくなる傾向がある。

✓ エネルギー需要密度と熱供給事業の関係

エネルギー需要密度ごとの町丁目の度数分布と、地域熱供給事業の立地状況をまとめた結果を図-2 に示す。町丁目のエネルギー需要密度が高まるにつれて、地域熱供給事業が実施されている可能性が高まっている。しかしながら、町丁目の需要密度はべき乗分布の特性を示し 5TJ/ha 以下の町長目が大半しめており、このようなエネルギー需要密度が低い地区においては、地域熱供給事業の立地確率は 0 に近い値となる。また、20TJ/ha 以上の地区においても、地域熱供給事業が実施される確率は 10%前後の確率に留まっている。また、密度の高い町丁目はサンプル数が少ないため、グラフ上は安定した値を得ることができないが、需要密度が 80TJ/ha の地区では 9 地区のうち 2 地区で事業実施されており、22%の確率となる。

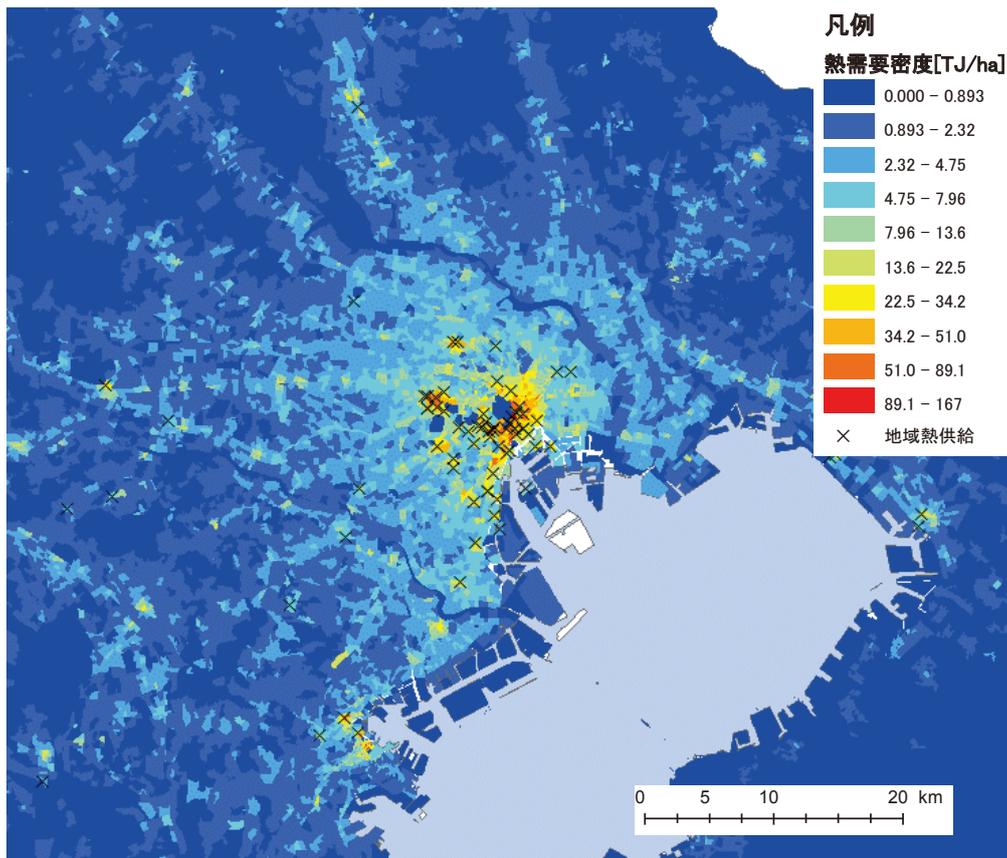


図-70 首都圏における熱供給事業の分布状況

表-23 地域エネルギーシステムの分類

	G S	C G	H P	E H	合計
大規模	1	1	0	1	3
中規模	7	12	1	1	21
小規模	29	8	17	3	57
合計	37	21	18	5	81

表-24 地域エネルギーシステムの平均特性

	従業員数	区域面積 (m ²)	延床面積 (m ²)	販売熱量 (GJ)
大規模	70	1,447,667	2,596,508	1,287,918
中規模	28	265,298	743,199	323,372
小規模	12	124,879	225,434	89,776
全体	18	210,276	447,487	207,831

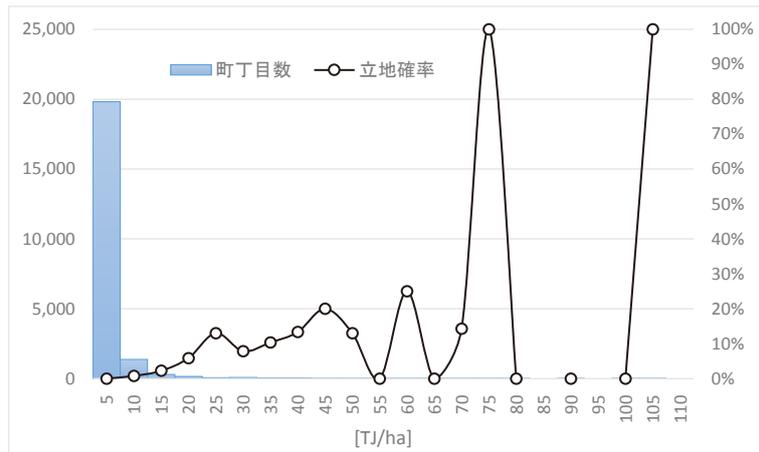
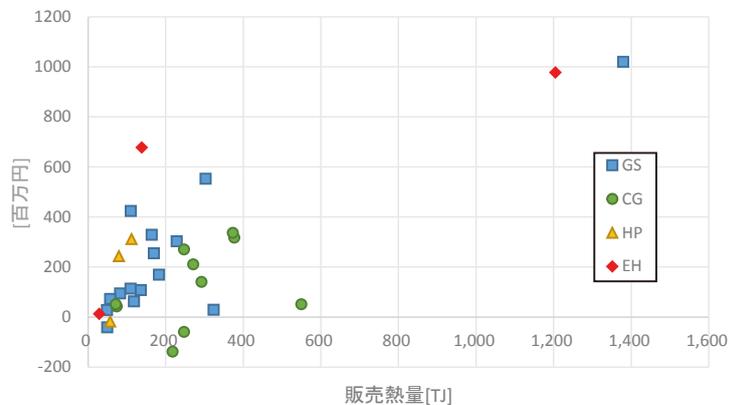


図-71 エネルギー需要密度と熱供給事業の立地率



ここで R は収入を、 C_1 、 C_2 、 C_3 は熱供給事業の費用を表し、具体的な定義は以下の通りである。

- ・製造費 C_1 ：「製造設備」の維持及び運転に関する費用
- ・供給販売費 C_2 ：温水、冷水又は蒸気の供給販売に直接又は間接に要した費用
- ・一般管理費 C_3 ：業務管理のために直接又は間接に要した営業費用であって、製造費及び供給販売費以外の費用

✓ 費用構造の検討

全サンプル合計における営業費用の内訳は、製造費が 89%とその大半を占め、供給販売費が 5%、一般管理費が 6%程度である。

各費用項目の決定要因について分析することを目的として、地区の面積および販売熱量を説明変数として回帰分析を実施した。全ての説明変数を採用した Model1 の結果を表-3 に示す。製造費用は販売熱量により規定され、また、供給販売費や一般管理費に関しては、販売熱量との関係は有意ではなく、供給区域の面積に依存している。

ただし、説明変数として採用した、販売熱量、延床面積、区域面積は相関関係があり、パラメータの値については多重共線性のため信頼できる値が得られないと考えられる。そこで、Model1 の推定結果および、各費用項目の定義を考慮して、関連の深い要因のみを説明変数として採用した Model2 の結果を表-4 に示す。これより販売熱量 1MJ 増加するにつれて、製造費が約 3.97 円増加し、延床面積が 1m² 増加すると供給販売費が 165 円、区域面積が 1m² 増加すると一般管理費が 91 円増加することになる。

