

# 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

朴 秀日<sup>1</sup>・加藤 博和<sup>2</sup>・清水 大夢<sup>3</sup>・大野 悠貴<sup>4</sup>・石川 佳治<sup>5</sup>・  
山中 英生<sup>6</sup>・奥嶋 政嗣<sup>7</sup>・渡辺 公次郎<sup>8</sup>・井若 和久<sup>9</sup>・秋山 祐樹<sup>10</sup>

- <sup>1</sup>非会員 名古屋大学研究員 大学院環境学研究科附属持続的共発展教育センター  
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町) E-mail: suil@urban.env.nagoya-u.ac.jp
- <sup>2</sup>正会員 名古屋大学教授 大学院環境学研究科附属持続的共発展教育センター  
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町) E-mail: kato@genv.nagoya-u.ac.jp
- <sup>3</sup>正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社
- <sup>4</sup>正会員 名古屋大学研究員 大学院環境学研究科附属持続的共発展教育センター
- <sup>5</sup>非会員 名古屋大学教授 大学院情報学研究科
- <sup>6</sup>正会員 徳島大学教授 大学院社会産業理工学研究部
- <sup>7</sup>正会員 徳島大学准教授 大学院社会産業理工学研究部
- <sup>8</sup>正会員 徳島大学大学助教 大学院社会産業理工学研究部
- <sup>9</sup>正会員 徳島大学大学研究員 大学院社会産業理工学研究部
- <sup>10</sup>正会員 東京大学助教 空間情報科学研究センター

日本の都市を今後の気候変動に対応できるように転換していくため、建物・インフラ更新のタイミングで気候変動の緩和・適応策を施し、中長期で漸次的に変化を進めていく戦略の立案・実施を目指すことが求められる。本研究では、そのための評価手法を提案することを目的とする。

具体的には、都市やそれを構成する街区の単位で、環境（温室効果ガス）に加え・社会（QOL）・経済（市街地維持費用）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側面の評価体系をつくり、実都市に適用する。

本システムを用いて、立地・交通関係施策とエネルギー・環境関係施策を同時に、都市更新の進展に合わせて行うことで、中長期的な都市の Sustainability や Resilience 向上に資する施策実施ロードマップを見出せる。よって、これらを地球温暖化対策推進法の地方公共団体実行計画（区域施策編）や関連計画の策定・実施に活用できるような出力を得ることができる。

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

## 1. はじめに

東日本大震災は、極めて甚大な被害をもたらすとともに、日本の国土・都市戦略に大きな転換を迫るものとなった。自然災害への備えの不十分さが露呈し、レジリエンスの概念が注目されるようになった。地球環境分野では、計画停電のインパクトが大きく、地域自らエネルギーをマネジメントしようという意識が芽生え、再生可能エネルギー導入の必要性も認識されるようになった。

また、極端気象による災害が多く発生していることから、今後徐々に顕在化していくと見込まれる温室効果ガス等による気候変動に適応していく必要性が認識されつつある。具体的には、水害や津波被害の激甚化を踏まえた土地利用の変更や防災計画の見直しが考えられる。

一方、日本では従来から国・自治体に取り組んできた低炭素化の取組みがやや後退した感があるが、パリ協定の発効など世界での取組は着実に前進しており、化石燃料依存型社会のままでは、いずれ経済的に大きな制約を受けることも忘れてはならない。

人口減少・超高齢化が進み、経済成長も緩慢となり、国全体で生活基盤をトップダウン的に維持・充実していくことが困難となる中、人間社会の持続性への脅威に対応すべく、国土・都市戦略の転換が急務である。これを構成する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が、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存在しない。また、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、関連する立地適正化計画等での低炭素化への配慮、及び気候変動適応計画の策定など、自治体レベルでの取り組みは未だ立ち遅れている。

欧米や東アジア諸国でスマートシティの研究と実践が進む中、インフラや建築物の大量更新時期が迫る日本では、都市戦略転換の必要性を広く地域の関係者に理解してもらい、合意形成を経て、新たな戦略立案・推進に結びつける方法論の開発・社会実装がどうしても必要である。

