

気候変動に対応した地域のサステナビリティとレジリエンスの評価手法と実都市適用への試み

朴 秀日¹・加藤 博和²・大野 悠貴³・石川 佳治⁴・
北詰 恵一⁵・井ノ口 弘昭⁶・秋山 祐樹⁷

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
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町) E-mail: suil@urban.env.nagoya-u.ac.jp

²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
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町) E-mail: kato@genv.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

⁴非会員 名古屋大学 大学院情報学研究科

⁵正会員 関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科

⁶正会員 関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科

⁷正会員 東京大学 空間情報科学研究センター

本研究は、日本の都市が気候変動に対応できるように、中長期で漸次的に都市構造を転換していくための戦略の立案・実施するための検討手法を目指す。そのために、環境（温室効果ガス）・社会（QOL）・経済（市街地維持更新費用）のトリプルボトムライン（Triple Bottom Line : TBL）の各側面を統合した長期的持続可能性（Sustainability）と、気候変動によって激化が予想される自然災害へのレジリエンス（Resilience）の2側面の統合評価システムを開発し、実都市へ適用・評価する。また、目指すべき都市構造転換のための立地誘導シナリオを設定し検証する。本研究では、松阪市を対象に統合評価システムを適用・評価し、さらに、立地適正化計画とハザードマップ、高リスク地域の撤退・徒歩圏への集約といったシナリオを設定し立地誘導の効果を試みた。本研究は、気候変動における再生可能都市に向けた都市構造の転換戦略の適応・緩和策として、地方公共団体の関連計画の策定・実施に活用できるような出力を得ることを目指す。

Key Words: *Climate Change Adaptation, Sustainability, Resilience, TBL, QOL, QALY, DALY*

1. はじめに

(1) 研究の背景

2050年は世界人口の約7割が都市に集中し、このような都市の人口が急激に増加している中で、地球温暖化等の環境問題をはじめ、気候変動への対応、災害と安全、エネルギー問題等、都市における持続可能性が重大な課題として国際的な意識が高まっている。その中で、環境問題の取り組みとしては、気候変動国際連合枠組条約（UNFCCC）第21回締約国会議（COP21）においても2020年以降の温室効果ガス排出量削減等に取り組む国際枠組みであるパリ協定が採択され、日本の場合は2030年度に2013年比で温室効果ガスを26%削減、2050年まで80%削減を目標としている。また、持続可能な都市の脅威ととして、気候変動・極端気象による巨大自然災害に対する取り組みも課題としてあげられている。特に、日本はこの数十年間に渡り、東日本大震災をはじめ、台風や大雨による洪水といった自然災害とその被害が相次いでいる。

一方、日本の都市は高度成長期以後の人口増加とモータリゼーションに応じてスプロール的に拡散した市街地は、人口減少と超高齢化等により、特に、地方中小都市の市街地は過疎化の拡散とともに、空家・空地の問題が深刻となっており、そのためには社会インフラの再整備と生活の質の向上を目指した成熟型都市への転換が求められており、特に、水害や津波被害の激甚化を踏まえた巨大自然災害から安全な地域へ居住誘導といった土地利用の変更や防災計画の見直しといった安全で安心な都市の形成・転換が求められている。

しかし、地球温暖化対策推進法で規定されている「地方公共団体実行計画」における具体的な施策の盛り込み、暮らしやすい居住・都市機能のための立地誘導と関連する立地適正化計画や気候変動適応計画の策定およびそれらの具体的な効果など、自治体レベルでの取り組みは未だ立ち遅れている状況となっている。

このような持続可能な都市の脅威に対し、地方中小都市は今後どう対応していくべきかが重要な課題として挙げられ、これらの諸課題について国内外で様々な研究や

実践が行われてきた。政府の施策および実践戦略としては、国土グランド計画 2050¹⁾、や地球温暖化対策計画²⁾などが、コンパクトシティおよび都市空間構造を分析・評価した研究^{3,4,5)}、自然災害においては、人的・物的被害の災害リスクを分析・評価した研究^{6,7,8)}などが見られる。

しかし、戦略全般の方向性、特に、本研究で主に対象とする社会インフラや土地利用といった、長期にわたり人間活動を支配する空間構造要素をどのように再配置していくかという観点で、地域の Sustainability と Resilience の両視点からの評価の統合を試みた研究は行われていなかった。今後数十年にわたる都市戦略では、持続性への重大な脅威となる気候変動に関する緩和・適応策とともに、深く関連するエネルギー危機や巨大自然災害をも考慮しておく必要がある。その推進によって実現される持続性の高い都市を本研究では「再生可能都市」と定義し、日本の都市を中長期で漸次的に再生可能都市に転換していく戦略を地域主体で立案し実施するための支援ツールを整備し実都市への適用・評価する。

(2) 研究の目的および位置づけ

本研究で定義している「再生可能都市」は、気候変動・エネルギーセキュリティ・自然災害という3つの外的な脅威に加え、人口減少や超高齢化、インフラ・建築物の劣化進展を踏まえ、これらの危機を受け止めるのではなく受け流して「しなやかに」対応できるとともに、SDGsに基づき Sustainability と Resilience を両立した空間構造を有する都市のことを言う。

そこで本研究の最終目標は、日本の都市を「再生可能都市」に転換していくため、建物・インフラ更新過程を考慮し、更新のタイミングに働きかけることで、中長期で漸次的な転換を進める集約拠点形成および、立地誘導等の気候変動の適応策における戦略とそれらに伴う温室効果ガスの増減の評価や削減効果等を、関連計画・施策策定時、地域が主体となって立案・実施できる評価・検討手法を目指す。

これらの目標に対し、本研究では都市やそれを構成する都市・地域および街区の単位で、環境（温室効果ガスを含む）・社会・経済のトリプルボトムライン (Triple Bottom Line : TBL)^{9,10)}の各側面を結合した長期的持続可能性 (Sustainability) と、気候変動によって激甚化が予想される自然災害へのレジリエンス (Resilience)^{11,12)}の2側面の評価体系をつくり、それを一般の都市に適用・評価を行ってきた。これまでは都市の持続可能性の脅威に対する取り組みとしては別個に検討されてきたが、空間構造要素をどのように再配置していくかという観点で、両視点を考慮した評価や、必要に応じてそれぞれを評価できる手法が必要とされる。