✓ 事業収入の検討

「便覧」より地区ごとの売上高と販売熱量に関する情報が得られる。そこで、売上高を販売熱量で除することによりエネルギー価格を求めた、販売熱量とエネルギー価格の関係を図-4 に示す。規模の大きさに応じて販売価格が低下していく傾向を示し、最大で 12 円/MJ 程度、最小で 4 円/MJ 程度であり、地区ごとに大きな差があることが分かる。なお、供給システムの類型ごとの差は見られない。建物ごとの個別熱源装置により熱供給を実施した場合、設備投資費用も含めて 5.7 円/MJ 程度での供給が可能となる。したがって、規模の小さい区域においては、地域エネルギー供給システムの導入により、需要家側にコストメリットが発生していない。このことより、事業者の利潤は確保されているが、エネルギー製造の非効率性に起因するコスト上昇分が需要家へと転嫁されている可能性があることが分かった。これより、分散型の地域エネルギーシステムには、災害時においても継続的な利用が可能なる等のメリットがある一方で、コストの観点からは消費者の便益が損なわれている可能性がある。

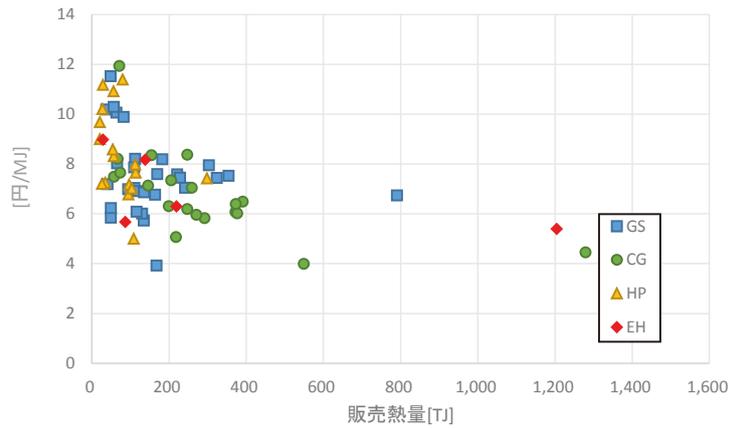


図-73 熱エネルギー販売価格

✓ 事業収支構造の検討

Model2 におけるパラメータの推定値に基づいて、事業収支が黒字化する境界を推計しその結果を図-4 に示している。ここでは、対象地区の平均値に基づいて、容積率を 213%と仮定し、熱エネルギー販売価格の設定値として需要家がエネルギーコスト削減を実現できる 4.5 円/MJ の場合と実データで観察された最大値である 12 円/MJ の場合を示す。図-2 に示したように多くの地区では事業収支はプラスとなっているが、これは、エネルギー価格が高く設定されているためである。熱エネルギー販売価格が 4.5 円/MJ の場合、2 地区を除いて経常収益がマイナスに転じることになる。

次に、町長目単位で熱エネルギー需要を推定し、同様の推計式に基づき分散型システムの導入により経常収益がプラスになる領域を選定した結果を図-5 に示す。このような地区は、全体の約 1.5%の地区に相当する。地理的な分布を見ると、東京都心部に集中している。既存の事業実施拠点とも整合する分布状況を示している。しかしながら、多くの既存拠点では立地している町長目の熱エネルギー需要の一部のみを供給対象としており、需要不足となっている。これより、現況の熱供給事業実施地点においても、より効率化できるポテンシャルを有することが示唆される。

表-25 パラメータ推定結果(Model1)

	製造費 C_1 (百万円)			供給販売費 C_2 (百万円)			一般管理費 C_3 (百万円)		
切片	2.81	(6.	*	-	(-	.	5.43	(6.	*
	e+02	079	*	2.62	1.7		e+01	557	*
)	*	e+01	65))	*
区域	-	(-	.	-	(-	*	4.75	(2.	*
面積	2.20	1.8		6.90	2.2		e-05	246	
(m^2)	e-04	57)		e-05	54))	
延床	7.12	(2.	*	2.98	(3.	*	6.99	(0.	*
面積	e-04	409		e-04	6)	*	e-06	132	
(m^2)))	

販売 熱量 (GJ)	2.84 e-03	(5. 085)	*	- 1.81 e-04	(- 1.1 16)	8.70 e-05	(0. 872)
Adjusted R ²	0.964			0.820		0.596	

括弧内の数値は t 値, Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

表-26 パラメータ推定結果(Model2)

	製造費 C_1 (百万円)			供給販売費 C_2 (百万円)		一般管理費 C_3 (百万円)		
切片	3.22 e+02	(6.9 56)	*	- 1.90 e+01	(- 1.1 98)	6.55 e+01	(8. 70 4)	*
区域 面積 (m ²)						9.14 e-05	(6. 52 4)	*
延床 面積 (m ²)				1.65 e-04	(9. 28)			*
販売 熱量 (GJ)	3.97 e-03	(29. 864)	*					*
Adjusted R ²	0.959			0.787		0.522		

括弧内の数値は t 値, Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

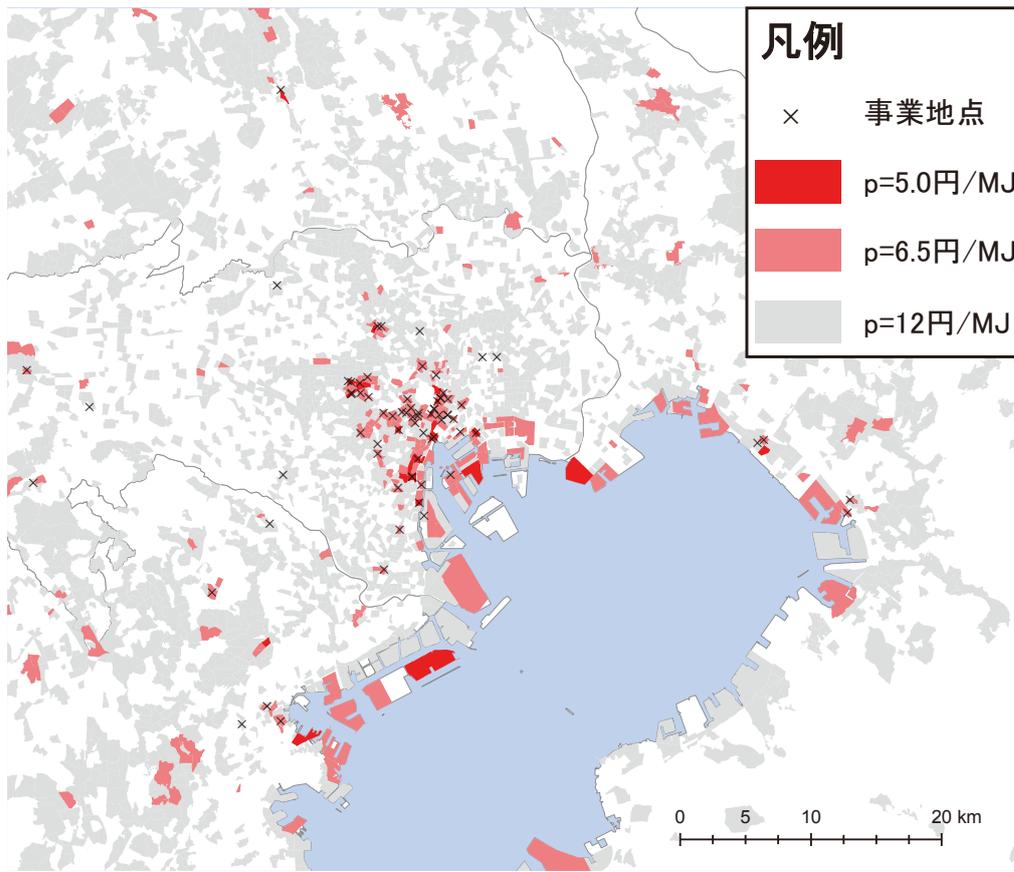


図-74 エネルギー收支構造の検討

⑤ エネルギーフロー解析

地域エネルギーシステムにおける、原燃料の利用から需要家への電気と熱の供給へと至るエネルギーの転換プロセスを解析する。その上で、個別熱源システムと比較を通じて地域エネルギーシステムの導入効果を環境的側面から検討する。

✓ エネルギーフローの設定

システムへの入力に相当する区域ごとの原燃料使用量は「便覧」に掲載されているため、そのデータを活用する。一方、出力に相当する需要家への供給量に関しては、「便覧」には熱エネルギーの情報は記載されているものの、電力については記載されていない。しかしながら、コージェネレーションに関する情報についても間接的ながら二通りの方法で記載されている。内部の設備の一部としてコージェネレーションの発電電力容量 (kW) が排熱利用量 (MJ/h) とともに記載されている場合と外部のコージェネレーションからの購入排熱量が記載されている場合である。したがって、発電電力量に関しては、これらの情報を用いて、以下のように補完した。コージェネレーションシステムの設備の発電電力容量 (kW) が記載されているものに関しては、稼働率 70%と想定してガス消費量および電気と熱の生成量を推定した。ここでは、総合効率 75%、発電効率 35%、熱利用率 40%としている。その上で、コージェネレーションで利用しきれないガスがボイラーで利用されると想定した。また、外部のコージェネよりの排熱購入として計上されている場合は、購入した排熱と同時に発電され