## 2. 研究の目的と位置づけ

本研究は、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戦略を、地域が主体となって立案・実施できる評価手法を提案する。

「再生可能都市」とは、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 基準をクリアして Well-being を安定的に確保できる、Sustainability と Resilience を両立した空間構造を有する都市のことを言う。

これまで3つの脅威については、別個に対応が検討されてきたが、本来は総合的に対応することが必要である。そこで本研究では、以下のプロセスを実現するための評価手法を開発する。

(1) 都市やそれを構成する街区の単位で、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）<sup>12)</sup>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化が予想される自然災害へのレジリエンス（Resilience）<sup>3456)</sup>の2側面の評価体系をつくり、それを一般の都市に適用可能な評価システム<sup>7)</sup>に組み上げる。

(2) システムを用いて、立地・交通関係施策と、エネルギー・環境関係施策を、都市更新の進展に合わせて同時に行うことで、中長期的に都市の Sustainability や Resilience 向上に資する施策実施ロードマップを見出せるようにする。

(3) システムを実際の都市へ適用し、各種施策による気候変動の緩和・適応を含む様々な効果をを検討することで、地球温暖化対策推進法の地方公共団体実行計画（区域施策編）や関連計画の策定・実施に活用する。

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

### 3-1. システムの概略

システムの全体構成を図-1 に示す。まず、コーホートモデルを用いて、インフラ・建築物や人口・年齢・世帯構成の変化を予測・推計し、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・空間的に予測する。これらの推計・予測は 500m メッシュや町丁目単位で行い、各地区の更新・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ようにする。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。

### 3-2. Sustainability 評価

Sustainability の指標として、SDGs を参考にしつつ、先行研究<sup>12)</sup>に基づき、定量予測可能な経済・社会・環境の TBL を意識した指標群に絞り込む。経済指標は、都市のインフラ・建築物の維持・更新コスト、及び主な生活サービスのコストを取り上げる。社会指標は、年代・性別の生活の質(Quality Of Life: QOL)<sup>89)</sup>に基づく地域の住みやすさを、環境指標では、家庭・業務・交通部門において CO<sub>2</sub>排出量を推計する。

### 3-3. Resilience 評価

Resilience の評価は、先行研究<sup>3456)</sup>とコーホートモデルによる将来人口やハザードマップ等により災害の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、持病の悪化による2次被害（間接被害）を1日ごとに予測・算出し、約 30~60 日の短期回復過程の推計によって評価する。

### 3-4. 総合評価

最後に、社会・環境・経済指標の TBL 推計結果から得られる環境効率や費用効率の値と、QALY と DALY 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を用いて、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。

