

低炭素化と非常時エネルギー供給を両立できる 既成市街地更新モデルの評価

朴 秀日¹・長尾 和哉²・大野 悠貴³・加藤 博和⁴

¹ 非会員 名古屋大学大学院環境学研究科附属持続的共発展教育研究センター
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町) E-mail: suil@urban.env.nagoya-u.ac.jp

² 非会員 元名古屋大学大学院環境学研究科
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町) E-mail: knagao@urban.env.nagoya-u.ac.jp

³ 正会員 名古屋大学大学院環境学研究科附属持続的共発展教育研究センター
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町) E-mail: yuukiohno@urban.env.nagoya-u.ac.jp

⁴ 正会員 名古屋大学大学院環境学研究科附属持続的共発展教育研究センター
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町) E-mail: kato@genv.nagoya-u.ac.jp

低炭素社会の実現が求められる一方、東日本大震災でエネルギー供給システムの脆弱性が露わになり、非常時における最低限のエネルギー供給を可能とすることの必要性が認識されるようになった。本研究では、既成市街地を対象に、平常時の低炭素化と非常時のエネルギー供給を両立するために、「立地誘導」と「エネルギーシステム導入」を組み込んだ市街地更新の有効性を検討するモデルを開発した。また、構築したモデルを用いて、三重県松阪市を対象に立地誘導施策と創畜省エネルギー施策のシナリオを設定し導入効果を評価した。

その結果、立地誘導が2つの目標に与える効果は通常はトレードオフの関係にある一方、エネルギーシステムの選択によっては相乗効果が発生し、両立可能となることが明らかになった。

Key Words: Low carbonization, Energy supply, Location optimization plan, Hazard maps

1. はじめに

(1) 研究の背景

2019年9月8日から9日にかけて首都圏を通過した台風15号などにより、千葉県南部地域では9日から約63万戸を超える家屋が大規模の停電が相次いで発生した。2週間後の23日の時点でもおよそ3,000戸が復旧されず、電力供給が途切れることにより、断水や熱中症、食糧難など命の危険にさらされた。

それに先立つ2011年の東日本大震災で、福島第一原子力発電所をはじめとした多くの発電所が被害を受けたことで電力不足に陥り、首都圏でも計画停電の実施を余儀なくされた。こうした状況を受け、従来は当然供給されるものであったエネルギーが供給されないという事態は、集中型エネルギーシステムの整備を進めてきた日本のエネルギー政策に転換を迫るものとなった。大規模発電所からの供給のみに依存せず、地域内で再生可能エネルギーやコージェネレーションなどの多様な供給力を組み合わせてエネルギーを生産する「分散型エネルギーシステム」が注目されるようになった。このように災害リスクの分散と同時に、非常時のエネルギー供給力の確保や平常時のCO₂排出削減を図ろうとする機運が高まって

おり、この流れの中で総務省は「分散型エネルギーインフラプロジェクト」¹⁾を立ち上げた。これは、地域でエネルギーシステムを構築するためのマスタープラン策定を支援することで、平常時の省エネルギー化と非常時のエネルギー供給を図るものである。しかし、熱導管や送電線などのインフラ整備には長期間を要するため、都市計画やまちづくりと一体となって進めていく必要があり、プロジェクトの推進は容易なことではない。

一方で日本の都市は、これまで郊外へと拡散してきた市街地を集約していく必要に迫られている。特に地方部では、少子高齢化・人口減少と財政制約が厳しくなっており、今よりさらに市街地の低密度化が進行すると、市街地維持コストや移動に係る環境負荷が増大し、都市の経済的・環境的持続可能性が低下してしまうことが懸念される。国土交通省は「国土のグランドデザイン2050～対流促進型国土の形成～」²⁾において、多様な生活サービスを集約した拠点形成し、拠点間を交通網で結ぶ「コンパクト+ネットワーク」を目指す都市構造として推進し、その実現に向けたマスタープランに当たる「立地適正化計画」を策定する自治体が徐々に増えてきている。また、環境省は「地球温暖化対策計画」³⁾において、低炭素型の都市・地域づくりの推進を掲げている。

これは、立地適正化計画に基づく都市のコンパクト化と公共交通網の再構築に加え、地区レベルでのエネルギーの面的利用など都市のエネルギーシステムの効率化も図るものである。

以上を踏まえて、これから長期的な視点で持続可能な都市を実現していくためには、低炭素化と非常時エネルギー供給を両立できるような形に、既成市街地を更新していく必要がある。そこで、自治体の主体的な更新戦略の立案・実施を支援できる定量的な評価システムの開発が必要である。

(2) 研究の目的

本研究では、既成市街地において平常時の低炭素化と非常時のエネルギー供給を実現していくために、「立地誘導」と「エネルギーシステム導入」を同時かつ漸次的に実施する市街地更新の有効性を検証するモデルの開発を目的とする。さらに、開発したモデルを用いてケーススタディーを行い、CO₂排出量と非常時エネルギー供給率の評価を行うことで、モデルの適用可能性や有効性を検証する。

2. 既往研究と研究の位置づけ

(1) 低炭素化に関する既往研究

市街地の低炭素化に資する新たなエネルギーシステム導入に関する研究は、主に新規街区の開発を対象とする例が多く存在するが、既成市街地を対象とする研究は少ない。その中で工月ら⁴⁾は、①新規開発、②大規模既存街区、③中規模既存街区の3種類について、それぞれ複数パターンのエネルギーシステムを導入した場合のCO₂排出削減効果を推計しているが、将来の街区状況の変化を考慮していない。また、石河ら⁵⁾は東京都千代田区を、横井ら⁶⁾は横浜市を対象として、町丁目単位で将来の延床面積を推計し、エネルギーシステム導入時のCO₂排出削減効果を推計している。しかし、これらはエネルギー需要の大きい都心部を対象としており、郊外や地方部などの将来的に市街地集約が必要なエリアでは検討されていない。

以上のように、既存市街地で低炭素化を進めるための有効な施策である「エネルギーシステム導入」と「市街地集約」を一体的に検討・評価した研究は見られず、これらの施策を漸次的に導入していく場合を検証できるモデルの開発が必要である。

(2) 災害時のエネルギー供給に関する取り組みと研究

東日本大震災を契機として、非常時のエネルギー供給を可能とするため、エネルギーシステムを「集中型」から「分散型」へ転換しようとする動きが起きている。環

境省が主体となって、分散型エネルギーの導入促進に向けた次世代電力網構築のための実証事業などを行っている。これらは、再生可能エネルギーの普及による低炭素社会の創出と災害に強いエネルギーシステムの構築を目的としている。

非常時のエネルギー供給を検討した研究として、工月ら⁴⁾は、分散型エネルギーシステムの導入を想定し、非常時に街区全体でエネルギーを供給できる割合をエネルギー自立度指標で量化することで、分散型エネルギーシステムの有用性を評価している。しかし、需要量が最大の時刻のみを評価しており、どの程度供給が可能であるかを時系列で追っていくことはできていない。また、河合ら⁷⁾は街区への創エネルギー技術の導入を想定し、エネルギー自立度指標への影響と費用効率を算出している。しかし、上記の研究はいずれも現状評価のみに留まっており、中長期的にどのように非常時のエネルギー供給を実現していくかに関する提案には至っていない。