る電力量とそれらを生成するために必要となるガス消費量を算定した。その上で、原燃料使用量にコージェネによるガス消費量を加算した。なお、コージェネレーションシステムの総合効率、発電効率、熱利用率は上記と同等である。

✓ システム効率の評価

総合エネルギー効率を地区ごとに評価した結果を図-4 に示す。なお、電力の一次エネルギー換算係数を 9.28 MJ/kWh としている。規模が大きくなるに従い効率が改善していく傾向を示す。ヒートポンプ型のシステムが効率が高く、その他のシステムでは 0.5 から 1.0 程度の値となっている。既往研究⁹⁾と比較して整合した結果となっている。

しかしながら、総合エネルギー効率では、エネルギー投入量については一次エネルギー消費量として統一的に評価できるが、出力に相当するエネルギー生成量に関しては、電力と熱の質の違いや熱の温度差を考慮できない。このため、既往研究¹²⁾に従い、エクセルギー効率の観点から地域エネルギーシステムを評価する。まず、熱エネルギーのエクセルギー率の算定方法は式(2)の通りである。

$$\varepsilon = 1 - \frac{T_s \times \ln\left(\frac{T}{T_s}\right)}{T - T_s} \quad (2)$$

ここで、 T は環境温度を、 T_s は対象とする熱エネルギーの温度を表す。以上より、区域ごとにエクセルギー効率を評価した結果を図-5 に示す。暖房は環境温度と設定温度をそれぞれ 0°C と 20°C した。同様に、冷房は 33°C と 26°C、給湯は 16°C と 40°C と仮定した。また、都市ガスのエクセルギー率は 0.92 とした。図では縦軸に対数目盛を採用しており、区域間や類型間において大きな差がある。類型ごとに見ると、コージェネレーション型、ヒートポンプ型、排熱利用型、一般システム型の順で効率が良いことが分かる。規模が大きくなるに従って効率が改善していくが、販売熱量 600TJ 以上の中規模以上の区域においては効率が低下する傾向を示している。

✓ CO₂削減効果

建物単位で個別熱源を持った場合を比較対象として、CO₂排出量の削減効果を評価する。ここでは、個別熱源として、系統電力を用いヒートポンプを利用するシステムを想定した。区域ごとに評価した結果を図-6 に示す。GS型とHP型の多くの区域においてCO₂が増加するという結果となった。ただし、事業規模が大きくなるに従って、CO₂の増加量は緩和されていく。また、CGSタイプの区域ではCO₂削減率が大きく、HPタイプの区域がそれに続く。

既往研究⁹⁾で想定されているように、比較対象となるエネルギー供給方法が従来型のシステムである場合は、ボイラーを主体としたGS型においても、一定のCO₂削減効果が見込まれたと考えられるが、ヒートポンプ等の技術が進歩したため、CO₂削減効果が相対的に見込めなくなった結果であると考えられる。

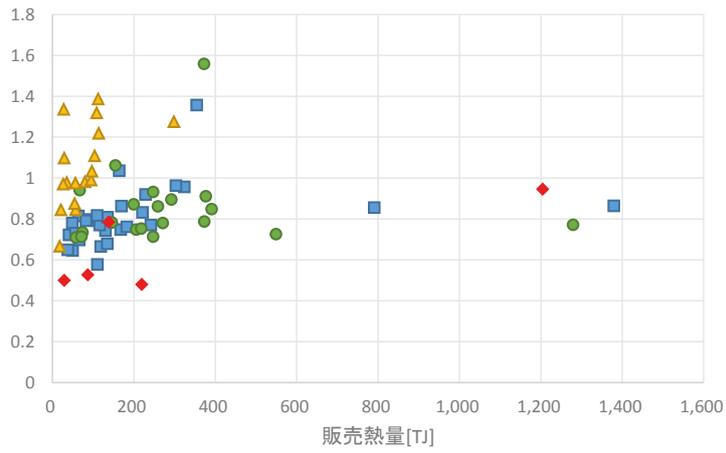


図-75 総合エネルギー効率

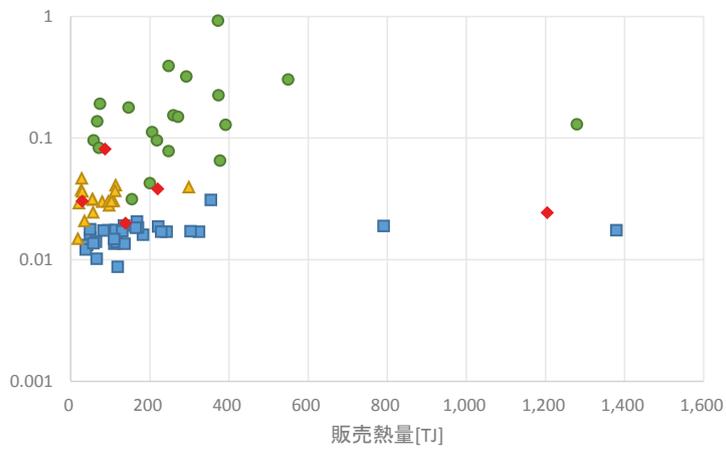


図-76 エクセルギー効率

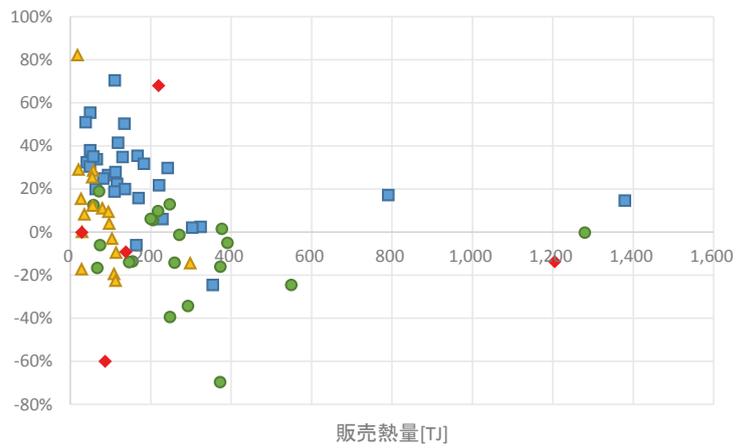


図-77 CO₂増減率

✓ エネルギーフローの評価

以上の検討に基づいて、システム類型ごとにエネルギーフローを解析した。以下にその結果をまとめる。

○ 一般システム型

ガスを原燃料とし温水・蒸気を生成し、温熱需要を充当するとともに、夏季は温水・蒸気を冷凍機に投入することで冷熱需要を充当するシステムである。ヒートポンプも設置されているがボイラーの容量に対して微小である。そのため、購入された系統電力の大半は、熱媒体の輸送動力等に利用されていると考えられる。

○ コージェネレーション型

ガスを原燃料とし、電気と熱を生成するシステムである。ただし、ガスエンジン等の電熱併給機器により賄われる熱需要の 1/3 程度であり、残りは併置されているボイラーにより生成されることになる。その結果、原燃料であるガスの 1/3 程度はボイラーに投入されている。また、一般システム型と同様に電力のヒートポンプでの利用は限定的で、熱媒体の搬送等に利用されていると考えられる。

○ ヒートポンプ型

電力を原燃料とし、温熱および冷熱を生成するシステムである。他の類型と比較して、需要家の規模が小さいこと、温熱需要に対して冷熱需要が 3 倍程度大きくアンバランスである。

○ 工場排熱利用型

基本的には工場もしくは清掃工場の排熱を利用して温熱と冷熱を供給するシステムであるが、排熱のみに依存するのではなく、ガスボイラーやヒートポンプが併置されている。これは、季節時間別の需給バランスの補正が必要であるためであると考えられる。したがって、年間に使用する原燃料全体における購入排熱の利用割合は半分以上となる。