## 4. ケーススタディ：実都市・地域への適用

### 4-1. 対象地域および使用データ

本研究では、システムの適用対象地域として、徳島市及びその周辺市町からなる徳島東部の都市圏を選定した

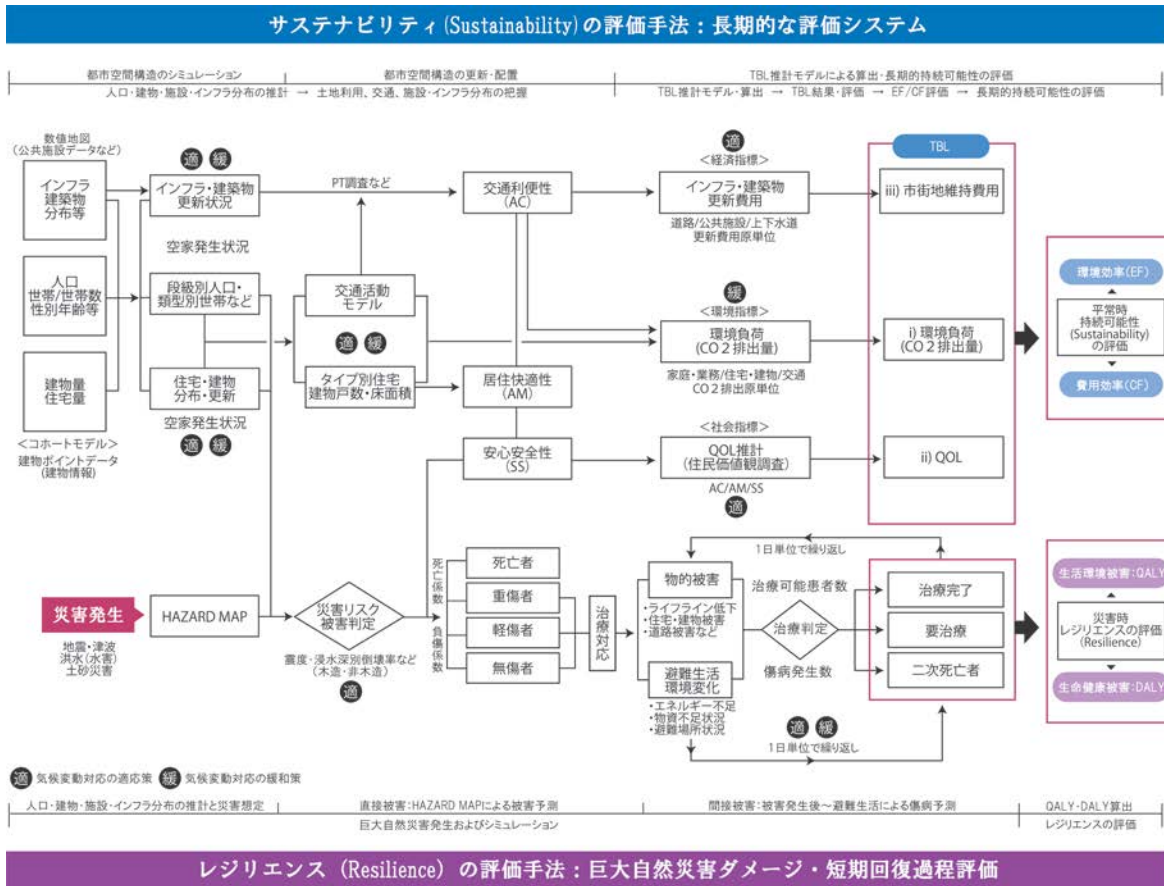


図-1 システムの全体構成

(図-2) . この地域は、面積753.42km<sup>2</sup>、人口562,840人(2010年)であり、徳島県全体の2割弱の面積に約7割の人口が集中する。対象地域の近年の人口変化傾向として、吉野川北部の北島町、藍住町は郊外化とともに人口が増加し、徳島市や鳴門市などのベッドタウン化が進んでいる。それ以外の市町は中心市街地を含め人口減少が続いている。藍住町以外が徳島東部都市計画区域に指定されており、市町の中心部に市街化区域が指定されている。藍住町は、全域が藍住都市計画区域に指定されており、未線引きとなっている<sup>10)</sup>。

対象地域は、南海トラフ巨大地震発生時に震度7もしくは6強が想定されており、沿岸域では津波が予測されている。吉野川河口部の沖積地帯に広がっていることもあり、平野部が多く、中小規模の河川がいくつも存在し、液状化や地盤沈下の危険性も予測されている。さらに、古来より洪水被害が多い地域であり、台風が来襲するたびに浸水が発生している。

本研究では、平常時のQOLとCO<sub>2</sub>排出量の算出を行う。災害時には、「南海トラフ巨大地震」を想定し、1次被害(直接被害)及び余命指標を用いた生活環境被害と生命健康被害を推計する。そして、平常時と災害時の総合評価、及び気候変動に対応した施策の検討を行う。

推計に用いた建物・住宅などのデータは、建物情報と

国勢調査の人口情報を結合して開発された、秋山ら<sup>11)</sup>による非集計のマイクロ人口統計データである。平常時のSustainability指標は約500m四方に細分化した4次メッシュ、災害時のResilience指標は約250m四方に細分化した5次メッシュ単位で推計を行った。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マイクロレベルで分析するためである。