(3) 本研究の位置づけ

前節で示したように、平常時の環境負荷と非常時エネルギーを一体的に評価した既往研究は少なく、評価している例はいずれも立地誘導やエネルギーシステム導入の一斉実施を前提としている。しかし、市街地を一斉に更新するのは新規開発や再開発に限られるため、既成市街地の検討に適用することはできず、一般的に適用できるようにするためには漸次的な更新を評価できるようにする研究が必要である。

以上を踏まえ、本研究では既成市街地において立地誘導とエネルギーシステム導入を同時かつ漸次的に実行するプロセスを組み込んだ市街地更新を評価できるモデルを開発する。また、モデルを適用したケーススタディーを行い、将来のCO₂排出量と非常時エネルギー供給率による評価を行う。

3. 市街地更新モデルの全体構成

(1) モデル全体のフローと使用データ

本研究では、低炭素化と非常時エネルギー供給を両立できるようにする市街地更新の方向性を見いだすことが必要である。そこで、建物やインフラといった市街地を構成する空間データを整備した上で、民生部門およびインフラ部門のCO₂排出量と非常時エネルギー供給率の改善に資する施策を組み込んだ更新シナリオについて、建物立地やインフラ・エネルギーシステムの整備状況といった将来の市街地状況を予測シミュレーションする。なお、本研究では民生部門の建物を対象とし、用途区分を天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル

(2008)⁹⁾に基づき、住宅・商業・業務・宿泊・医療・学校の全6種に分類する。

研究全体のフローを図-1に示す。市街地のCO₂排出量と非常時エネルギー供給率は、人口分布や建物立地に大きく影響される。そこで本研究では、市街地の空間構成を捉えたシミュレーションを実施するために、GISソフトのArcGIS Desktopを用いて、町丁目単位で表-1に示す人口や建物などの空間データの整備を行い、2015年から2050年まで5年ごとに市街地の更新パターンを予測できるモデルとした。本モデルは、全国の都市・地域を適用対象に想定し、それを可能とするために全国的に整備されているデータを使用することとした。また、市街地の特徴は一体的な街区群によって異なることが考えられる。そこで、データ整備の空間単位として、メッシュよりも町丁目単位の方が市街地の特徴を反映した推計が適していると考え町丁目単位で推計した。本モデルを用いて、複数の更新シナリオについて市街地状況をシミュレーションした上で、現状のトレンドのまま推移した場合のCO₂排出量と非常時エネルギー供給率を更新シナリオの結果と比較することで、街区スケールでの市街地更新施策の効果を空間的かつ時系列的に評価することが可能である。

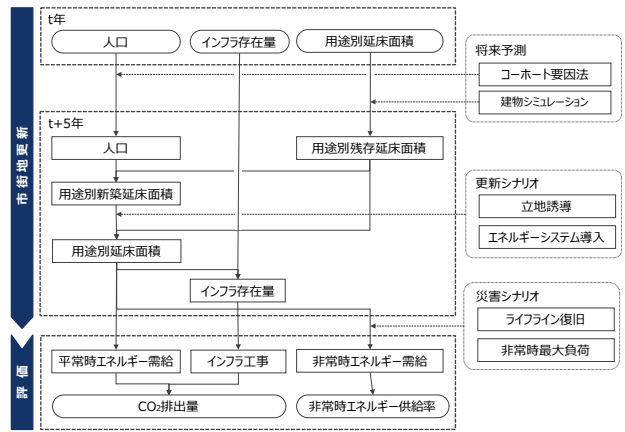


図-1 全体のフロー

表-1 使用データ

項目	名称	発行者
人口	平成 22 年国勢調査町丁 (字等別境界データ) など	総務省 統計局, 国立社会保障・人口問題研究所
建物	建物データ (Zmap-TOWNII)	株式会社ゼンリン
	建築年代別の住宅ストック総数	国土交通省
空間情報	気象データ	気象庁
	日射量データベース	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
	道路データ (Zmap-TOWNII)	株式会社ゼンリン
	河川データ	国土交通省, 国土政策局, 国土情報課
	鉄道データ 用途地域データ	
エネルギー	各種建物の年間電力負荷及び年間熱負荷, 月別パターン, 時刻別パターン	日本エネルギー学会
	災害時等非常時の最大負荷比率 (電力負荷), 災害時等非常時の最大負荷比率 (熱負荷)	一般財団法人建築環境・省エネルギー機構

表-2 更新シナリオの設定

シナリオ	立地誘導	エネルギーシステム
● 誘導なし+集中型		①集中型
● 誘導なし+オール電化		②オール電化
● 誘導なし+分散型 (建物)	(a)誘導なし	③分散型 (建物)
● 誘導なし+分散型 (街区)		④分散型 (街区)
■ 立地適正化計画+集中型		①集中型
■ 立地適正化計画+オール電化	(b)立地適正化計画	②オール電化
■ 立地適正化計画+分散型 (建物)		③分散型 (建物)
■ 立地適正化計画+分散型 (街区)		④分散型 (街区)
▲ 中間+集中型		①集中型
▲ 中間+オール電化	(c)中間	②オール電化
▲ 中間+分散型 (建物)		③分散型 (建物)
▲ 中間+分散型 (街区)		④分散型 (街区)
× ハザードマップ+集中型		①集中型
× ハザードマップ+オール電化	(d)ハザードマップ	②オール電化
× ハザードマップ+分散型 (建物)		③分散型 (建物)
× ハザードマップ+分散型 (街区)		④分散型 (街区)

表-3 誘導比率の設定

地誘導パターン	区域	誘導比率 [%]					
		住宅	商業	業務	宿泊	医療	学校
立地適正化計画	居住誘導区域	+	-20	-20	-20	-20	+
	都市機能誘導区域	-20	+	+	+	+	-20
	その他の区域	-50	-50	-50	-50	-50	-50
ハザードマップ	浸水区域	-100	-100	-100	-100	-100	-100
	その他の区域	+	+	+	+	+	+

(2) 将来人口の推計方法

将来の市街地状況を予測するに当たって、将来人口推計を行う必要がある。平成 22 年国勢調査の性・年齢階級別人口データをもとに、国立社会保障・人口問題研究所⁹⁾が発行する「日本の地域別将来推計人口」の推計方法に従い、コーホート要因法を用いて2010年から5年おきに2050年まで予測を行う。この結果を用いて、各年の居住人口・就業人口・学生人口(7~18歳)を算出する。予測の際に必要な生残率・純移動率・子ども女性比・0~4歳性比は対象地域が属している自治体の値を用い、就業率は全国平均値を用いる。

(3) 将来延床面積の推計方法

建物更新シミュレーションを行い、将来延床面積を推計する。将来延床面積は残存延床面積と新築延床面積をそれぞれ推計し、足し合わせることで算出する。本研究では各建物の築年数および残存率、街区の人口変化率をインプットすることで将来延床面積の推計ができるモデルとなっている(図-1)。