そこで本研究では、地域の Sustainability と Resilience の

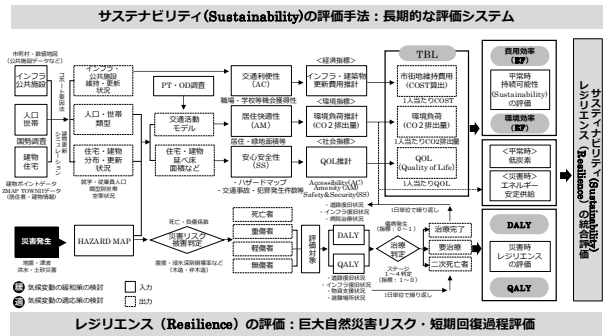


図-1 システムの全体構成

両方を考慮した評価システムを開発し¹³⁾、本システムを実都市へ適用し、本システム評価の可能性および方向性等を試みた^{14,15)}。今回は、以前のケーススタディーを踏まえ、実都市への適用を試みる。

2. 気候変動を考慮した Sustainability と Resilience の評価システム

本章では、開発したシステムを紹介し、分析方法及び評価手法を簡略に説明する。なお、システムを適用した平常時と災害時の各部門における推計式や図表、原単位等においては、既に前の原稿で紹介しているため省略し、その都度引用することとする。

(1) システムの全体構成と将来推計

本研究で開発した統合評価システムの全体構成を図-1に示す。まず、一般に入手可能な国勢調査の人口や交通データ (PT・OD 調査等) や各市町村のホームページに公開されているインフラ・公共施設に関するデータなどを用いて現状分析および将来推計のためのデータ整備を行う。将来推計は、既に整備しているデータを用いてコーホート要因法によるインフラ・建築物や人口・年齢・世帯構成の推計を通じて将来の学生・従業員などの将来予測・推計する。さらに、立地変更策や交通網整備による影響を推計するモデルを加えることで、建物更新と空家発生状況を経年的・空間的に予測できる。これらの推計・予測は町丁目単位および 500m メッシュで行い、各地区の建物の撤退のタイミングや将来の新設および延床面積、交通モデルといった都市域の空間的な再編の方向性を検討できる。一般に入手可能なデータ及び自治体などが持っているデータを用いることで、実際の都市での施策検討を可能とする。対象となる期間は 2015 年を基準に現状分析を行い、2050 まで1期5年を単位でコーホート要因法による将来推計を行うもとする。

(2) Sustainability 評価

Sustainability の評価指標は SDGs (7: クリーンエネルギー, 11: 都市, 13: 気候変動の対策) を考慮しつつ, 社会・環境・経済の TBL の指標を用いて評価する. 社会指標は, 交通利便性と居住快適性, 安心安全性といった生活の質 (Quality Of Life: QOL), に着目し, 先行研究の手法¹⁰⁾を用いて行う. 経済指標においては, 都市の基幹となる市街地のインフラ (市町村の道路・上下水道・排水等)・公共施設等総合管理計画 (福祉・病院・学校・市町村の庁舎・文化施設等) など公共施設の面積や年間管理運用・更新費用を参考しつつ, 年間維持管理と 30~40年1回のリフォーム等を考慮した更新費用を取り上げ, 対象となる都市の公共施設データ (築年数, 費用など) とコーホート要因法等を用いて推計する. 環境指標においては, 前項^{9),15),17)}手法を用いて, 民生部門 (住宅・商業・業務・学校・宿泊・医療施設), 交通部門 (PT・OD 調査等), インフラ部門 (道路・水道・電気・ガス等のインフラ・ライフライン) を対象に, 需要・量供給および立地誘導時の除却・新設のとき発生する CO₂排出量を推計する.

(3) Resilience 評価

Resilience の評価は, コーホートモデルによる将来人口やハザードマップにより, 南海トラフ巨大地震を想定 (内閣府等) し, 巨大地震や津波, 台風, 高潮, 大雨, 土砂災害等による災害の1次被害 (直接被害) を予測・算出したうえで, 質調整生存年 (Quality Adjusted Life Year: QALY) や障害調整生存年 (Disability Adjusted Life Year: DALY) の余命指標を用いて, 災害発生後の長期避難生活に伴う不安やストレス等による2次被害 (間接被害) を約30~60日, 1日ごとに算出し, 短期回復過程を分析・評価する. この推計方法についても, 先行研究^{11),12)}で行った手法と算出式および重み等を用いて推計を行う. 災害時の Resilience の解析単位においては, 約250m四方に細分化した5次メッシュ単位で推計を行う. これは, なるべく詳細な単位で各指標を推計して積み上げることにより, 都市空間構造との関係をミクロレベルで分析するためである.

(4) 総合評価

社会・環境・経済指標の TBL 推計結果から得られた値を用いて, 環境面と費用面からなる効率性として, 環境効率 (EF) と費用効率 (CF) を求める.

災害時の場合は, DALY と QALY の余命指標を用いて推計された直接被害と間接被害の時系列変化に基づき, 最後は, 平常時における Sustainability と災害時における Resilience の総合評価を行う.