#### 4-2. 平常時の Sustainability の適用

##### (1) QOL指標の算出

平常時 QOL を規定する QOL 構成要素間の重み付けについては、アンケート調査結果から導出したものが既にいくつかあるが、今回は評価内容の拡大や、徳島県を含む他地域への適用を念頭に、改めて Web によるアンケート調査を実施した。スクリーニング調査で、8,834 サンプルから災害リスク有無、転居経験、転居予定についての回答を得た。この回答結果から、「転居予定者」として今後 10 年間に転居予定のあるサンプル、「転居経験者」として現在は転居予定のない過去 23 年間に転居したサンプルを抽出し、世帯属性、現住居属性、転居時の重視点、転居経験者の前住居属性など 35 項目の質問項目に対してスクリーニング調査を実施した。得られたデータから算出した重みを用いて、平常時 QOL 評価を実

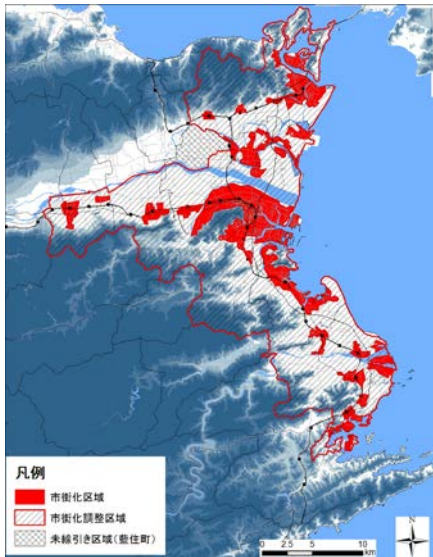


図-2 徳島東部都市圏の線引き状況

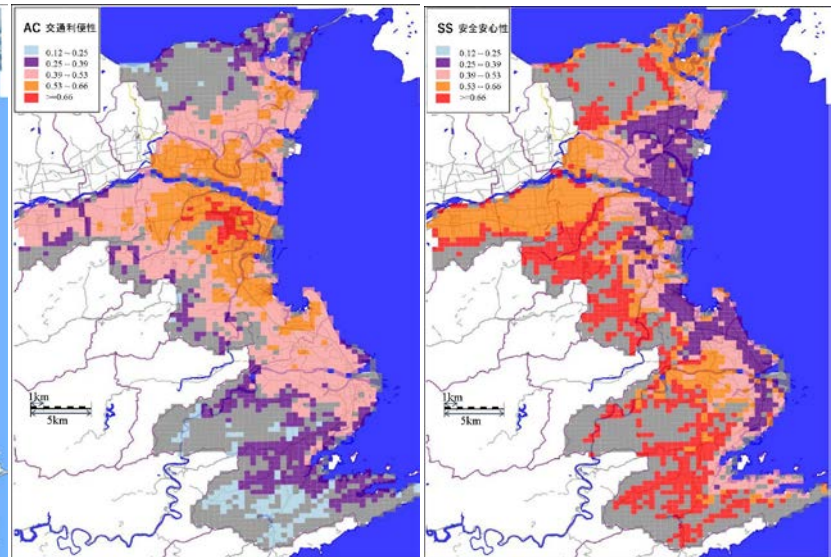


図-3 徳島県の平常時 QOL(交通利便性: AC (左), 安全安心性: SS (右))