(a) 残存延床面積の推計

建物の立地状況を経年的に予測するには、どの建物が何年に滅失するかというデータが必要になる。そこで本研究では、建築年代別の住宅ストック総数¹⁰⁾¹¹⁾をもとに、各建物に築年数を与え、建物残存率関数¹²⁾を用いて、5年ごとに残存する建物の延床面積を推計する。各建物に

ついて2015年から2050年まで5年ごとに判定するモンテカルロシミュレーションを行い、1000回試行した残存延床面積と滅失延床面積の平均値を各建物が属する町丁目単位で集計する。

(b) 新築延床面積の推計

新たに建設される新築延床面積は、小見ら¹²⁾と石田ら¹³⁾の手法を用いて残存延床面積と人口を用いて推計する。将来の建物需要は建物用途別に異なり、住宅の場合は居住人口、商業・業務・宿泊・医療の場合は就業人口、学校は学生人口（7～18 歳）に依存し、人口当たりの需要量は将来にわたって一定であると仮定する。

(4) インフラ存在量の推計方法

市街地更新シナリオの低炭素化効果を評価するには、インフラ工事（新設・維持・除却）の際に排出されるCO₂排出量も考慮する必要がある。本研究では、石田ら¹³⁾の手法を用いてインフラ存在量を推計する。道路延長の推計は5年ごとに実施し、5年後の方が長い場合、現在との差分を「新設」し、短い場合、差分を「除却」することとする。

(5) 更新シナリオおよび立地誘導の設定

市街地更新施策の2つの柱である施策メニューと技術メニューを組み合わせ、16種類の更新シナリオを設定した（表-2）。それぞれの施策は5年ごとに新築する建物を対象に実施されるものとする。

都市の低炭素性や災害への強さは建物の立地によって異なるため、建物が集約していれば必要なインフラが少なくなり、インフラ部門のCO₂排出削減が期待できる。また、災害時の危険地域等に居住しないようにすれば、被害軽減が期待できる。そこで本研究では、指標に与える影響を比較するために、持続可能性や災害危険性を考慮した立地誘導パターンとして、(a)誘導なし、(b)立地適正化計画、(c)中間、(d)ハザードマップの4種類を下記の通り設定した。

(a) 誘導なし

特別な立地誘導は行わず、現在のトレンドのまま立地する。

(b) 立地適正化計画

コンパクト+ネットワークを推進するためのマスタープランである「立地適正化計画」に従って立地誘導を行う。研究対象地域の立地適正化計画案を基に、居住誘導区域と都市機能誘導区域を設定する。誘導区域の意図に従い、居住誘導区域には「住宅・学校」を、都市機能誘導区域には「商業・業務・宿泊・医療」を誘導する。

(c) 中間

「立地適正化計画」と「ハザードマップ」の誘導を50%ずつ行う。

(d) ハザードマップ

本研究では、災害危険性の低いエリアに立地誘導することが指標に与える影響を考察するために、津波と洪水を対象として大きな被害が予想されるエリアから順次撤

表-4 エネルギーシステム技術導入の概要

システム	②オール電化	③分散型（建物）	④分散型（街区）
概念図			
電力	太陽光発電 蓄電池 系統電力	太陽光発電、 家庭用燃料電池（住宅） ガスエンジン（住宅以外） 蓄電池	太陽光発電 ガスエンジン 蓄電池
給湯	ヒートポンプ給湯機	排熱回収ヒートポンプ 蒸気ボイラー 蓄熱槽	排熱回収ヒートポンプ 蒸気ボイラー 蓄熱槽
暖房 冷房	ヒートポンプエアコン	ヒートポンプエアコン	ヒートポンプエアコン

退するシナリオを考える。具体的には、浸水想定が津波2.0m以上（木造家屋がほぼ全壊する高さ）、または、洪水0.5m以上（床上浸水する高さ）には新築せず、区域外へ誘導するシミュレーションを行う。また、それぞれの区域について表-3の誘導比率（新築時に誘導する割合）を設定し、それぞれの町丁目で新築が予定されている延床面積に誘導比率を乗じて延床面積を算出し、予め設定した区域へ誘導するシミュレーションを行う。例えば、「立地適正化計画」誘導パターンにおいて、「その他の区域」に住宅：100m²、商業：100m²の新築が想定される場合、100m²に50%を乗じた住宅：50m²を「居住誘導区域」へ、商業：50m²「都市機能誘導区域」へそれぞれ誘導し、残りの50m²ずつを元の町丁目に新築する。この際、誘導する延床面積は誘導区域に指定された町丁目の中で建物密度が低い順に按分する。なお、過剰な建物立地を避けるため、制約条件として容積率を用いた。

(6) エネルギーシステムの設定

近年日本で起きた自然災害で集中型エネルギーシステムの脆弱性が露見したため、分散型エネルギーシステム推進の動きが生じている現状を前章までに述べた。それらを踏まえ、本研究では横井ら⁹⁾、森田ら¹⁴⁾を参考に、将来的に普及が予想される「オール電化」、「分散型（建物）」、「分散型（街区）」の3種類のエネルギーシステムを検討した（表-4）。いずれのエネルギーシステムも町丁目単位で構築し、町丁目内の新築建物に順次導入していくものとした。

(a) 集中型

現状と同じく特別な技術導入は行わず、電力系統・都市ガスで供給するエネルギーシステムである。新たに技術を導入する必要はないが、非常時にライフラインが途絶するとエネルギーを供給できない恐れがある。

(b) オール電化

新築する建物をオール電化し、太陽光発電システムを運用する。都市ガスは使用せず、系統電力と太陽光発電でエネルギーを供給する。非常時には太陽光発電と蓄電

池で電力供給が可能である。

(c) 分散型 (建物)

建物単位で個別にエネルギーを生産・消費する分散型の個別利用システム。創エネルギー技術として、太陽光発電とコージェネレーションを導入する。コージェネレーションの燃料は都市ガスを使用するが、東日本大震災クラスの地震にも耐えられる中圧ガス導管による供給を想定しており、非常時にもエネルギー供給が可能である。

(d) 分散型 (街区)

街区 (町丁目) 単位で面的にエネルギーを生産・消費する分散型の面的利用システム。分散型 (建物) と同様に、創エネルギー技術として太陽光発電とコージェネレーションを導入しているが、町丁目内で電力や熱の融通を行うため、より効率的にエネルギーを利用できる。非常時にもエネルギー供給が可能である。