3. ケーススタディー: 実都市ヘシステムの適用

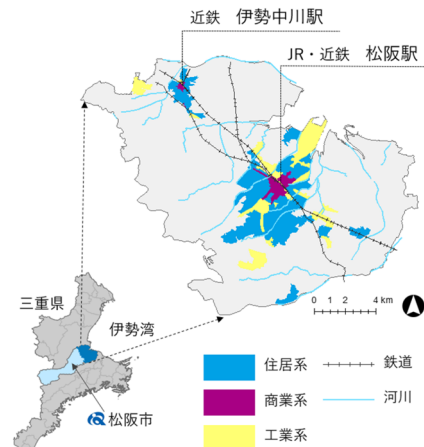


図-2 松阪市都市計画区域の位置と土地利用

表-1 データ一覧

項目	名称	発行者
人口	平成22年国勢調査	国土数値情報, 総務省
建物	Zmap-TOWNII	株式会社ゼンリン
住宅	建物ポイントデータ	秋山ら・東京大学地球観測データ統融合連携研究機構
道路	基盤地図情報・道路データ	国土地理院
空間情報	気象データ	気象庁
	Zmap-TOWNII	株式会社ゼンリン
	河川・鉄道・用途地域データ	国土交通省, 国土政策局, 国土情報課
避難所	避難施設データ	国土数値情報
仮設住宅	応急仮設住宅着工推移	国土交通省住宅局 (2012)
介護・医療施設	介護施設データ	国土数値情報
入浴施設	入浴施設	国土数値情報, GOOGLE MAP 等
スーパー	DARMS2016	株式会社ゼンリン
学校	高校など	避難施設データ
震度分布	南海トラフ巨大地震モデルデータセットA	内閣府
津波深水深	南海トラフ巨大地震モデルデータセットA	内閣府
その他	各地域の避難所や備蓄物品状況など	各地方公共団体 HP など

(1) 対象地域および将来推計結果

ケーススタディーは, 三重県松阪市および都市計画区域を対象にした. (図-2). 松阪市は三重県中部に位置し, 松阪市の行政区域の面積は, 62,358(ha), 都市計画区域は 17,441(ha)のうち, 市街化区域は 3,067(ha), 市街化調整区域は 14,373(ha)となっている. 公共交通においては, JR と近鉄の路線等の鉄道が交差する交通の要衝として, 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も高い地域である.

表-1 は使用したデータ一覧を示し, 松阪市の現況を把握するために 2015 年を基準に現状分析を行った.

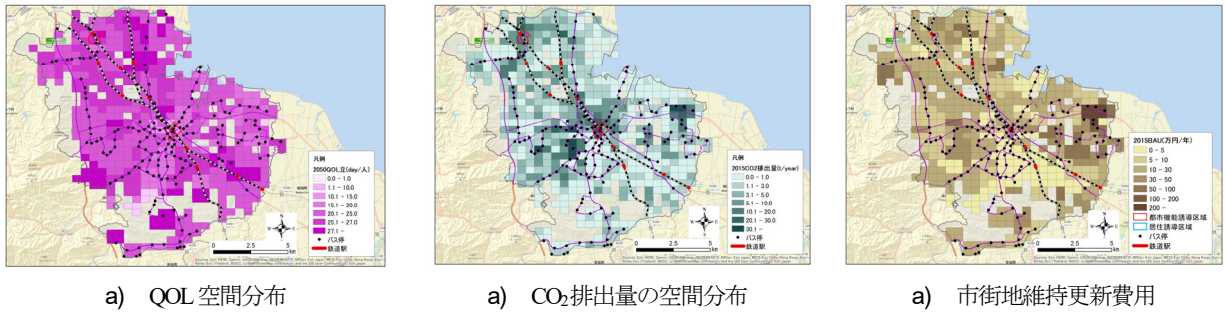


図4 平常時にTBL分析結果(2015)

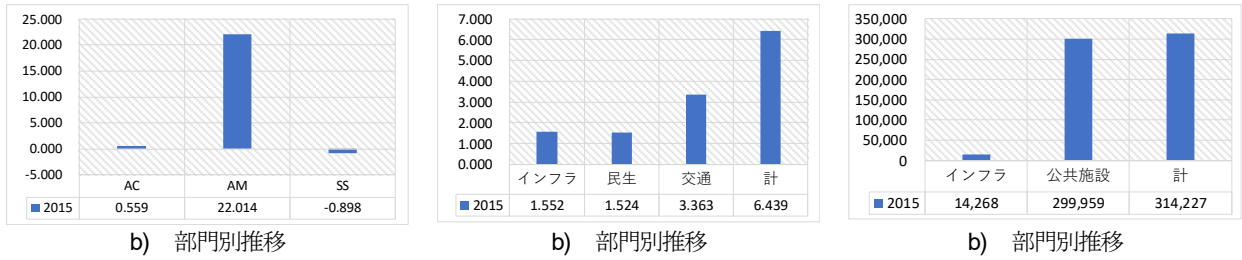


図5 平常時のTBL分析結果(2015)

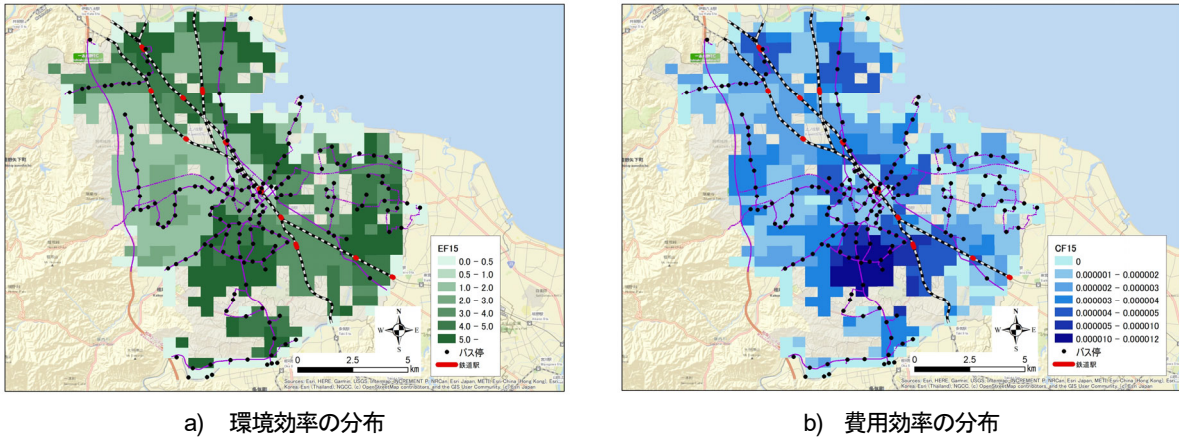


図6 環境効率と費用効率の分析結果(2015)