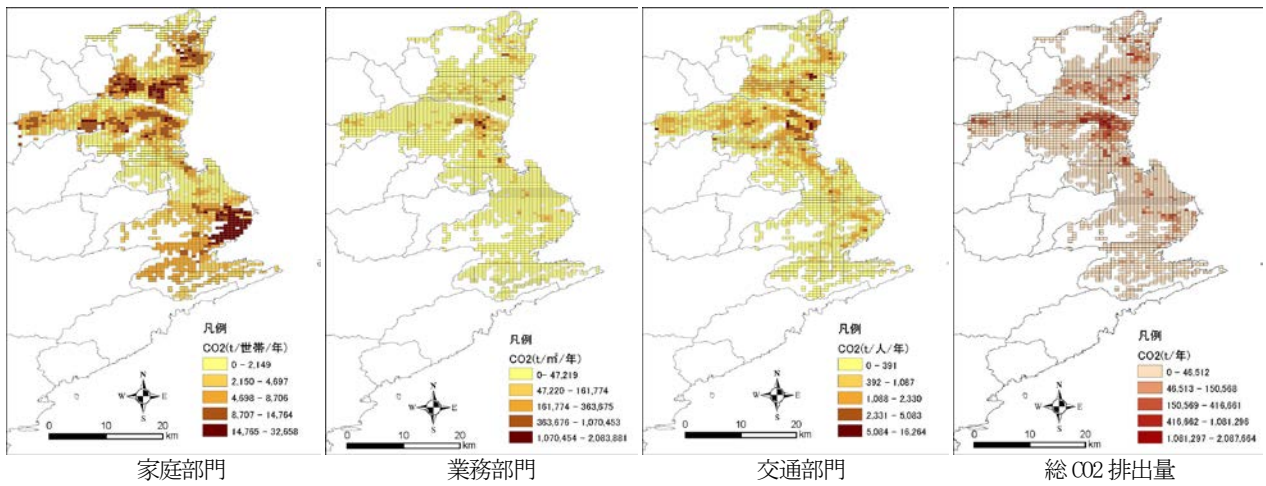


図-4 CO<sub>2</sub>排出量

施した。交通利便性(AC)及び安全安心性(SS)について推計した結果を図-3 に示す。AC は人口密度に応じて高くなる傾向にあり、中心となる沿岸部の徳島市街地が最も高い。

一方、SS が低いエリアは津波災害のリスクを抱えている沿岸部に見られ、高いエリアは交通利便性が低いエリアとほぼ重なっている。

以上より、交通利便性と安全安心性がトレードオフの関係にあることが明らかになった。

#### (2) CO<sub>2</sub>排出量の算出

各部門のCO<sub>2</sub>排出量の分布を図-4に示す。徳島市都心部の大規模な商業施設や業務施設が立地しているエリアで大きくなっており、その量は全体としても突出している。一方、家庭部門のCO<sub>2</sub>排出量は、都心部の駅周辺と郊外で大きな差異は現れていない。住居数が多い都心部と世帯数が多い郊外部ともに高くなっている。交通起源のCO<sub>2</sub>排出量は、都心部の駅周辺や吉野川北部の公共交通空白地域で大きい値を示している。また、鉄道沿線および都市圏辺縁部の道路でも比較的高くなっている。こ

れは鉄道と道路がほぼ同じ方向に整備されている徳島県の地理的特性や交通利便性を反映した結果であると考えられる。

#### 4-3. 災害時のResilienceの適用

##### (1) 1次被害(直接被害)の算出結果

地震動と津波による死傷者数を表-1 に示す。負傷を伴う被災者が14 万人を超えるという甚大な被害が発生する結果となった。地震動によるメッシュごとの死亡率は東高西低となっており、非常に強い揺れが予想されている東側平野部で大きな値となった。津波による被害は、沿岸北部では広い範囲で20~30%の死亡率となり、沿岸南部では被災範囲は狭かったものの死亡率は高い傾向にあった。中には、40%以上の死亡率となった地区もある。