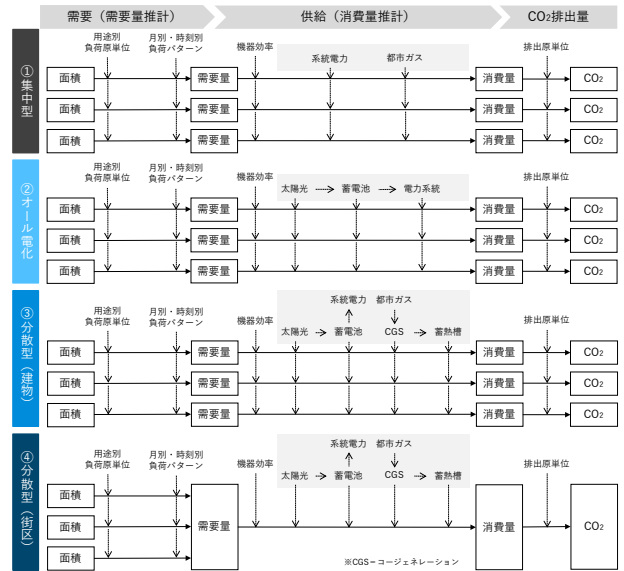


図-2 民生部門 CO2排出量の推計フロー

表-5 建物用途別負荷原単位

負荷		住宅	商業	業務	宿泊	医療	学校	単位
電力負荷	電力	21	226	189	200	170	189	[kWh/(m ² ・年)]
熱負荷	給湯	126	96	8	335	335	8	[MJ/(m ² ・年)]
	暖房	84	147	247	335	310	247	
	冷房	33	523	553	419	335	553	

4. モデル評価システム

第3章で構築したモデルを既成市街地に適用し、民生部門およびインフラ部門の CO2 排出量と非常時エネルギー供給率を時系列で算出する。

(1) 民生部門 CO2 排出量の推計フロー

民生部門の CO2 排出量の推計フローを図-2 に示す。また、推計手順を以下の a)~d) に示す。

- a) Zmap - TOWN II の建物ポリゴンデータを用途別 (住宅・商業・業務・宿泊・医療・学校) に分類し、延床面積データを整備する。
- b) 延床面積に用途別負荷原単位¹⁵⁾およびに月・時間帯別負荷¹⁶⁾¹⁷⁾パターンを乗じて、エネルギー需要量を算出する。
- c) 需要量を各機器効率で除し、エネルギーシステムごとに需給シミュレーションを行い、エネルギー消費量を算出する。
- d) 消費量にエネルギー種別 CO2 排出原単位を乗じて CO2 排出量を算出する。

(2) エネルギー需要量の推計

エネルギー需要量は、先行研究の森田ら¹⁴⁾の手法を参考に (式(1)) を用いて、建物用途別延床面積に負荷原単位 (表-5) と月別・時刻別負荷パターンを乗じること

$$Q_{load}^{use} = A^{use} \cdot L_{load}^{use} \cdot P_{load}^{use} \quad (1)$$

ここで、*use* : 建物用途 (住宅・業務・商業・宿泊・医療・学校), *load* : 負荷の種類 (電力・給湯・暖房・冷房) である。太字は月別・時刻別に変化する。

(3) エネルギー消費量の推計

前項で求めたエネルギー需要量に対し、各システムの構成に合わせてエネルギー消費量を推計する。導入を想定する技術の設定値は、文献¹⁸⁾をもとに将来の技術革新を考慮し設定する。

a) 集中型

集中型エネルギーシステムは、建物ごとのエネルギー需要量に対し、負荷種類別のエネルギー機器を通して供給する。供給の際に消費する電力消費量、都市ガス消費量をそれぞれ算出する。

b) オール電化

新築する建物をオール電化し、各建物に太陽光発電、蓄電池を導入する。エネルギー供給は太陽光発電と蓄電池の放電で行い、不足分を系統電力で賄うものとする。

太陽光発電の発電量と蓄電池の放電量は、山田ら¹⁹⁾と環境省²⁰⁾の手法を用いてそれぞれ算出する。

c) 分散型 (建物)

建物単位ごとに太陽光発電とコージェネレーションの創エネルギー技術²¹⁾に加え、蓄電池と蓄熱槽の蓄エネルギー技術を導入する。コージェネレーションは電力負荷追従型を想定し、太陽光発電と蓄電池の不足分を順次発電する。発電時の排熱は給湯に利用し、余剰分を蓄熱する。排熱と放熱の不足分は補助ボイラーで補うものとする。

る。コージェネレーションは都市ガスを燃料としており、都市ガス消費量をコージェネレーションの発電量、コージェネレーションの排熱量、蓄熱槽の放熱量を用いて算出する。

d) 分散型（街区）

町丁目単位で太陽光発電とコージェネレーションの創エネルギー技術に加え、蓄電池と蓄熱槽の蓄エネルギー技術を導入し、町丁目内の建物のエネルギーを面的に供給する。電力と排熱を効率よく運用できるシステムである。「分散型（建物）」と同様、コージェネレーションは電力負荷追従型を想定し、電力需要に対して太陽光発電と蓄電池の不足分を発電する。発電時の排熱は給湯に利用し、余剰分を蓄熱する。排熱と放熱の不足分を補助ボイラーで補うものとする。

(3) 民生部門 CO₂排出量の推計

民生部門 CO₂排出量は、前項までに算出した電力消費量と都市ガス消費量に CO₂排出係数を乗じることで算出する。民生部門 CO₂排出量 $CE_{consumer}$ の算出式を式(2)に示す。

$$CE_{consumer} = EP \cdot U_{power} + EG \cdot U_{gas} \quad (2)$$

ここで、 U_{power} ：電力の CO₂排出係数、 U_{gas} ：都市ガスの CO₂排出係数。排出係数は対象地域に供給している電力会社およびガス会社が公表している値を用いる（表-6）。

(4) インフラ部門 CO₂排出量の推計

インフラ部門 CO₂排出量 CE_{infra} は式(3)を用いて、第3章で推計した道路延長 R に和田ら²⁹⁾を参考にし、表-7の工種別 CO₂排出原単位 C_{type} を乗じて算出する。

$$CE_{infra} = \sum_{type} R \cdot C_{type} \quad (3)$$

(5) 非常時のエネルギー需要量の推計

災害時などの非常事態にはライフラインが被害を受け供給力が低下するため、平常時よりも需要を抑えなければならない。そこで、本研究では都市機能維持のために最低限必要な非常時のエネルギー需要量を式(4)で推計する。

$$EQ_{load}^{use} = \min\{Q_{load}^{use}, \max(Q_{load}^{use}) \cdot \alpha_{load}^{use}\} \quad (4)$$

非常時エネルギー量 EQ_{load}^{use} は、平常時エネルギー需要量 Q_{load}^{use} と平常時の最大エネルギー需要量 $\max(Q_{load}^{use})$ に表-8で示す最大負荷率 α_{load}^{use} ²⁹⁾ を乗じた値を比較し、少ない方を採用する。なお、今回使用する最

表-6 エネルギー源別 CO₂排出係数

項目	排出係数		出典
電力	0.476	[kg-CO ₂ /kWh]	中部電力株式会社 東邦ガス株式会社
都市ガス	0.0509	[kg-CO ₂ /MJ]	

表-7 インフラ工種別 CO₂排出原単位

項目	原単位	
道路	新設	4468
	維持	0.151
	除却	1441
上水道	新設	13928
	維持	3.382
	除却	12.66
下水道	新設	1949.05
	維持	1.77
	除却	177.18
送電線	新設	12.56
	維持	1.413
	除却	1.73
ガス管	新設	76.48
	維持	1.361
	除却	11.77