(2) 平常時の Sustainability の適用

a) 生活の質(QOL)の推計結果

図4と図5は松阪市東部地域の都市計画区域を対象にした平常時のTBL分析結果（空間分布と各部門別推移）を示す。

QOLの推計は先行研究¹⁶⁾の手法を用い、交通利便性（Accessibility：AC）は就業・買物・文化・医療施設への利便性を、居住快適性（Amenity：AM）は居住や自然環境空間・景観性、公園緑地面積等、安心安全性（Safety&Security：SS）は地震、洪水、犯罪率、交通事故など、3つの評価軸からなる12の項目を生活環境質向上機会（Life Prospects: LPs）として、対応するデータを用いて数値化し、それに個人の価値観を表す重みを乗じて総和をとることによりQOLを推計・定量化するものとなっている。2015年のQOLの空間的分布結果をみると、地域全体的に等しい値を示しているが、特に、鉄道やバス路線沿いの地域や延床面積の広い一部の郊外居住地が大

きくなっている。路線沿いの地域においては交通利便性が、1人当たりの延床面積の高い郊外居住地においては居住快適性などの影響が大きく反映されている結果であると考えられる。部門別推移をみると、居住快適性が非常に高くなっている反面、それに対し安心安全性と交通利便性は低くなっており、居住快適性と安全安心性・交通利便性がトレードオフの関係にあることが明らかになった。

b) CO₂生排出量の推計結果

CO₂排出量においては、松阪市駅周辺の商業・業務地をはじめ、工業地区および西部の延床面積の広い郊外地域の居住地において高くなっている。この推計結果を踏まえつつ、部門別推移をみた結果、交通部門の場合は公共交通空白地域が高くなっており、インフラおよび民生部門においては郊外住宅地域で大きくなっている。

c) 市街地維持更新費用の推計結果

市街地維持更新費用の結果は、人口の少ない郊外住宅

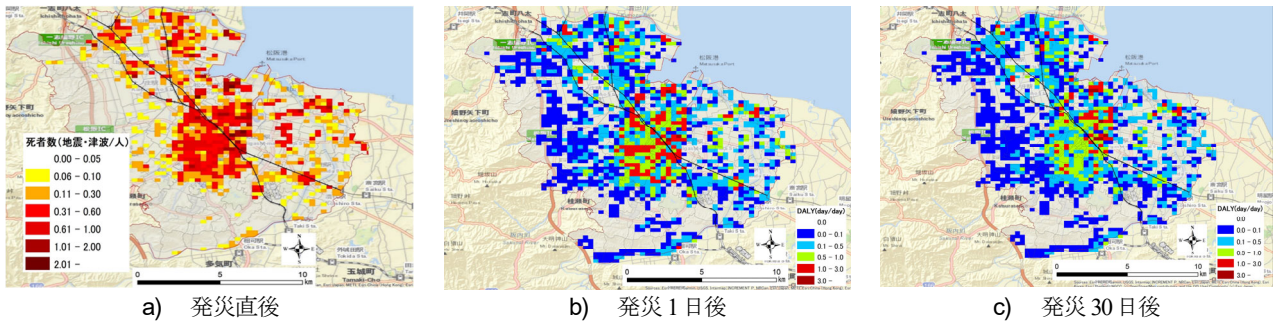


図-7 災害時の生命健康被害 (DALY) の推計結果

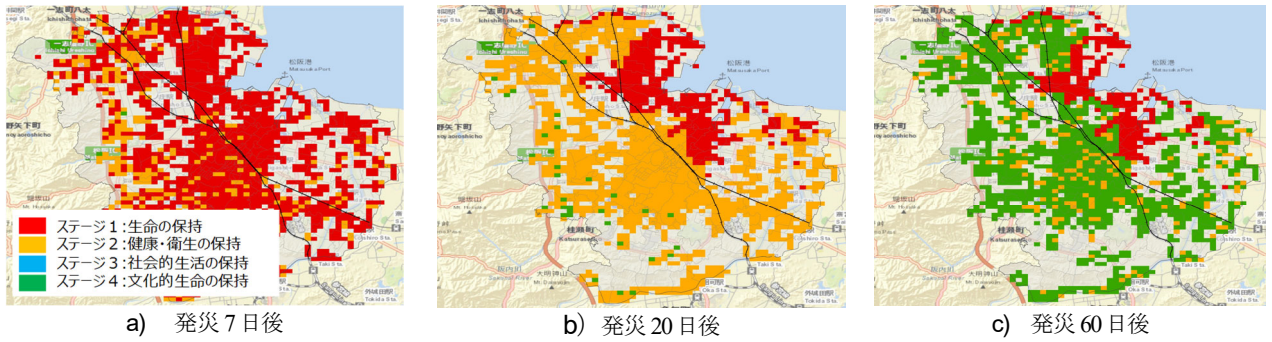


図-8 災害時の生活環境被害 (QALY) の推計結果

地域において高くなっているが、その他、公共交通空白地域においても大きくなっている。部門別推移をみると、公共施設の維持管理・更新費用が圧倒的に高く、これは地域的偏差も大きくなっている。

d) TBL の推計結果のまとめ

2015年のQOLと環境負荷，市街地維持更新費用の推計結果をまとめると下記のようなものである。

- ・ 東部都市計画区域は居住快適性が圧倒的に高くなっており、特に、鉄道やバス路線沿いと、1人当たりの延床面積の広い地域において高くなっている。一方、交通利便性と安心安全性が非常に低くなっており、これらはお互いにトレードオフの関係にある。
- ・ CO₂排出量においては、人口密度の高い地域と商業・業務・工業地域および公共交通空白地域において高くなっている。
- ・ 市街地維持更新費用の場合、特に、人口の少ない地域と公共交通空白地域において高くなっている。

e) 環境効率と費用効率の推計

図-6は環境効率と費用効率の分析結果を示す。

図-6のa)はQOLを環境負荷で除した環境効率を、図-6のb)はQOLを市街地維持更新費用で除した費用効率を表している。

環境効率の高い地域においては、QOLが高い地域にCO₂排出量の少ない地域を濃い緑に示しており、費用効率の高い地域は、QOLが高い地域に市街地維持更新費用が少ない地域を濃い青に示し、反対は薄い緑と薄い緑青