⑥ まとめ

本章では、地区レベルのエネルギー供給事業について、その実態を解明することを目的として、データ解析を実施した。データ解析より以下の点が明らかになった。

- ・首都圏において、81 区域で稼働中の熱供給事業は大半が利益を上げる構造となっており、事業規模が大きくなるにしたがって収益も大きくなる。
- ・地域熱供給事業のエネルギー価格の設定は代替的なシステムと比較して、必ずしも安価な価格設定とはなっていない。したがって、需要家に対してコストメリットを提供できていない可能性がある。
- ・エネルギーフローに基づいて地域エネルギーシステムの効率性を評価した結果、熱エネルギーの製造方法により大きな差異があることが分かった。特にコージェネレーションを用いたシステムは効率が高く、ボイラーにより熱供給のみを行うシステムの効率が低く評価された。
- ・CO₂ 排出量を算定し、代替的なエネルギー供給方法と比較することで CO₂ 排出量の削減効果を評価した。その結果、小規模地区の多くにおいて CO₂ 排出量の削減効果が得られないという結果になった。

iii) 防災集団移転の実現可能性の定式化

① はじめに

平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災は未曾有の被害をもたらした。現在、4 県 28 市町村 135 地区¹⁾において復興の高台移転事業が計画・実施されている。また震災後、国が発表した南海トラフ地震の想定²⁾によると死者数 32 万 3 千人という東日本大震災をかるかに上回る被害想定となっている。国は南海トラフ巨大地震の対策として、高台移転も含めた安全な都市立地の重要性を指摘している。

また、甚大な被害が想定されている 9 県³⁾は、国に対し高台移転の補助として東日本大震災被災地と同等の特例措置の適用、もしくは国庫負担の拡充を要請している。このように、津波対策として事前の防災移転を希望する自治体もあるが、被災前に防災移転を実施した例は未だ存在しない。

災害と土地利用に関する先行研究として、森田ら⁴⁾は、東日本大震災の被災地の高台移転事業を対象に集約型の都市構造を提案している。また、大原ら⁵⁾は南海トラフ沿岸域において将来的な人口減少を見据えたうえで人口誘導や土地利用規制といった対策の必要性を指摘している。武田ら⁶⁾は、高知市を対象に多くの住民が移住に関心があることや移転費用が地震による被害額よりも低いことを示している。

しかし、南海トラフ巨大地震の津波避難困難者の対策として、全国を対象に防災集団移転を地域ごとに検討・比較した研究はない。

そこで、本研究は、南海トラフ巨大地震の津波避難困難者に防災集団移転の可能性を検討する。まず、津波避難困難者の詳細な立地場所や人数、将来人口を推計する。そして、津波避難困難者の対策として被災前の防災移転と津波避難タワー建設の費用便益分析を行い、それぞれの対策の有効性を検証する。この時、事防防災集団移転が有利となる地域の特性を明らかにする。

② 津波避難困難者の推計

まずは、津波避難困難者を推計する。推計対象者は、全国の南海トラフ巨大地震の津波浸水想定区域内の住民とし、12 県 114 市町村を対象とする。対象の津波浸水ケース⁷⁾は各地域の津波到達時間が最短となるケースとした。推計手法を表-27 に示す。推計は 2 段階に別けて行った。

1 段階目は、避難先を既存の避難施設または津波浸水想定区域外とした。この時、避難可能時間よりも避難時間(=避難距離/避難速度)が長い場合、または、避難先到着時に避難先が収容可能人数を超えている場合は、その避難者は避難困難者とし、1 次避難困難者とする。次に、1 次避難困難者を対象に、避難先を津波浸水想定区域内の避難可能建物(非木造で 80 年代以降建築の 3 階以上の建物)および津波浸水想定区域外として、避難可能性を推計した。避難困難の基準は 1 次推計と同様であり、この推計を 2 次推計とし、この時の避難困難者を 2 次避難困難者(以下、避難困難者)とする。

表-27 津波避難困難者の推計方法

		本研究	行政(例) ⁸⁾
避難可能時間		避難先津波到達時間 T-300 秒	T-300 秒, T-900 秒
避難先	1 次推計	避難施設 浸水域外	避難施設 浸水域外
	2 次推計	避難可能施設 浸水域外	
避難距離	人口	建物の居住人 ⁹⁾	メッシュ

	道路	道路距離 (Open Street Map)	直線距離×1.5
	勾配	標高差	未考慮
	階段	避難先の津波浸水深	未考慮
避難速度	徒歩	0.62m/秒 ¹⁰⁾	0.74m/秒
		0.46m/秒 ¹⁰⁾ (乳幼児や高齢者同伴時)	
	階段	0.21m/秒 ¹¹⁾	未考慮
避難困難者の判断	時間	避難可能時間 < 避難時間	避難可能時間 < 避難時間
	収容可能	到達時に収容可能人数以上	避難施設周りの面積外

津波避難困難者の推計結果を内閣府の避難困難者数²⁾と比較して表-28に示す。

表-28 津波避難困難者の推計結果(人)

	1次推計	2次推計	内閣府
神奈川県	6	6	2,900
静岡県	101,243	44,658	95,000
愛知県	5,145	920	6,400
三重県	85,375	25,773	32,000
兵庫県	1,248	439	4,100
和歌山県	49,385	19,563	72,000
徳島県	71,052	21,418	25,000
愛媛県	2,819	221	4,400
高知県	41,652	7,576	37,000
大分県	26,725	5,415	17,000
宮崎県	57,612	13,448	39,000
鹿児島県	584	453	1,200

合計	442,846	139,890	336,000
----	---------	---------	---------

1次推計では内閣府と比較して、避難困難者数が多い県も少ない県も示された。これは、個人属性によって避難速度が異なることや実際の道路ネットワークを用いたことにより地域の特性が表れたためである。また、2次推計では全ての県で内閣府よりも少なく推計された。これは、内閣府が住民の避難先を既存の避難施設および津波浸水想定区域外のみとし、避難可能施設を考慮していないためである。

③ 津波避難困難者対策の費用便益分析

推計された2次避難困難者の対策として、防災集団移転と津波避難タワー建設の2つの対策を検討する。各対策のステイクホルダーおよび費用・便益項目を表-29に示す。表の○で示す項目が各対策の評価項目である。

表-29 避難困難者対策の費用便益項目

項目		防災集団移転			避難タワー建設		
		国	自治体	住民	国	自治体	住民
便益	人命保持			○			○
	被災削減	○	○	○			
	QOL向上			○			
費用	建設費	○	○	○	○	○	
	維持管理費	○	○			○	

各対策の事業開始年は2016年とし、評価期間は事業整備完了後50年とする。避難タワーは2016年に建設し、評価期間は2066年までである。防災集団移転は事業年数を5年間とし、2071年までを評価期間とする。

津波避難困難者を地域別に分けて将来人口推計を行う。地域別けの基準は後述する。2040年までの将来人口推計は人口問題研究所の仮定値¹²⁾を用いコーホート要因法を、2041～2071年の将来人口はコーホート変化率法を用いた。

✓ 津波避難タワー建設

津波避難タワー建設の対策において、津波避難困難者が避難可能かつ、より多くの避難困難者が利用可能な場所に立地させるため、表-30の条件のもと集合被覆問題を解き、立地場所を選定した。立地候補地は、公有地とするため既存の公共施設の場所とする。ただし、避難可能時間がマイナス(津波到達時間が300秒未満)の避難困難者に関しては、今回考慮していない。

表-30 津波避難タワー建設の立地条件

対象者	2次避難困難者
道路	道路(Open Street Map)
勾配	標高差
立地候補地	既存の公共施設地
避難可能時間	自宅の津波到達時間-300秒
避難速度	徒歩：0.62m/秒
	徒歩：0.46m/秒 (乳幼児や高齢者同伴時)
避難可能距離	避難可能時間/避難速度
立地条件	避難タワーに避難可能な対象者数の最大化

津波避難タワーの立地場所推計の結果、全国で335カ所となった。将来人口推計の地域は、共通の津波避難タワーを使用する避難困難者を同じ地域住民として、地域を別けた。

✓ 防災集団移転

防災集団移転の対策に関して、地域住民全員で移転するとする。防災集団移転促進事業¹³⁾では、住宅団地の規模が10戸以上という事業要件があるが、今回推計する移転対象の地域は全ての地域とし、世帯数の制限を設けないものとする。

移転先として、各地域の最寄りの市区町村の本庁または支所、出張所、連絡所とした。これは、コンパクトシティ実現のため地域の拠点である市区町村役場が集約の拠点として適切であると考えたためである。