表-8 災害時の最大負荷率

	電力負荷	熱負荷
住宅	13.5%	69%
商業	55.8%	96%
業務	27.0%	9.1%
宿泊	37.5%	20.7%
医療	73.1%	300%
学校	27.0%	9.1%

大負荷率は、レベル 2²⁰⁾の①（震災等による通常業務移行まで長時間にわたる供給途絶時に機能維持が必須の項目）である。

(6) 非常時エネルギー供給率の推計

a) ライフライン復旧率の推計

地震等の発生によりライフラインが被害を受け供給力が低下するが、時間経過とともに徐々に復旧していく。本研究では、対象地域の電力系統および都市ガスの被害・復旧状況の時間変動を能島ら²⁹⁾の供給系ライフライン被害・復旧モデルを用いて予測し、次項の非常時エネルギー供給率の推計に使用する。ただし、津波浸水深が 2.0m 以上の地域では、供給不可能と仮定する。

b) 非常時エネルギー供給率の推計

前項までに算出した非常時エネルギー需要量とライフライン復旧率を用いて、非常時エネルギー供給率を算出する。需要量に対して供給量の割合を延床面積に乗じて、エネルギーが供給できる延床面積の割合を非常時エネルギー供給率 ESR とし、10 日間平均値を ESR として式(5)～式(7)で定義する。非常時供給量 ES は、ライフラインの復旧とともに徐々に回復し、非常時エネルギー供給率も回復していく。

$$ESR = \overline{ESR} \quad (5)$$

$$ESR = \frac{\sum_{load} \sum_{use} \left(\frac{ES_{load,exist}^{use}}{EQ_{load,exist}^{use}} \cdot A_{exist} + \frac{ES_{load,new}^{use}}{EQ_{load,new}^{use}} \cdot A_{new} \right)}{A_{exist} + A_{new}} \quad (6)$$

$$ES_{load}^{use} = EQ_{load}^{use} \cdot \gamma_j \quad (7)$$

ここで、 A_{exist} : 既存建物の延床面積, A_{new} : 新築建物の延床面積, γ_j : エネルギー源 j の供給率.

5. ケーススタディー

(1) 対象地域の概要と立地誘導の設定

ケーススタディーは三重県松阪市の都市計画区域を対象に行う(図-3). 松阪市は三重県中部に位置し, JRと私鉄の路線や複数の国道が交差する交通の要衝である. 都市計画区域は伊勢湾に面しており河川も多く流れているため, 津波や洪水などの災害危険性が高い地域でもある. 松阪市は平成30年度末に都市計画マスタープランの見直しと立地適正化計画の策定を行った. そこで, 立地適正化計画と, 市が公表しているハザードマップをもとに, 図-4に示すように, 立地誘導区域を設定し, 市街地更新シミュレーションを行った.

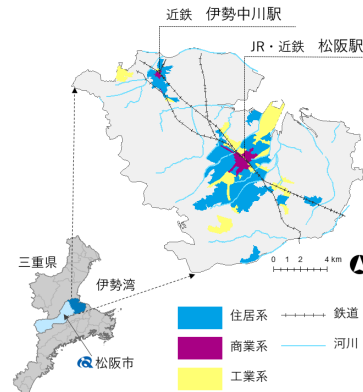


図-3 松阪市都市計画区域の位置と土地利用

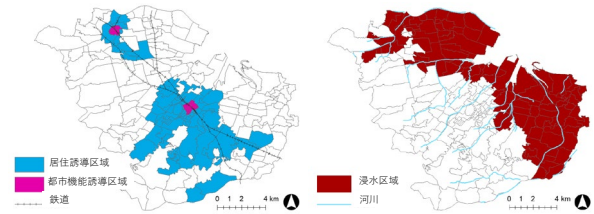


図-4 立地適正化計画(左)とハザードマップ(右)

(2) モデルの適用結果

a) 将来人口の推計結果

図-5にコーホート要因法によって推計した将来人口と高齢化率の推移を示す. 人口は既にピークを過ぎており, 2050年までに23%減少すると予想される. さらに, 少子高齢化の傾向は顕著であり, 2050年までに高齢化率が12%上昇し, 3分の1以上が高齢者になるという結果になった. 高齢化率は内閣府が想定する全国平均よりも0.4%下回る程度であり, 松阪市は全国平均の人口動態に近いと言える.

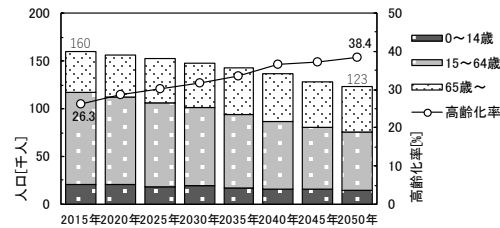


図-5 将来人口と高齢化率の推計結果

b) 将来延床面積の推計結果

対象地域全体の築年別将来延床面積の算出結果を図-6に示す. 人口減少の影響により2050年までに2015年比で22.2%減少するため, 市街地空洞化の可能性が高いことが分かった. さらに, 2015年以前の建物は43%しか残存しておらず, 57%は新築されることから, 立地誘導を順次行っていないと郊外に低密度に建物が立地する恐れがある. 建物は一度建ててしまうと建て替わるまでに50~70年程度要するため, 現時点から立地誘導していくことで2050年までに57%の市街地再構築が可能であることも示している.

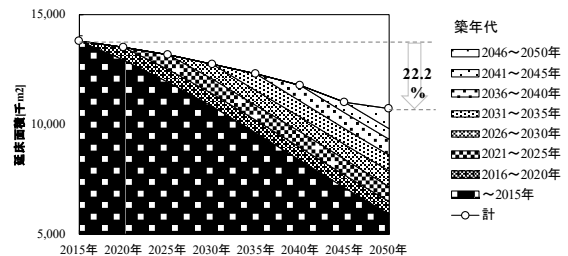


図-6 将来延床面積の推計結果

c) インフラ存在量の推計結果

インフラの存在量は, 立地誘導パターンごとに道路延長を推計し, 居住誘導区域および都市機能誘導区域では既に十分にインフラが整備されているため, 新設は行われないものとした. 2050年の推計結果を図-7に示す.

「誘導なし」と比較して, 「立地適正化計画」は2.7%減少, 「中間」は1.0%増加, 「ハザードマップ」は2.2%増加した. 「立地適正化計画」では, 居住誘導区

域や都市機能誘導区域に誘導したため減少し, 「中間」や「ハザードマップ」では, 既存インフラの整備度合いに関係なく郊外へ誘導したため, インフラが新設され増加したと考えられる.

d) ライフライン復旧率の推計結果

本研究では, 非常事態として南海トラフの巨大地震(最大ケース)を想定した. 発災時のエネルギー供給状況を把握するため, 能島ら²⁴⁾が開発した供給系ライフライン被害・復旧モデルを用いて, 発災後の電力・都市ガスの復旧率をそれぞれ算出した. 電力は急速に復旧し10日間でおおよそ復旧完了する. 都市ガスは発災直後の供給率は電力よりも高いものの, 本研究では非常時のエネルギー供給を電力が復旧する10日間で評価する.