表-2 松阪市の1次被害 (直接被害)

松阪市	地震動	津波	合計
死者数	309	3	313
重傷者数	131	1	132
軽傷者数	1,348	13	1,361
避難者数	約 32,176		

に示している。環境効率と費用効率は同様に、一部地域を除外し、鉄道沿線および都市圏辺縁部と人口の多い住宅地に比較的高くなっており、海岸部と郊外部の低密度な地域は効率が低くなっているのが分かる。これは南北方面の鉄道路線と放射状のバス路線が整備されている松阪市の地理的特性や交通を反映した結果であると考えられる。

(3) 災害時のリスクに対する Resilience 評価

a) 1次被害 (直接被害) の算出結果

災害時においては、南海トラフ巨大地震の被害で甚大な被害を受ける東海3県のうち、内閣府が作成した南海トラフ巨大地震の被害想定データ(ケース①「駿河湾から紀伊半島沖に大すべり域+超大すべり域を設定したケース」)を用いて、三重県全域を対象に地震・津波による人的被害の経時変化について、生命健康被害と生活環境被害に分け、1次被害とともに約30-60日間の短期的な回復過程を推計した。今回は地震発生時刻を早朝5時とし、建物滞留率が100%と仮定して被害量を算出する。

地震動と津波による1次被害の推計結果を表-2に示す。負傷を伴う被災者は三重県の他の地域に比べて津波によ

る被害は最も少なかったものの、避難者を含め、およそ 3万4千人の被害が発生する結果となった。特に、地震動による死亡率が高く、主に、人口密度の高い市街地の中心部が高くなっている。津波による被害はよっぽど少なかったが、松阪市東部の海岸部の一部住宅地においては津波浸水深の2-5m地域が分布しているため、水害による被害が予想される。

b) 2次被害（間接被害）の算出結果および考察

発災直後から 30 日後までの 1 次被害とともに避難生活による生活環境悪化や被災者の免疫力低下、傷病発生率の増加、持病の悪化による二次死亡といった生命健康被害の推計結果を図-7 に、避難生活の不安・ストレスなど、生活環境悪化による被害の推計結果を図-8 に示す。

まず、生命健康被害（DALY）の推計結果をみると、

発災直後の死亡率が高い地域は、松阪市の中心部と海岸部の津波浸水地域となっている。発災1日後の被害状況をみると、中心部のDALY値が過半以上を示しており、郊外地域においては低くなっている。しかし、中心市街地においては次第にDALY値が回復している一方で、郊外地域は、発災30日後までの約1ヶ月間において回復スピードが遅くなっているのが分かる。このように、地域的な回復スピードの差がみられる原因としては、中心部の場合はインフラやライフライン、医療施設などの支援を受けやすいが、郊外地域においては1次被害は少ないものの、道路や水道復旧の遅れにより、医療機能低下による回復に時間がかかってしまうため、さらなる2次被害が続く恐れがあると考えられる。

生活環境被害（QALY）の推計結果をみると、発災 7 日後にも一部地域を除いて、発災後 20 日以後からは健康・衛生の保持段階に回復する一方、東の海岸低地帯津の波浸水地域においてはステージ 1 にとどまっており、2 次被害の恐れが高い。アクセスが困難な郊外地域においては生命健康の 2 次被害が、東側の海岸部の浸水地域においては生活環境悪化による 2 次被害が高くなっており、発災後 20 日間の対応が非常に重要となっている。

4. 都市構造改編シナリオの設定による分析

(1) 統合評価システムの適用将来の推計

a) 人口将来推計

前項で行った現状把握・分析を踏まえ市街地状況を予測し、将来の人口誘導シナリオを設定するに当たって、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・人口問題研究所が発行する「日本の地域別将来推計人口」

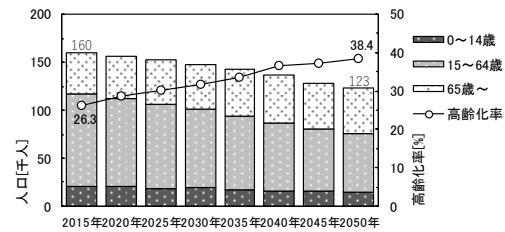


図-10 将来人口と高齢化率の推計結果

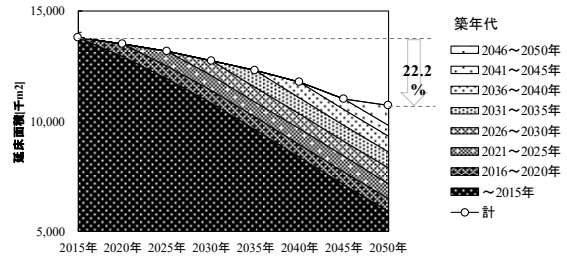


図-11 将来延床面積の推計結果

表-3 人口誘導方法

立地誘導パターン	区域	誘導比率[%]
立地適正化計画	■居住誘導区域	20% ↑
	■都市機能誘導区域	
	■その他の区域	
ハザードマップ	■浸水区域	100% ↑ (津波2.0m以上)
中間		上記の半分ずつ誘導 (立地適正化計画50%ハザードマップ50%反映)
撤退+誘導・集約 (コンパクト化) <small>現施策+組み合わせた独自提案型</small>	■居住誘導区域	100% ↑
	■都市機能誘導区域	
	■駅・バス停800m圏域 (網計画・公共交通ネットワークを踏まえた区域)	
	■他→■他・■駅・バス800m圏 (100%)	
	■他→■他・■駅・バス800m圏 (20%)	