##### (2) 2次被害(間接被害)の算出結果および考察

巨大災害発生後の人的被害の経時変化について、生活環境被害と生命健康被害に分け、徳島県全域を対象に算出した。

発災直後から 30 日後までのメッシュごとの QOL ステ

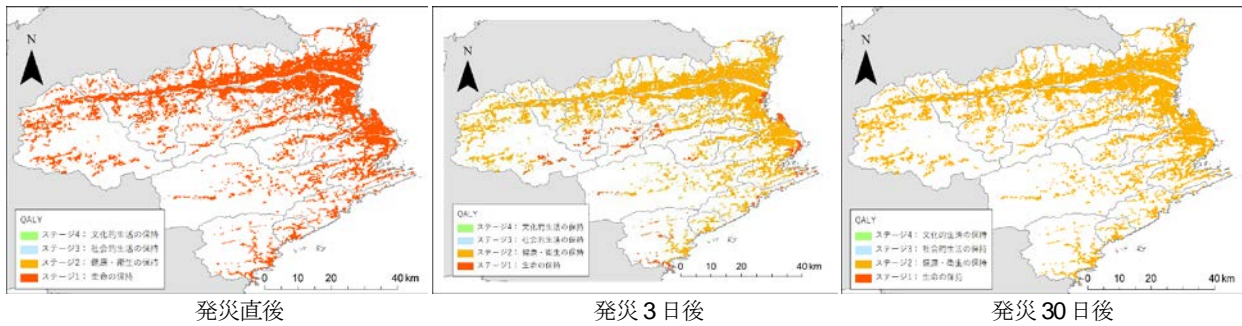


図-5 災害時の生活環境被害 (QALY) の推計結果

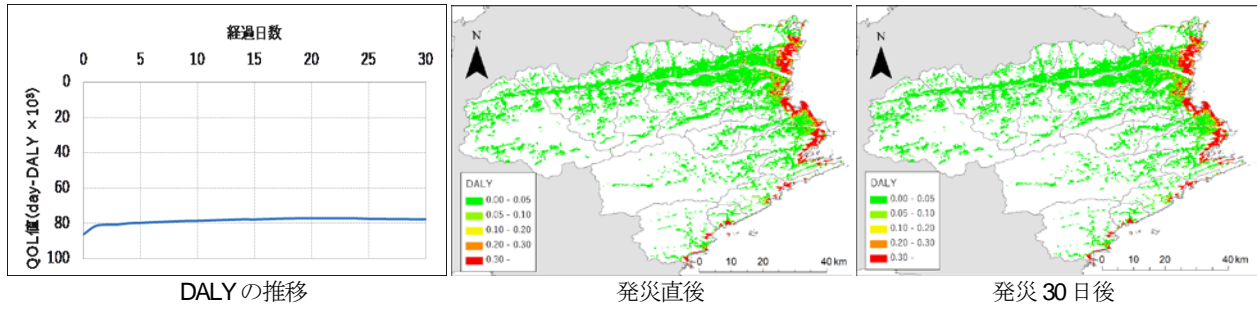


図-6 災害時の生命健康被害 (DALY) の推計結果

表-1 一次被害の推定結果 (人)

	地震動	津波	合計
者 (徳島県想定)	13,501 (3,900)	55,132 (26,900)	68,633 (30,800)
重傷者	6,380	4,320	10,700
軽傷者	57,421	8,324	65,745
合計	77,302	67,776	145,078

ージを図-5と図-6に示す。

生活環境被害 (QALY) の推計結果 (図-5) を見ると、発災 3 日後には内陸の山間部や津波被害の大きい一部地域を除いて、広い範囲がステージ 2 に移行している。その後、アクセスが困難な岬付近を除いてステージ 2 になるが、仮設住宅の供給や水道復旧が進まないため、発災 30 日後でも県全域でステージ 2 のままである。

生命健康被害 (DALY) の推計結果 (図-6) を見ると、沿岸部において値が大きくなった。震度や浸水深の分布と比較すると、地震動よりも津波の影響を受けていると考えられる。

DALY の時間推移と時系列分布を図-6 に示す。発災直後から次第に回復スピードが遅くなり、発災 20 日後からはほぼ横ばいになっている。発災直後の回復スピードが速い点については、徳島県の人口当たりの医師数が多いこと、次第に回復が遅くなった点については、水道復旧の遅れにより医療機能低下が続いていることが考えられる。また、DALY 分布の時間変化については、地区間でほとんど違いが見られなかった。これは、DALY 値に対する死者数の影響が支配的であることが原因である。

## 5. 気候変動に対応した自治体の計画策定における施策評価手法の提案

本研究では、自治体が自ら気候変動緩和策と適応策を同時に検討できる、実用的な評価モデルシステムの開発を目指している。既存都市の評価が可能となるよう、一般に入手しやすいデータを用いることを基本としている。