QOLの評価として、交通利便性(AC)・居住快適性(AM)・災害安全性(SS)が挙げられる¹⁴⁾。今回、移転先が最寄りの市区町村役場であることから、居住快適性(AM)は移転の前後で変わらないものとする。また、災害安全性(SS)は移転により向上するが、移転の便益評価項目として被害軽減を貨幣換算しているため、QOLの評価では再度計算しないこととした。すなわち、今回のQOL評価は移転に伴う交通利便性(AC)のみに着目した。交通利便性のQOL評価として西野らの研究¹⁵⁾を参考に貨幣換算する。式は(1)で、評価要素を表-31に示す。

表-31 QOL の評価項目および貨幣換算

評価要素	教育・文化利便性	健康・医療利便性
対象施設	図書館, 博物館, 学校, 幼稚園など	病院, 診療所, 保育所, 老人ホームなど
算出方法 LPs	最寄りの対象施設までの距離/速度	最寄りの対象施設までの距離/速度
速度	4km/h	12km/h
支払い意思額 w	¥820/min	¥779/min

$$QOL_t = qol \cdot pop = (LPs - LPs_0) \cdot w \cdot pop \quad \text{--- (1)}$$

QOL_t : 各地域における QOL, pop : 地域の人口, w : 個人の価値観
 LPs : 移転後の環境による物理量, LPs₀ : 移転前の環境による物理量

また, 住民の被災軽減額は治水経済調査マニュアル¹⁶⁾を参考に表-32 の評価項目で式(2)とした.

表-32 住民の被災額の評価項目と単価

項目	評価額(万円)	単位
家屋 Wh	県別	/m ²
家庭用品 Wg	1,400	/世帯
清掃労働対価 Wc	1.043	/日

$$W = Wh \cdot Area + Wg + Wc \cdot 30 \quad \text{--- (2)}$$

W : 1 世帯の被災額, Area : 1 世帯の家屋床面積

その他の評価額については, 表-33 に示す. ただし, 便益の人命と被災の軽減額は, 表の評価額に南海トラフ地震の各年 1 年間の生起確率を乗じた期待値を用いて計算する.

表-33 対策項目の評価額

			評価額 (万円)	単位	
便益	人命 ¹⁷⁾	住民	24,452	/人	
	被災	行政	総額-住民	/人	
		住民	式(2)	/世帯	
		総額 ¹⁸⁾	3,600	/人	
	QOL	住民	式(1)	/地域	
費用	建設費	国 ¹⁹⁾	1,727	/世帯	
		自治体	2,453	/世帯	
		住民	1,000	/世帯	
		総額 ³⁾	5,180	/世帯	
	タワー	国 ²⁰⁾	5,267	/棟	
		自治体 ²⁰⁾	2,633	/棟	
		総額 ²¹⁾	7,900	/棟	
	維持管理費 ¹⁶⁾	移転	行政	26	/世帯・年
		タワー	自治体	40	/棟・年

便益の人命と被害額において、南海トラフ地震の生起確率式を乗ずることにより軽減期待額を算出する。地震発生の生起確率は地震調査研究推進本部²²⁾の評価手法を参考に、BPT分布の確率密度関数 $f(t; \mu, \alpha)$ 式より、2015年まで発災していない条件のもと各年1年間の生起確率 $P(T)$ を算出した。

$$f(t; \mu, \alpha) = \left\{ \frac{\mu}{2\pi\alpha^2 t^3} \right\}^{\frac{1}{2}} \exp \left\{ - \left(\frac{t-\mu}{2\mu\alpha^2 t} \right) \right\} \quad \text{--- (3)}$$

T : 西暦年, $\mu=90.1$: 地震発生間隔 (時間予測モデル), $\alpha=0.24$: 活動間隔のばらつき
 $t=T-1946$: 1946年からの経過年数

$$P(T) = \frac{f(t)}{\sum_{t'=1}^{300} f(t')} \quad \text{--- (4)}$$

$t'=T-2015$: 2015年からの経過年数

生起確率 $P(T)(\%)$ の計算結果を図-78 に示す。

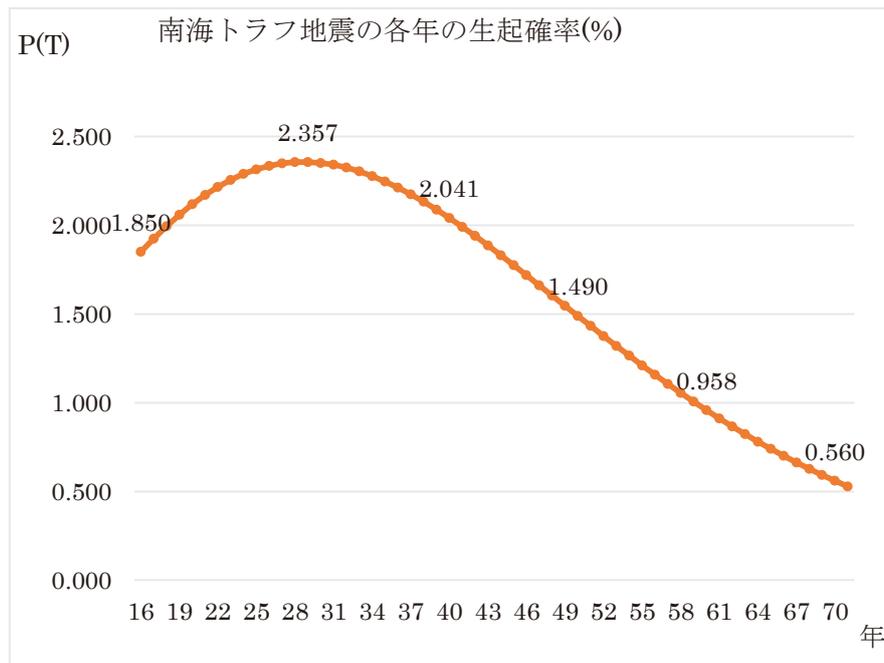


図-78 南海トラフ地震の各年の生起確率

✓ 費用便益分析の結果

■ 全国評価

費用便益分析は、社会的割引率を4%として純現在価値 NPV と費用便益比 CBR を算出した。全国335 地域の合計の計算結果を表-34 と表-35 に示す。

表-34 津波避難タワー建設における CBA (億円)

		国	自治体	住民	合計	
便益	人命			108,014	108,014	
費用	建設費	0.53	0.26		0.79	0.88
	維持管理費		0.09		0.09	
NPV		-0.88		108,014	108,013	
CBR					12.3	

表-35 防災移転における CBA (億円)

		国	自治体	住民	合計	
便益	人命			83,466	83,466	97,372
	被災削減	10,920		1,368	12,289	
	QOL 向上			1,618	1,618	
費	建設費	4,813	6,839	2,788	14,440	15,659

用	維持管理費	1,219		1,219
	NPV	-1,951	82,296	81,713
	CBR	0.85	30.52	6.22

津波避難タワー建設においても防災移転においても国と自治体の行政における NPV はマイナス値となった。しかし、住民を含めた全体の NPV はどちらもプラス値となった。また、タワーの方が移転に比べて全体の NPV も CBR も大きく、事業効果も効率も高いことが分かる。また、移転の住民の便益において、住民の全体便益に対し、被災額軽減額は 1.58%、QOL 向上は 1.87%となる。

■地域分類評価

次に地域ごとに見る。表 10 に各対策において合計 NPV がマイナス値、プラス値となる地域に分類し、その地域の各年の平均人口を示した。表-36 の－はマイナス値を、＋はプラス値を表す。

表-36 各対策の NPV 別の地域の将来人口

		NPV			
		－	＋	－	＋
タワー		－	＋	－	＋
移転		－	－	＋	＋
地域数		1	0	4	330
分類		①	②	③	④
平均人口 (人)	‘10年	2.00		2.50	357.60
	‘15年	1.46		1.67	344.38
	‘20年	0.80		1.10	331.99
	‘25年	0.35		0.67	317.96
	‘30年	0.15		0.43	303.04
	‘35年	0.07		0.29	288.18
	‘40年	0.03		0.18	273.20

表-36 より、タワー建設と移転の NPV が共にマイナス値となる地域は 1 カ所である。この地域①は 2010 年には 2 人であり、2040 年には 0.03 人となり、人がいなくなることが分かる。現在、人がほとんどおらず、将来人がいなくなる人口構成の地域は避難タワー建設も移転も有効ではないことが分かる。また、タワーの NPV 値はマイナスだが、移転はプラスである地域③は 4 カ所ある。これらの地域は、2010 年は 2.5 人と地域①と同様に少ないが、2040 年は 0.18 人と地域①よりも多く、将来の存続可能性が高い人口構成である。すなわち、現在人口が少ない地域でも将来、存続の可能性がある地域は、タワー建設よりも移転が有効であると言える。また地域④はその他の地域に比べて人口が多い地域は避難タワー建設も移転も有効であることが、表-34、表-35 の比較より避難タワー建設の方が有効であることが分かる。