の推計方法に従い、2010 年人口データを用いてコーホート要因法に基づき、5年おきに2015年から2050年まで将来予測を行う。

図-10 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。松阪市の人口は、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、市人口の 3 分の 1 以上が高齢者になるという結果になった。

b) 将来延床面積およびインフラの推計結果

松阪市の都市計画区域内の築年代別の将来延床面積の算出結果を図-11 に示す。人口減少の影響により 2050 年までに 2015 年比で 22.2 %減少し、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。

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 排出量や費用を考慮する必要がある。本研究では、石田ら¹⁷⁾の手法を用いてインフラ存在量を推計する。対象は道路、水道、電気などのインフラやライフラインを

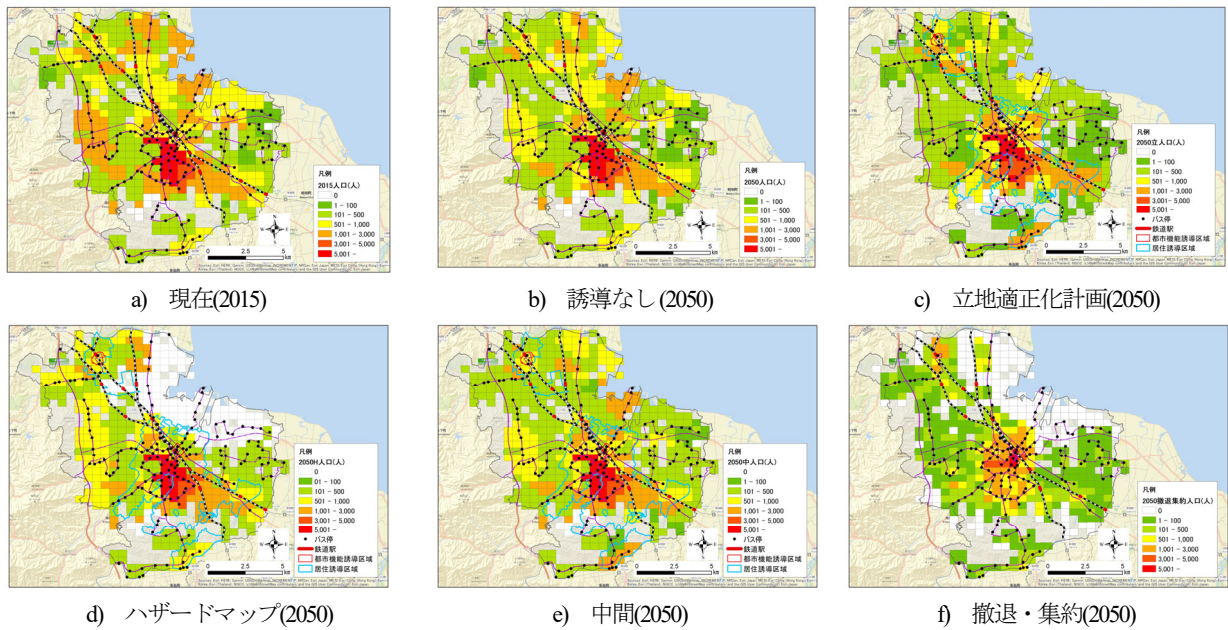


図-12 シナリオの立地誘導後の将来人口の空間分布

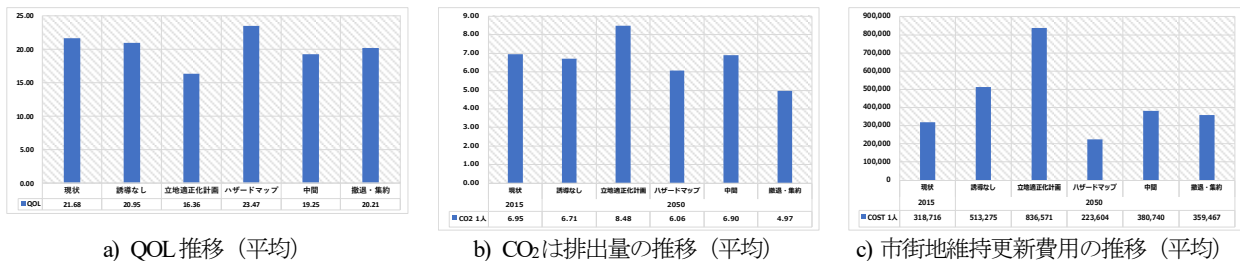


図-13 シナリオの立地誘導後のTBLの推移

対象に道路の延長推計を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。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、新設は行われなかった。

(2) シナリオ設定方法および考え方

本章では、将来目指すべき都市構造改編のシナリオを設定し、定量的評価を行う。適用するシナリオは、4章で行った平常時のTBLと環境・費用効率の各指標による解析結果と災害時の1・2次被害を踏まえつつ、1章とで前述したように、市町村の都市計画における施策検討に資することを目指し、誘導方法を表-2に示す。なお、区域ごとに誘導比率（新築時に誘導する割合）を設定するとともに、誘導する建物は、密度の低い区域に容積率を考慮し配分する。

設定したシナリオを下記にまとめる。

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) 立地適正化計画の適用

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) ハザードマップの適用

ハザードマップは、被災想定区域から防災・減災の撤退策として、津波や洪水等の大きな被害が予想される浸水深2m以上のエリアから順次撤退し、その他地域に誘導する。

d) 中間（立地適正化計画とハザードマップの適用）

中間策というのは、立地適正化計画とハザードマップの適正な混合によるシナリオを適用する。

e) 撤退・集約

撤退・集約策は、安心で安全な地域を最優先に災害や危険地域から完全に撤退する。また、松阪市の都市計画マスタープランや立地適正化計画などの現施策に基づき、都心域と地域拠点間の連携を公共交通ネットワークで図りつつ、多様な都市機能が集積した駅そば集約を想定し、歩いて暮らせる住環境を目指したものである。