(3) モデルの評価

a) 民生部門 CO₂ 排出量の推計結果

全シナリオの民生部門 CO₂ 排出量の推計結果を図-8 に示す。削減効果は、高い順に、①分散型（街区）：50.2%，②分散型（建物）：40.9%，③オール電化：39.3%，④集中型：20.8%となった。「オール電化」では太陽光発電と高効率機器、「分散型（建物）」では太陽光発電とコージェネレーションによる高い削減効果が確認できた。

「集中型」・「オール電化」・「分散型（建物）」では、立地誘導による差は見られなかったが、これは建物の立地場所が消費エネルギーに影響を与えないことを示している。一方で、「分散型（街区）」では立地誘導ごとに削減効果が異なる結果となり、面的利用による削減効果が高い順に、①ハザードマップ：17.8%，②中間：16.6%，③誘導なし：15.8%，④立地適正化計画：14.1%となった。これは、立地誘導ごとに町丁目内の建物用途の混合比率が異なることで、電力や熱の融通効率に差が出るのが原因と考えられる。

b) 面的利用の CO₂ 排出削減効果

図-9 に 3 タイプの電力・熱需要量の年平均値を示す。全用途の中で「住宅」が最も給湯需要が高く熱需要量が多いため、住宅の割合が高いほど電力に対して熱の割合が高くなる。熱の割合が高いと、コージェネレーションによる発電時の排熱を最大限に活用でき、高い効果が得られる。そのため、熱需要の多い「住宅地」では高い削減効果が得られていると考えられる。一方で、「中心市街地」では業務系の割合が高く、電力需要に対して熱需要が少ない。そのため、コージェネレーションで大量に発電しても、排熱の需要がなくエネルギーに無駄が生じてしまい、効果が低くなると考えられる。つまり、「立地適正化計画」は用途に偏りができるように誘導するために効果が低くなり、「ハザードマップ」では用途は均一に誘導すると仮定しているため効果が高くなることが明らかになった。

c) インフラ部門 CO₂ 排出量の推計結果

2050年の道路延長とインフラ部門 CO₂ 排出量の関係を図-10 に示す。「中間」と「ハザードマップ」では、道路延長が長いいため CO₂ 排出量も多くなっているが、「誘導なし」と「立地適正化計画」ではこの関係が逆転している。この理由としては、「誘導なし」では排出量の少ない「維持工事」が中心であるが、「立地適正化計画」では集約することによって郊外部の「除却工事」が多く行われることが考えられる。2015年以前から存在する建物が滅失する 2070 年頃には立地誘導の緩慢化に伴って除却工事が少なくなり、「立地適正化計画」が最も排出量が少なくなる可能性がある。

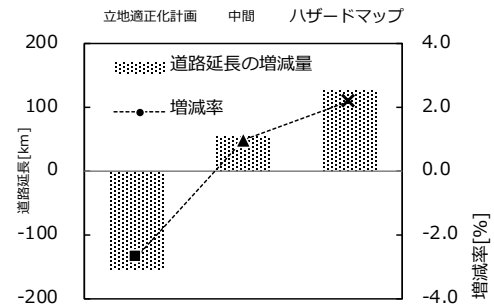


図-7 インフラ（道路）の増減率（2050年）

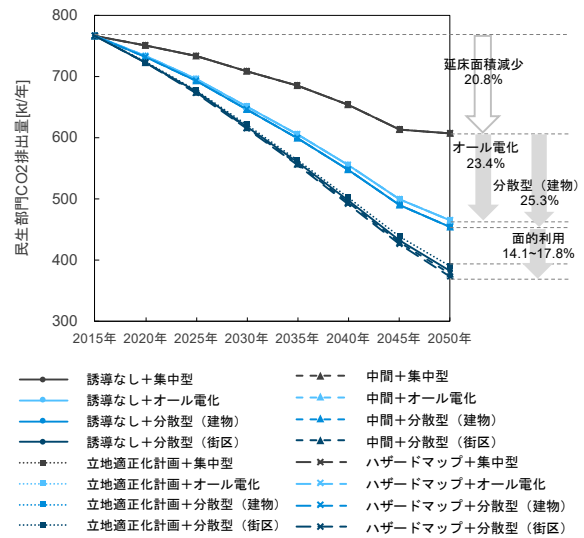


図-8 民生部門 CO₂ 排出量の経年変化

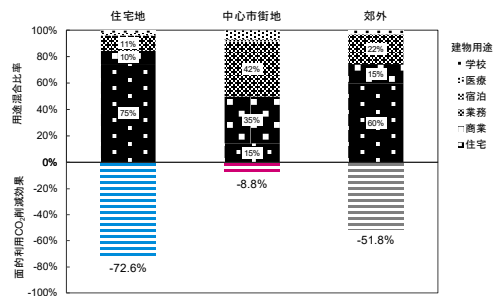


図-9 市街地タイプ別の用途混合比率と面的利用効果

d) 民生+インフラ部門 CO₂ 排出量の推計結果

2050年における民生+インフラ部門の CO₂ 排出削減率（2015年比）を表-9 に示す。立地誘導よりもエネルギーシステムの方が影響が大きく、同一のエネルギーシステム間では大きな差は現れなかった。民生部門に限った場合、「ハザードマップ+分散型（街区）」が最も削減率が高かったが、「ハザードマップ」はインフラ部門で最も多くの CO₂ を排出するため、両部門を合算した場合は他のシナリオよりも削減率が低くなる。結果として、2050 年時点で最も削減率が高いシナリオは、49.5%で「誘導なし+分散型（街区）」となった。

e) 非常時エネルギー供給率の推計結果

図-11 は非常時エネルギーの供給率の経年変化を、表-10 は 2050 年のエネルギーの供給率の推計結果を示す。

エネルギーシステムの種類ごとに大きく 4 つに分かれて推移している。供給率が高い順に、①分散型（建物・街区ともに同じ）：79.4%，②オール電化：71.7%~74.2%，③集中型：61.8%~68.8%という結果が得られた。「分散型」は建物・街区ともに同値であるが、これは、災害に強い中圧管を用いて供給するため、非常時も供給可能だからである。「オール電化」は太陽光発電による創エネルギー効果と災害に弱い都市ガスに依存しないことが向上の要因として考えられる。立地誘導もエネルギー供給率の向上に大きく寄与することが明らかになった。

「集中型」の場合、効果が高い順に、①ハザードマップ：+7.0%，②中間：+4.9%，③立地適正化計画：+2.6%，④誘導なし：-1.5%となった。いずれも、被害が大きい区域から撤退した量に比例して向上している。

f) 各シナリオの推定結果のマッピングと施策評価

これまで推計した結果を基に、各シナリオの特徴を把握するため、横軸に CO₂ 排出削減率、縦軸に非常時エネルギー供給率を取って図-12 にマッピングを行った。

「集中型」と「オール電化」に注目してみると、立地誘導が 2 つの指標に与える効果はトレードオフの関係になった。現在の市街地から災害危険性の低い郊外へ立地誘導すると、非常時エネルギーは確保しやすくなるが、道路や上下水道などの新設によって、インフラ部門の CO₂ 排出量が増大することが明らかになった。立地誘導の手間と環境への影響を考えると、「ハザードマップ」による誘導は現実的ではないと唆できる。