次に、地域ごとに避難タワー建設と防災移転の NPV と CBR を比較、地域を分類する。表-37 の NPV と CBR では値が大きい対策、すなわち有効な対策を示している。平均人口(人)は 2015 年の地域

の平均人口を、平均人口密度(人/km²)は、面積はタワーより最大距離の住民の道路距離を半径として円面積をその地域の面積として 2015 年人口を除し、各地域の人口密度の平均より算出した。

表-37 タワーと移転の地域比較

分類	NPV	CBR	地域	人口	人口密度
I	移転	移転	18	2.7	5.55
II	タワー	移転	15	6.9	20.54
III	タワー	タワー	302	377.0	279.54

地域 I は NPV も CBR も移転が有効な地域であり、地域 III は NPV も CBR も避難タワー建設が有効な地域である。地域 II は、NPV は避難タワー建設であるが、CBR は移転が有効である。すなわち、事業効果としては避難タワー建設が有効であるが、事業効率としては移転が有効であることを示している。地域 I が最も人口が少なく人口密度が低い。地域 III は人口が多く人口密度が高い。つまり、人口密度が低い地域ほど移転が有効であり、人口密度が高い地域ほど避難タワー建設が有効であることが分かる。

④ おわりに

全国の南海トラフ巨大地震の津波浸水想定区域において、実際の道路ネットワークや個人属性ごとの避難速度などを用いて、より詳細に津波避難困難者を推計することができた。また、避難施設に指定されていないが津波避難可能な建物も避難先とすることで、より現実に即した避難困難者を推計できた。

津波避難困難者に対して、地域の将来人口を推計した上で、避難可能になる対策として避難タワー建設と集団移転の費用便益分析を行った。結果として、現在人口が少ない地域でも、将来人口存続の可能性がないような地域はタワーも移転も NPV がマイナスとなり有効でないが、将来人口存続の可能性のあるような地域は、タワーは有効ではないが移転が有効であることを示した。また、人口密度の低い地域は移転が、高い地域は避難タワー建設が有効であることを示した。

現行制度の防災集団移転促進事業では、事業要件として 10 世帯以上の地域に限定されている。しかし、本研究で示したように将来、人口が存続し人口密度が低い地域ほど、防災移転の方が有効であることが示された。10 戸以上の条件を「南海トラフ地震による超全国災害への備えを強力に進める 9 県知事会議³⁾」が要請している東日本大震災特例措置の 5 戸以上²³⁾のように緩和することも検討すべきだと考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省：東日本大震災の被災地における集団移転促進事業計画の策定済み地区, 2015.3
- 2) 中央防災会議：南海トラフ巨大地震の被害想定について（第一次報告）, 2012.8.29

- 3) 南海トラフ地震による超全国災害への備えを強力に進める 9 県知事会議：政策提言書, 2015.4.21
- 4) 森田哲夫・細川良美・塚田伸也・湯沢昭・森本章倫：津波被害を考慮した地域構造に関する研究, 社会技術研究論文集 Vol.1, 2014.4, pp.1-11
- 5) 大原美保：南海トラフ沿岸域における将来的な人口変動を考慮した津波減災戦略に関する検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol. 70 (2014) No. 4 p. I_710-I_717
- 6) 武田裕之・津田泰介：南海トラフ地震による津波被害地域における震災前都市移転の可能性の検討-高知県高知市をケーススタディとして-, 都市計画論文集 Vol.50, No.3, 2015.10, pp.594-601
- 7) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/data_teikyuu.html, 2016/01/20 アクセス
- 8) 中央防災会議：南海トラフの巨大地震 建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要, 2012.8.29
- 9) 秋山祐樹・小川芳樹・仙石裕明・柴崎亮介・加藤孝明：大規模地震における国土スケールの災害リスク・地方災害対応力評価のためのミクロな空間データの基盤整備, 第 47 回土木計画学研究発表会・講演集, pp.1-19, 2013.6
- 10) 国交省：津波避難を想定した避難路, 避難施設の配置及び避難誘導について (第 3 版) ,2013
- 11) 内閣府：津波避難ビル等に係るガイドライン(案), 2005.2.7
- 12) 国立社会保障・人口問題研究所：将来の生残率, 純移動率, 子ども女性比と 0-4 歳性比--『日本の地域別将来推計人口』(平成 25 年 3 月推計)
- 13) 国土交通省：防災集団移転促進事業及び都市防災総合推進事業について, 2012.6
- 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 D, Vol.62, No.4, pp.558-573, 2006.
- 15) 西野慧ら：郊外居住者の価値観を考慮した大都市圏における都市コンパクト化の評価, 第 43 回土木計画学研究発表会, 2011.
- 16) 国土交通省：治水経済調査マニュアル (案) , 2015.2
- 17) 内閣府：平成 23 年度交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査報告書, 2012.3
- 18) 内閣府：東日本大震災における被害額の推計について, 2011.6.24
- 19) 国土交通省：防災集団移転促進事業及び都市防災総合推進事業について, 2012.6
- 20) 中央防災会議：南海トラフ地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法概要, 2014.3.28
- 21) 朝日新聞 DIGITAL：「宮崎」宮崎市に津波避難タワー完成 200 人収容可能」, 2015.4.8, <http://www.asahi.com/articles/ASH4746M6H47TNAB00F.html>, 2016/02/01 アクセス
- 22) 地震調査研究推進本部：長期的な地震発生確率の評価手法について, 2001.6
- 23) 国土交通省 HP, 2016/02/08 アクセス http://www.mlit.go.jp/crd/city/sigaiti/tobou/g7_1.html

(b) 土地利用・インフラ再編を伴う縮退戦略のコベネフィット評価モデルの構築

上記で開発した各指標の評価モデルとともに, 既に申請者が開発を進めている, 地震災害や水害に伴う人命・財産・生活被害とその回復過程を小地区単位でシミュレートして評価するモデルシステムを用いて, GIS 上で 500m メッシュ単位での長期的「サステナビリティ」と災害時「レジリエンス」評価を可能とするモデルシステムを整備した. 前者は住民サービス新設費用当たり QOL や, CO2 排出量当たり QOL が長期的に安定して高い水準で推移するかどうかで評価できる. また, 後

者は各種被害を住民の総余命損失と財産・インフラ被害額の少なさとして評価できる。これらの指標を用いて、縮退戦略実施（撤退・集約地選定）や各種インフラ整備がもたらすコベネフィットが評価できるようになる。

なお、近年における集中豪雨災害等の頻発を考慮して、災害影響の地理的分布や頻度変化を組み込んだ縮退戦略の立案は必要不可欠である。そのため、気候変動影響シナリオと統合的な高解像度の災害リスク影響評価モデルを新たに開発し組み込んだ。これによって、例えば河川水害であれば、気候変動進展後において、堤防・ダムなどのインフラ建設策と、後背地から撤退し浸水を許す策とでのレジリエンスの違いを評価できるようになり、CO₂ 排出量等とも合わせた縮退戦略検討が可能となった。

i) QoL 評価モデルの構築

① システムの基本的な考え方

本研究では、まず空間データを用いてニュータウンにおける現状の都市環境評価を行い、その特徴を明らかにする。次に、そこから得られた結果とニュータウンの整備方針に基づき、将来シナリオの検討と作成を行い、住宅・土地利用変化の推定を行う。これらの結果を用いて、建物費用と居住者の生活の質（QOL）を算出することで、対象地域におけるニュータウン再生に向けた基礎的知見を得る。