(3) 統合評価システムによる推計結果

a) シナリオごとの人口分布

シナリオ導入後の人口分布を図-12 に示す。

コーホートによる 2050 年の将来人口推計結果、人口は 2015 年の約 16 万人から約 12 万に 23%減少し、誘導後の人口密度も減少するが容積率を考慮し、密度の低い区域に優先に建物・人口を誘導した。その結果、誘導なしと立地適正化計画、中間の場合は、人口が居住誘導区域を中心に人口が集中し浸水地域においても居住しているのが分かる。一方、ハザードマップと撤退・集約の場合は、津波浸水地域 (2m 以上) から完全に撤退し、ハザードマップの場合はその他の地域に、撤退・集約の場合はバス停・鉄道駅の徒歩圏内 (800m) に誘導している。

b) シナリオ適用後の QOL の推移変化

シナリオ導入後の QOL の推移を図-13a) に示す。

2050 年「誘導なし」と「立地適正化計画」、「撤退・集約」のシナリオの場合、QOL 値は 2015 年に比べて若干減少する結果となったが、「ハザードマップ」は上昇している。これは 2015 年の結果からみると分かるように、安心安全性が非常に低かったため、「撤退・集約」と「ハザードマップ」のように、安全な地域へ撤退し、駅やバス停の 800m 付近の交通利便性の高いエリアへ集約することで QOL が向上している。「立地誘導適正化計画」の場合は、主に、居住誘導区域へ集約していくため、逆に居住快適性が低くなる結果となった。さらに、浸水地域からの居住者が半分ぐらい残っているため、安心安全性も低くなった結果と考えられる。

c) シナリオ適用後の環境負荷(CO₂排出量)の推移変化

1 人当たりの CO₂ 排出量の推移を図-13b) に示す。

立地誘導の結果、「立地適正化計画」の CO₂ 排出量が最も高くなっており、次いで「中間」、「ハザードマップ」、「撤退・集約」の順となっている。「立地適正化計画」の場合、撤退と誘導によるインフラ部門の CO₂ 排出量は少ないものの、民生 (住宅・商業・業務・宿泊・医療・学校) と交通部門の CO₂ 排出量が比較的大きくなっている。一方、「ハザードマップ」と「撤退・集約」の場合は、撤退・集約時のインフラ部門の CO₂ 排出量は大きくなっているが、立地誘導が進むことにより CO₂ 排出量は次第に減っており、さらに、民生部門と交通部門の排出量も他より少ない結果となった。

d) シナリオ適用後の市街地維持更新費用の推移変化

1 人当たりの市街地維持更新費用の推移を図-13c) に示す。1 人当たりの年間維持費用をみると、「立地適正化計画」が最も高くなっており、次いで「誘導なし」、「中間」、「撤退・集約」、「ハザードマップ」の順に表れた。「ハザードマップ」と「撤退・集約」の費用を比較すると、「ハザードマップ」の場合、浸水地域の人

口が全て既存のその他の地域 (人口密度の低い地域順) に誘導されているため、市街地維持や更新費用が一番低くなっており、「撤退・集約」の場合も費用が比較的に低くなっているが、バス停・駅周辺に誘導しているためインフラなどの費用が「ハザードマップ」よりは少し高くなっているのが分かる。一方、「立地適正化計画」と「誘導なし」の場合は、その他の一部地域において低密度化されてるため、1 人当たりの市街地維持費用が高くなっていることが明らかになった。

6. 結論及び課題

(1) 結論

本研究では、日本の都市を再生可能都市に転換していくため、建物・インフラ更新過程を考慮し、中長期で漸次的な転換を進める集約拠点形成および立地誘導等の戦略シナリオを実都市への適用を試みた。

これまで得られた成果および今後の課題を整理する。

- ・ 本研究で用いたデータは、一部建物データを除外し、一般に整備されたオープンデータを使用しているため、全国の地域に適用できるものにしており、さらに、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ことができる。
- ・ 本システムを用いて、松阪市を対象に 2105 年現況の持続可能性の評価を行った。その結果、QOL の場合は、居住快適性が圧倒的に高くなっており、交通利便性と安心安全性が非常に低く、お互いにはトレードオフの関係にある。一方、1 人当たりの CO₂ 排出量においては、人口密度の高い地域や公共交通空白地域において高くなっており、1 人当たりの市街地維持更新費用の場合、人口の少ない低密度な地域や公共交通空白地域において高くなっていることが明らかになった。
- ・ 得られた結果を用いて、環境効率と費用効率を求め松阪市の都市計画区域を評価した結果、環境効率と費用効率は同様に、鉄道沿線および都市圏辺縁部と人口の多い住宅地に比較的高くなっており、これは南北方面の鉄道路線と放射状のバス路線が整備されている松阪市の地理的特性や交通を反映した結果であると考えられる。
- ・ 災害時においては、1 次被害 (直接被害) 場合は津波による死亡者数は少ないものの、都心部を中心に地震動による被害が多かった。
- ・ 2 次被害の生命健康被害 (DALY) の結果、都心の中心部において 1 次被害が多いが、次第に回復し、郊外地域の場合は 1 次被害が少ないものの、回復スピードが遅く、さらなる 2 次被害が懸念される。
- ・ 生活環境悪化被害 (DALY) の結果、避難者が多い

ため回復に時間がかかり、特に、海岸部の津波浸水地域においては、発災 60 日まで生命・健康の保持段階にとどまり、この地域においても、さらなる 2 次被害が高くなっている。なお、アクセスが困難な郊外地域においては生命健康の 2 次被害が、東の海岸部の浸水地域においては、生活環境悪化による 2 次被害増加の恐れが高く、これらの被害を防ぐためには発災後の 20~30 日間の対処が非常に重要となっている。

- 以上の分析結果を踏まえ、4 つパターン的人口・立地誘導のシナリオを設定し、平常時における TBL を評価した。その結果、QOL と 1 人当たりの市街地維持更新費用においては「ハザードマップ」、1 人当たりの CO₂ 排出量においては、「撤退・集約」シナリオが一番高い結果となった。「立地適正化計画」においては、総 CO₂ 排出量は多くないが、郊外地域の低密度化による 1 人当たりの CO₂ 排出量と市街地維持更新費用が高くなっており、その他の地域の郊外地域の低密度化が課題として挙げられる。