「分散型（建物）」と「分散型（街区）」を比較すると、「街区」の方が電力・熱融通によってエネルギーを効率化できるため、CO₂ 排出削減率が高い。それぞれのグループ内の分布を見ると、「建物」の方が立地誘導による差が大きい。これは立地誘導によるインフラ部門の CO₂ 排出量が影響していると考えられる。

6. 結論

本研究では、既成市街地において、平常時の低炭素化と非常時のエネルギー供給を実現していくために、立地誘導とエネルギーシステム導入を組み込んだ市街地更新シナリオを評価するためのモデルを開発した。その上で、モデルを松阪市に適用し、民生部門およびインフラ部門の CO₂ 排出量と非常時エネルギー供給率による評価を行った。得られた成果と今後の課題を以下に整理する。

(1) 成果

- 全国で整備された一般的に入手可能な空間データを使用したモデルを開発した。立地誘導による将来の建物立地状況変化を空間的かつ時系列的に把握する

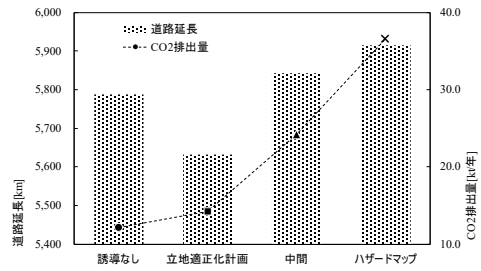


図-10 道路延長とインフラ部門 CO₂ 排出量 (2050年)

表-9 2050年 CO₂ 排出削減率 (2015年比)

	集中型	オール電化	分散型 (建物)	分散型 (街区)
誘導なし	20.5%	38.7%	40.3%	49.5%
立地適正化計画	20.3%	38.5%	40.0%	48.2%
中間	19.0%	37.2%	38.7%	48.3%
ハザードマップ	17.4%	35.6%	37.1%	47.5%

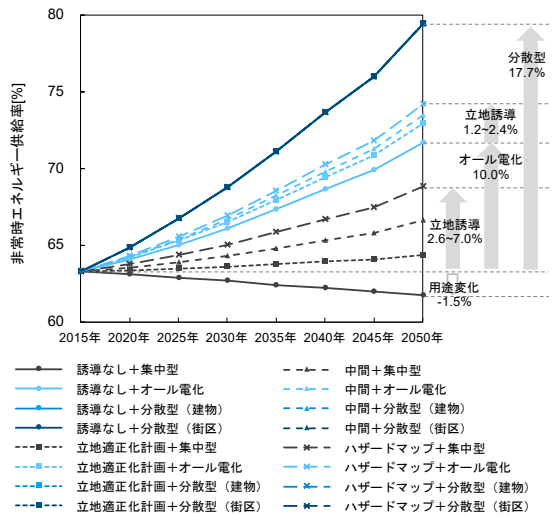


図-11 非常時エネルギー供給率の経年変化

表-10 エネルギー供給率 (2050年)

	集中型	オール電化	分散型 (建物)	分散型 (街区)
誘導なし	61.8%	62.6%	79.4%	79.4%
立地適正化計画	64.4%	65.2%	79.4%	79.4%
中間	66.7%	67.3%	79.4%	79.4%
ハザードマップ	68.8%	69.4%	79.4%	79.4%