研究の全体フローを図-3.1 に示し、以下、各項目について説明する。

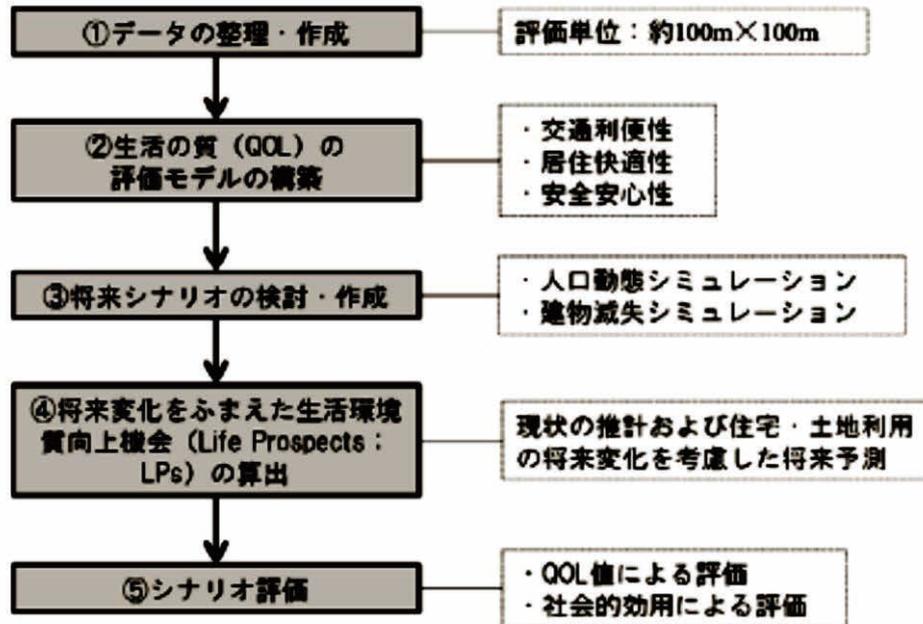


図-79 研究の全体フロー

② 評価単位および使用データ

ニュータウン内の詳細な居住環境の把握のためには、地理的分布を把握することが重要である。既往研究では、市区町村単位や第3次標準地域メッシュで評価したものが多いが、本研究では分析

評価単位として、将来どのように変化していくかを詳細に把握することができる、約 100mX100m メッシュに分割した地区単位を使用する。

評価・算出に当たっては、まず GIS を用いて既存空間データより、土地利用・建物・公共施設・インフラなど属性毎に必要な情報を抽出および整理する。本研究で使用する既存空間データ及び統計資料を表-3.1 に示す。なお、100mX100m メッシュでの集計が困難な指標については、市区町村単位データを用いる。

詳細建物ポイントデータは、秋山ら（2013）により、住宅地図（Zmap-Town II）を加工することで、建物の「国勢調査メッシュデータ（2005）」や「国勢調査（2005）」の属性テーブルと結合しており、建物の用途を詳細に観察できるデータを整備したものをを用いる。具体的には、2008～2009 年の全国約 6,000 万棟を対象に、建物 1 戸ごとに 1)市区町村、2)建物用途、3)建築面積・階数、4)経度・緯度、5)構造、6)築年代、7)居住者情報、計 7 点の情報と結合している。また、結果の可視化には ESRI 社の ArcGIS Desktop を使用した。

表-38 使用データ一覧

データ仕様	空間データ・統計資料	発行者	データ仕様	空間データ・統計資料	発行者
小地区詳細データ	国土数値情報	国土交通省	市区町村データ	出生率、生残率、純移動率	国立社会保障・人口問題研究所
	国勢調査地域メッシュ統計	総務省統計局		交通事故統計年報	交通事故総合分析センター
	詳細建物ポイントデータ	東京大学地球観測データ統融合連携研究機構		犯罪情勢	警察庁
	確率的振動予測地図	防災科学技術研究所		全国パーソントリップ調査	国土交通省
	気象統計情報	気象庁		住宅・土地統計調査	総務省
	全国デジタル道路地図	ESRIジャパン		建築着工統計調査・滅失統計調査	国土交通省
	商業統計	経済産業省			
	細密数値情報	国土地理院			

③ 生活の質の評価方法

本研究では、都市環境政策検討にあたっての「生活の質」の定義として、前章に挙げた Myers および加知らによる定義を用いて定量化する。具体的には、構成指標を交通利便性（AC）、居住快適性（AM）、安全安心性（SS）とし、「居住地区における環境物理量 LPs」と、そこに居住する「個人の主観的な価値観 TkW」によって決定されるものと定義する。

✓ 生活の質の評価方法

QOL 値を式(3.1)～式(3.3)のように定式化する。

$$QOL_k = w_k^T LPs \quad (3.1)$$

$$w_k^T = [w_k^{AC} \ w_k^{AM} \ w_k^{SS}] \quad (3.2)$$

$$LPs_k = [AC, AM, SS] \quad (3.3)$$

ここで、 QOL_{ki} は個人属性グループ k の地区 i での QOL、 AC_i は交通利便性、 AM_i は居住快適性、 SS_i は安全安心性であり、この3指標を生活環境質向上機会と定義する。

さらに各要素を4つの評価項目で構成する。各評価項目は既往研究を参考に、指標間の独立性と住宅・土地利用との関係に留意しながら表-3.2のとおり設定した。

表-39 各評価指標の評価要素および項目の整理

評価指標	評価要素	評価項目
交通利便性 AC	企業施設利便性 AC_1	就業場所までの交通利便性
	文化施設利便性 AC_2	公共文化施設までの交通利便性
	医療施設利便性 AC_3	医療施設までの交通利便性
	買物施設利便性 AC_4	商業施設までの交通利便性
居住快適性 AM	空間使用性 AM_1	住民一人当たり居住床面積(m^2 /人)
	周辺調和性 AM_2	空家率(%)
	自然環境性 AM_3	緑地面積割合(%)
	空間快適性 AM_4	体感温度(スコア換算値)
安全安心性 SS	地震危険性 SS_1	地震による損失余命(year)
	洪水危険性 SS_2	河川浸水による損失余命(year)
	犯罪危険性 SS_3	年間刑法犯遭遇率(件/1000人)
	交通事故危険性 SS_4	年間人身事故遭遇率(件/1000人)

式(3.1)は QOL を無次元量として評価するものであり、評価結果について価値判断を行うことが難しい。本研究では QOL 値を「質的に調整された生存年数 (Quality Adjusted Life Year : QALY)」で表現する。QALY は医療分野において費用効果分析のために開発された尺度であり、健康な人の1年を1.0 (year/year) としている。従来の住環境評価では、点数付けや貨幣換算などが用いられていたが、前者は点数の価値づけが説明できず、後者は非経済的側面を分析する際に問題が生じる。したがって、本研究では、QOL によって居住者が過ごす時間の効用が異なると仮定し、式(3.4)のとおり、価値観を表す重みを余命換算値へと換算した W^L を用いる。

$$QALY = f(w^L, LPs) = \sum_j w_j^L \cdot LPs_j \quad (3.4)$$

住民の価値観を表す余命換算値 W^L を、コンジョイント分析により推計する。本研究では戸川ら(2012)が平成22年10月に名古屋都市圏で実施したアンケートを用いて算出する。

アンケートは住民に評価項目からなる2つの属性プロファイルを有する居住地を示し、どちらがより好ましいか選んでもらう形式である。アンケートの概要を表-3.3に示す。得られた結果を用

い、式(3.5)、式(3.6)に示す 2 項ロジットモデルのパラメータを、最尤推定法を用いることによって、属性間の重みパラメータを特定する。

$$P(m) = \frac{\exp(\beta \cdot x_m)}{\exp(\beta \cdot x_m) + \exp(\beta \cdot x_n)} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} U_m &= \beta \cdot x_m + \varepsilon_m \\ &= \sum_j \beta_j \cdot x_{j,m} + \varepsilon_m \end{aligned} \quad (3.6)$$

ここで、 $x_{j,m}$ は、ロジットモデルにおける各変数 (=LPs_j)、 β_j は各測定指標に対するパラメータである。さらに居住地属性プロファイルの中に地震による損失余命量 (SS1) を合わせて提示し、余命損失量に対するパラメータ β_L を得ることで、各要素と生存年数との相対的な重みを式(3.7)により推定する。この値を式(3.4)に用いることで、QOL 値を算出することができる。

$$w_j^L = \frac{\beta_j}{\beta_L} \quad (3.7)$$

表-40 アンケートの実施概要

調査期間	2010年10月
実施対象	名古屋20キロ圏に在住の20～70代の住民
配布・回収方法	Webアンケート
回答者数	400人
質問項目	①生活環境の構成要素 (LPs) を示した居住地プロフィールに対する居住選好 ②個人属性