以上のように、本研究で開発している長期的持続可能性 (Sustainability) と災害時におけるレジリエンス (Resilience) の評価システムを用いて、実都市へ適用・評価し、シナリオの導入を通じて、気候変動の適応・緩和策として次のように都市構造の転換戦略を検討する際に、関連計画の策定・実施に活用できる。

まず、将来推計においては、コーホートモデルを用いて、建築物・インフラ更新と、交通活動や家庭・業務活動の変化が予測でき、それに起因する環境負荷やコストも推計できる。これらに従い、各分門における CO₂ 排出量の推計や、温室効果ガス削減計画の立案・検討に活用できるだけでなく、各地区の更新・集積・撤退のタイミングや、都市域の空間的な再編の方向性を検討できる。

災害時においては、想定される巨大自然災害に関し、気温上昇や気候変動などの影響による海面上昇や津波、水害・土砂災害等の災害リスク増大を予測することによって、インフラ・建築物の整備等の防護策、立地変更策および危険地域からの撤退や安全な場所への誘導、自然災害に対する被害率を予測した撤退・集約といった立地誘導を通じた適応策の検討が可能となる。なお、災害時におけるエネルギー・電力供給の阻害等を防ぐ施策の検討を低炭素・エネルギー施策において考慮することができる。

(2) 課題および今後の進め方

本研究の課題と今後の進め方についてまとめる。

- 平常時の QOL 推計に当たって実施したアンケート調査は 2010~2015 年に実施したものであるため、新

しい価値観の変化を反映するためには最新の調査による重みを策定する必要がある。

- なお、2050 年を想定した立地誘導シナリオにおいては、Society5.0 や MaaS が既に定着し BRT や LRT 等による非常に交通便利性の高い時代が到来する可能性が高くなっている。また、AI などの新技術、ビッグデータ等の情報を利用した住環境・交通環境の変化が予想されるため、これらを考慮した環境負荷の削減などを考慮する必要がある。
- 設定したシナリオに基づき、立地誘導ごとの生命健康被害 (DALY) と生活環境被害 (QALY) を分析し、災害時のレジリエンスを評価する。

最後は得られた成果に基づき、長期的持続可能性 (Sustainability) と災害時におけるレジリエンス (Resilience) の総合評価を通じて、「コンパクト+ネットワーク」が都市の持続可能性向上にどの程度寄与するか、それを実現するために、建築物・インフラ更新時の立地誘導をどのように進めていくべきかについて分析・考察する。

謝辞：本稿は環境研究総合推進費 (環境再生保全機構) 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シなやかに対応するために—」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 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: 2020 年 3 月 8 日)
- 2) 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: 2020 年 3 月 8 日)
- 3) 中道久美子・谷口守・松中亮治 (2004) 都市コンパクト化政策に対する簡易な評価システムの実用化に関する研究—豊田市を対象にした SLIM CITY モデルの応用—, 都市計画論文集, No.39-3, 67-72.
- 4) 和田夏子・大野秀俊 (2011) 都市のコンパクト化の CO₂ 排出量評価—長岡市を対象とした都市のコンパクト化評価に関する研究 その 1—, 日本建築学会環境系論文集, Vol.76, No.668, 935-941.
- 5) 佐藤晃・森本章倫 (2009) 都市コンパクト化の度合に着目した維持管理費の削減効果に関する研究, 都市計画論文集, No.44-3, 535-540.
- 6) 秋間将宏・風間聡・小森大輔 (2016) 再現確率にもとづく洪水氾濫・高潮複合災害潜在被害額推定, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72(4), 1267-1272.
- 7) 池内幸司・越智繁雄・藤山秀章・安田吾郎・岡村次

- 郎・青野正志（2013）大規模水害時の人的被害の想定と被害軽減方策の効果分析，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.69(4)，1651-1656.
- 8) 片田敏孝・桑沢行（2009）ダム機能を考慮した下流域の洪水氾濫対策のためのシミュレーション・システムの開発，土木学会論文集 D，Vol.65(3)，280-292.
- 9) 戸川卓哉，加藤博和，林良嗣：トリプルボトムライン指標に基づく小学校区単位の地域持続性評価，土木学会論文集 D3，土木計画学，68(5)，383-396，2012.
- 10) 鈴木祐大，加知範康，戸川卓哉：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，地球環境研究論文集，17，93-102，2009.
- 11) 高野剛志，森田紘圭，戸川卓哉，福本雅之，三室碧人，加藤博和，林良嗣：東日本大震災における被災者生活環境の時間的変化の評価，土木学会論文集 D3，69(5)，125-135，2013.
- 12) 橘竜瞳，森田紘圭，杉本賢二，加藤博和，林良嗣，秋山祐樹：大規模自然災害による生命・健康・生活へのダメージの余命指標を用いた評価，土木計画学研究・講演集，2014.
- 13) 朴秀日，加藤博和，石川佳治，山中英生，奥嶋政嗣，渡辺公次郎：地域のサステナビリティとレジリエンスを同時に考慮できる評価システムの開発，第 57 回土木計画学研究発表会・講演集，2018.
- 14) 朴秀日，加藤博和，清水大夢，大野悠貴，石川佳治，山中英生，奥嶋政嗣，渡辺公次郎，井若和久，秋山祐樹：気候変動に対応した地域のサステナビリティとレジリエンスを同時に考慮できる評価手法，第 58 回土木計画学研究発表会・講演集，2019.
- 15) 朴秀日，長尾和哉，大野悠貴，加藤博和：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，第 60 回土木計画学研究発表会・講演集，2019.
- 16) 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，Vol.62，No.4，558-573，2007
- 17) 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.

(2020.3.8)

EVALUATION METHOD THAT CAN SIMULTANEOUSLY CONSIDERING
SUSTAINABILITY AND RESILIENCE OF THE REGION FOR MITIGATION AND
ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE

Suil PARK, Hirokazu KATO, Yuki OHNO, Yoshiharu ISHIKAWA,
Keiichi KITAZUME, Hiroaki INOBUCHI, Yuuki AKIYAMA