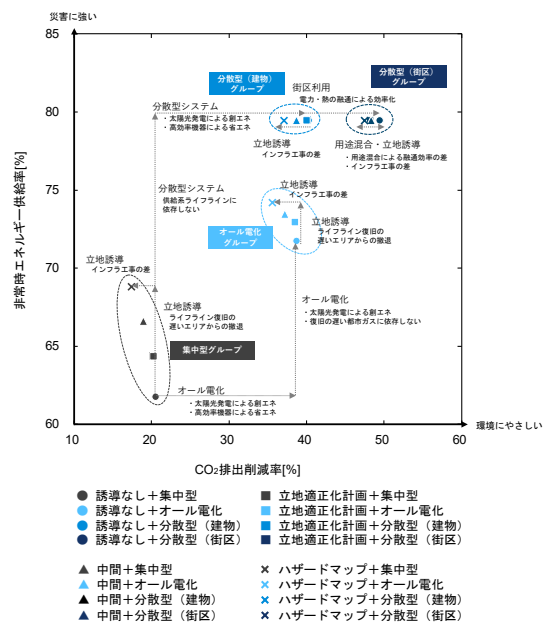


図-12 各シナリオの推定結果のマッピング

- ことが可能になり、さらに全国の実際の都市・地域における施策検討を可能とした。
 - 立地誘導を実施した場合のインフラ存在量やエネルギー需要量の推計が可能となり、インフラ整備計画や設備導入を検討する際に有用である。
 - 立地誘導が CO₂ 排出量と非常時エネルギー供給率に与える効果は、片方が改善すれば、もう片方が悪化するというトレードオフの関係にある。
 - 「立地適正化計画」は、ある程度災害危険性を考慮した地区設定をしているため、非常時エネルギー供給率の向上に寄与するが十分ではない。「ハザードマップ」に従って誘導すると、大きく向上する。
 - 居住誘導区域や都市機能誘導区域においてインフラが十分に整備されているとしたとき、「立地適正化計画」に従って立地誘導することにより、インフラ存在量を削減することは可能であるが、除却工事が進むことで一時的に CO₂ 排出量が増大する可能性がある。しかし、将来的には集約が進むにつれて排出量は少なくなる。
 - 「ハザードマップ」や「中間」の立地誘導では、郊外へ建物が誘導されるため、郊外においてインフラの新設が必要になり、CO₂ 排出量が大きく増大する恐れがある。「ハザードマップ」や「中間」は、非常時エネルギー供給率の向上には寄与する一方で、インフラの新設で手間がかかる上、環境負荷が増大するため、実施は賢明ではない。
 - 環境負荷という観点で、「オール電化」と「分散型（建物）」を比較すると、効果はほぼ同等であるが、本研究のように非常時エネルギー供給率を考慮すると、非常時のエネルギー供給力に大きな差があることが確認できる。
 - 「分散型（街区）」は、街区内の建物の用途混合比率によって排熱の活用度が異なるため、省エネルギー効果に差が出る。本研究のように、熱の用途を給湯に限定する場合、住宅地において高い効果を発揮する一方で、中心市街地では効果が低くなる。用途に偏りができるような立地誘導を行うと、効果が低くなる恐れがあるため、立地誘導の際は用途混合を考慮する必要がある。
- (2) 課題
- 更新施策実施時のコストを算出することで、より実用的なモデルとなる。
 - 立地誘導による効果をより包括的に把握するためには、トリップ長や交通手段分担率の変化や電気自動車の導入を考慮した上で、交通部門 CO₂ 排出量を評価する必要がある。
 - 立地適正化計画によって立地誘導すると、徒歩・自転車・鉄道の分担率が増加し、自動車の分担率が低下することで、交通部門 CO₂ 排出量が減少することが予想される。
 - ハザードマップに従って立地誘導すると、自動車の分担率が増加し、交通部門 CO₂ 排出量が増加すると考えられるが、電気自動車の導入によって増加分を低減することで、現状より削減する可能性も考えられる。
- 謝辞：本研究は、文部科学省地球環境情報等融合プログラム (DIAS-P) および (独) 環境再生保全機構の環境研究総合推進費 (2-1706) 「再生可能都市への転換戦略—気候変動と巨大自然災害にすなやかに対応するために—」の一環として実施したものである。
- 参考文献
- 1) 総務省：分散型エネルギーインフラプロジェクト, 2014. http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/006/pdf/006_05.pdf, (最終閲覧日：2019年10月4日)
 - 2) 国土交通省 (2014)：国土のグランドデザイン 2050～対流促進型国土の形成～, 2014. <http://www.mlit.go.jp/common/001047113.pdf>, (最終閲覧日：2019年10月4日)
 - 3) 環境省：地球温暖化対策計画, 2016. <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/onntaikaikaku-zentaiban.pdf>, (最終閲覧日：2019年10月4日)
 - 4) 工月良太, 村上周三, 佐土原聡, 市川徹, 青笹健, 長谷川巖, 柳井崇, 元アンナ, 三井戸清史：分散型エネルギーシステムの面的な活用による街区のサステナビリティ向上に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第14巻, 第28号, pp.497-502, 2008.
 - 5) 石河正寛, 村木美貴, 小倉裕直：都心における低炭素型都市実現のためのエネルギーシステムに関する研究, 都市計画論文集, 45(0), pp.91-91, 2010.
 - 6) 横井隆志, 山本祐吾, 東海明宏, 盛岡通：低炭素都市の形成に向けた街区更新及びエネルギー計画の統合を支援するシステム開発, 土木学会論文集 G(環境), Vol.66, No.1, 1_17-1_34, 2010.
 - 7) 河合一輝, 加藤博和, 長尾和哉, 清水大夢, 秋山祐樹：環境負荷とエネルギーセキュリティを考慮した地区更新過程の評価手法の検討, 土木計画学研究・講演集, vol.57, CD-ROM(36-02), 2018.
 - 8) 日本エネルギー学会, 柏木孝夫：天然ガスコージョエネレーション計画・設計マニュアル 2008, p.339, 日本工業出版, 2008.

- 9) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の地域別将来推計人口，2018。 <http://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson18/1kouhyo/gaiyo.pdf>，（最終閲覧日：2019年10月4日）
- 10) 総務省：平成25年住宅・土地統計調査，2015。
- 11) 国土交通省：建築年代別の住宅ストック総数，2018。
- 12) 小見康夫，栗田紀之：長寿命化トレンドを考慮した建物残存率のシミュレーションー建物の長寿命化トレンドにおける建材のストック/排出量の算出手法に関する研究その1，日本建築学会計画系論文集 第75巻第656号，pp. 2459-2465，2010。
- 13) 石田千香，森田紘圭，杉本賢二，加藤博和，林良嗣：建物の立地誘導による街区群の低炭素化効果の検討，土木計画学研究・講演集，Vol.51，CD-ROM(139)，2015。
- 14) 森田紘圭，金岡芳美，加藤博和，柴原尚希，林良嗣：個人の生活スケジュールを考慮した低炭素技術導入によるCO₂排出量への影響分析，土木学会論文集 G，Vol.69，No.5，I33-I43，2013。
- 15) 住環境計画研究所：家庭用エネルギーハンドブック＜2014年版＞，2103。
- 16) 鶴崎敬大，水谷傑，山田恭輔，野部達夫：マルチパッケージ型空調機の実効効率と省エネルギーに関する研究，その1) 実効効率の評価と待機時消費電力の検討，空調調和・衛生工学会学術講演会講演論文集2月号，pp. 1891-1894，2012。
- 17) 太田貴博，長井達夫，新井研人，高貴悠右，高橋康熙，三原邦彰，小野永吉，荒井良延：建物用途別負荷原単位及び未利用エネルギーデータの整備，42巻，239号，p.27-35，2017。
- 18) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：太陽光発電ロードマップ（PV2030+）概要版，2009，<https://www.nedo.go.jp/content/100080327.pdf>，（最終閲覧日：2019年10月4日）
- 19) 山田興一，高橋伸英（2009）：都市への燃料電池と太陽電池導入によるエネルギー削減効果，環境省地球環境研究総合推進費 S-3「脱温暖化社会に向けた中長期的政策オプションの多面的かつ総合的な評価・予測・立案手法の確立に関する総合研究プロジェクト」最終報告書，pp.S-3-3-65-S-3-3-89。
- 20) 環境省：平成24年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書，2013。
<https://www.env.go.jp/earth/report/h23-03/chp3.pdf>，（最終閲覧日：2019年10月4日）
- 21) 日本エネルギー学会：天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル2008，日本工業出版，p.339，2008。
- 22) 和田夏子，大野秀敏：都市のコンパクト化のCO₂排出量評価ー長岡市を事例とした都市のコンパクトの評価に関する研究一，日本建築学会環境系論文集，第76巻，第668号，pp.935-941，2011
- 23) 日本サステナブル建築協会：スマートエネルギータウン調査報告書，http://www.jsbc.or.jp/project/2012/pdf/smart_ene.pdf，（最終閲覧日：2019年10月4日），2012。
- 24) 能島暢呂，加藤宏紀：供給系ライフラインの地震時機能評価モデルの改良と再検証ー東日本大震災を対象とした都道府県別評価一，第5回相互連関を考慮したライフライン減災対策に関するシンポジウム講演集，pp. 94-104，2013。

(2019.10.4)

DEVELOPING AN URBAN RENEWAL MODEL FOR LOW CARBONIZATION AND EMERGENCY ENERGY SUPPLY

Suil PARK, Kazuya NAGAO, Yuki OHNO, Hirokazu KATO

Since the Great East Japan Earthquake in 2011, the vulnerability of the energy supply has become a major challenge. Therefore, the importance of securing the energy supply in the occurrence of a disaster, simultaneously with the realization of a low-carbon society has been recognized. In this study, an urban renewal evaluation model for existing urban areas was developed to achieve both low carbonization and the securing of energy supplies during disasters. The model incorporates “Urban Facility Location Plans” and “Energy Creation, Storage and Conservation Measures”. Matsusaka City was evaluated by the constructed model. This study evaluates the alternative scenarios formed based on “Urban Facility Location Plans” (Location Optimization Plans, Hazard Maps, and the combination of both), and “Energy creation, storage, and conservation measures”. It was found that “Urban Facility Location Plans” scenarios generally bring a trade-off relationship between low carbonization and energy supplies. However, it is clear that a synergistic effect could be achieved by combining both “Location guidance measures” and “Energy measures” scenarios.