✓ 将来シナリオ

将来の住宅立地と土地利用の変化を予測するためには、居住者の「属性」と「将来居住地選好」との関係の詳細に分析する必要がある。戸川ら (2008) は、将来の世帯構成変化予測を前提として、居住地選択・住宅市場モデルを構築するとともに、世帯を世帯主の年齢別に 7 区分、世帯タイプ別に 4 区分の合計 28 タイプに細分化し、行動を分析している。しかし、市区町村を分析単位としているため、本研究の小地区単位での評価に適応することが難しい。山崎 (2011) は、第 5 回東京都市圏パーソントリップ調査付帯調査「都市交通と暮らし方についてのアンケート調査」の個票データを用いて、将来居住地選好を形成する住み替え以降の有無と、居住地選択意向について基礎分析と選択モデルの構築を行い、選好を決定する要因の分析を行っている。本研究でも同様の手法により、居住者属性別の居住地選好を推計することが望ましいが、そのためのデータを入手することができなかった。そこで本研究では、福田らの構築したモデルを参考に、将来予測モデルの全体構成を図-3.2 のとおり定めた。

対象住宅を戸建住宅と集合住宅とし、人口移動シミュレーションからそれぞれの将来世帯数を算出し、5 年毎に必要な住宅立地量を算出する。住宅残存量は、建物滅失シミュレーションを用いて既

存住宅の寿命から算出する。算出された必要住宅立地量と残存量の差から住宅新築量を算出し、戸建住宅と集合住宅の世帯数を決定する。対象期間は、使用データの性質上5年毎の将来推計を2040年まで行う。また、本研究での将来予測では、住宅と土地利用の変化による都市環境が居住者に与える影響について評価することを目的としているため、交通インフラ等は変化しないものと仮定する。

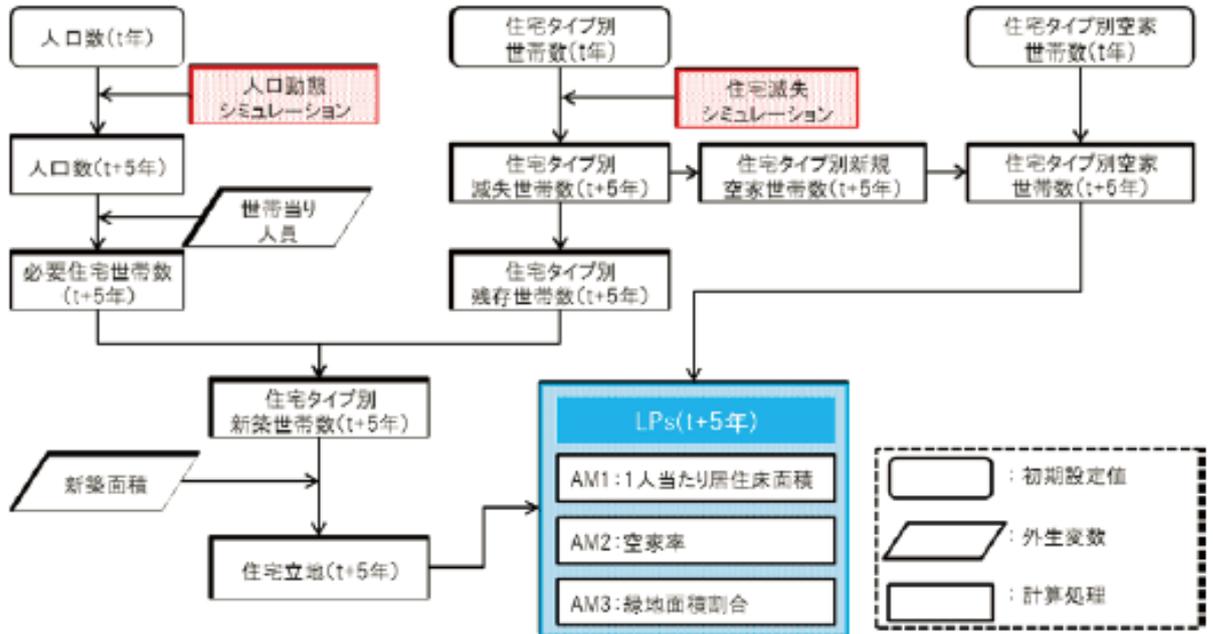


図-80 将来予測モデルの全体構成

✓ 人口動態シミュレーション

BAU人口

BAU人口は人口が現在のトレンドで変化していくと仮定したときの人口と定義し、対象地域における将来人口推計は、国立社会保障・人口問題研究所が提供している「日本の市区町村別将来人口」の方法に従い、100m×100mメッシュ毎にコーホート要因法を適用する。将来人口の算出フローを図-3.3に示す。コーホート要因法に使用する、出生率、生残率、純移動率、出生比率は、対象地域が位置する町の値を用い、2040年まで5年おきに推計する。

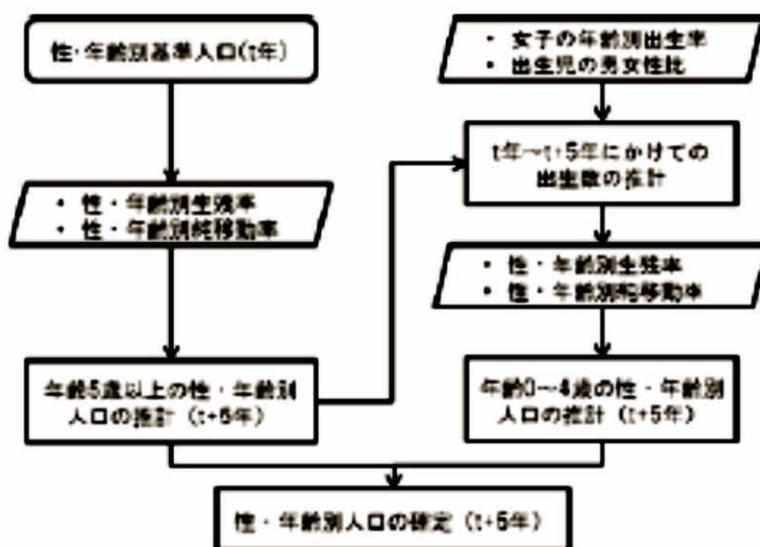


図-81 将来人口算出フロー

シナリオ設定人口

将来のシナリオ人口を算出する際、地域内だけでなく地域間での人の動きも考慮する必要があるが、そのためのデータを得ることができなかった。そこで本研究では、対象とするニュータウン内に、人口の流入地区と流出地区を定める。

図-3.4 に示すように、人口を集約する地区（以下、「流入地区」とする）は、居住者が優先する都市の魅力値が高い地区（魅力値は4章で詳述）とし、流入地区以外の地区を「流出地区」とする。次に、各年における流出地区のBAU人口の最大10%を、5年おきに「流入地区」へ集約を行う。流入地区への人口配分は、流出人口の合計値を一律に均等配分する。したがって、各年におけるBAU人口の合計値と、シナリオ設定に基づいた人口の合計値は一致し、図-3.4の実線と点線で示すよう、各地区において人口の割り振りが行われる。

人口の流出・流入地区の決定方法および各流出地区の流出人口の決定方法に用いた数値は、人口移転を考慮したシナリオ分析を行った鈴木ら（2011）を参考に設定した。

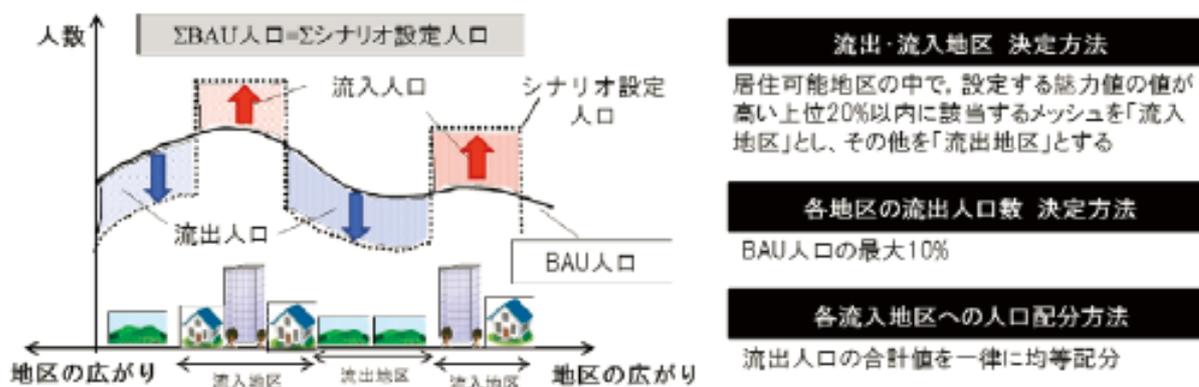


図-82 シナリオ設定人口のイメージ図