緩和策としての立地・交通施策は、地球温暖化対策推進法の地方公共団体実行計画 (区域施策編) において挙げることができるが、具体的な効果を評価する手法が確立されていないことや、これら施策を実際に推進する計画である立地適正化計画や地域公共交通網形成計画の策定において CO<sub>2</sub>削減効果がほとんど考慮されていない現状から、施策を書き込むことが困難であった。

本研究のシステムを活用することで、これらの計画を一体的に評価し整合をとった形で策定できる。特に、本システムの各出力指標については、現状はもとより、将来にわたっての変化を予測でき、それに起因する家庭・住宅・交通部門における CO<sub>2</sub>排出量の推計が可能となり、削減に向けた対策計画の立案や検討に活用できる。また、建築物の更新や空家発生状況の経年的・空間的な予測を行うことで、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。

気候変動による海面上昇や津波浸水深、洪水の変化予測結果を用いることによって、被害増加量を推計することができる。これらによって、立地変更策および危険地域からの撤退勧告や安全な場所への誘導、また、建築物 (避難所) ・インフラの整備等による影響を推計するモ

デルを適用し、巨大自然災害に対する被害率の予測を行うことが可能となる。さらに、孤立状況の中でエネルギーや電力供給がどの程度阻害され、生活水準が低下するかも推計することができる。

以上のように、本研究で開発している都市におけ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) の評価システムは、地域特性を考慮した個々の要素技術導入の寄せ集めだけでなく、地域主体での空間構造変更策の立案や検討等、「再生可能都市」実現に向けた土地利用の政策メニューを同時に活用できるツールとして、気候変動に対する適応及び緩和策を示唆する。

## 6. 結論及び今後の進め方

本研究で開発している検討手法は、「再生可能都市」の実現に向け、空間構造変更を含む様々な政策メニューを同時に検討でき、気候変動に対する適応及び緩和策を提示する。また、立地・交通施策実施に伴う CO<sub>2</sub>・エネルギー削減効果はもとより、QOL 向上やコスト削減といったコベネフィットの評価も可能であり、コンパクト+ネットワークの推進を強力に支援することができる。

今後は、コーホートモデルを用いて、インフラ・建築物や住居の年齢・世帯構成、建築物更新と空家発生状況の経年的・空間的な将来予測へ展開する。また、非常時における災害危険地域からの撤退や親類の近居による絆の維持と災害リスク分散の両立、インフラ維持コストといった施策の評価を試み、「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変化をどのように進めていくべきかについて分析・考察することを目指す。

**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ナヤカに対応するために—」の成果の一部である。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 猪原暁, 渡邊啓太, 杉本賢二, 加藤博和, 林良嗣: 巨大自然災害発生後の生存・生活環境変化に基づく地域のレジリエンス性評価, 土木学会論文集 D3, 土木計画学, 72(5), 283-291, 2016
- 5) 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, Vol.47, 2014
- 6) 山下雄大, 杉本賢二, 加藤博和, 林良嗣: 余命指標を用いた巨大地震による人的被害の評価, 日本環境共生学会第 18 回 (2015 年度) 学術大会発表論文集, 2015
- 7) 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 (CD-ROM), 2018
- 8) 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
- 9) 戸川卓哉, 加藤博和, 林良嗣, 森田紘圭, 河村幸宏: CO<sub>2</sub>排出量・市街地維持費用・QOL の 3 指標による集約型都市構造の評価, 地球環境, Vol.22, No.2, 121-129, 2017
- 10) 渡辺公次郎, 山中英生, 奥嶋政嗣: 徳島都市圏における総合的な災害リスク評価に関する研究, 第 57 回土木計画学研究・講演集 (CD-ROM), 2018
- 11) 秋山祐樹, 小川芳樹, 仙石裕明, 柴崎亮介, 加藤孝明: 大規模地震時における国土スケールの災害リスク・地域災害対応力評価のためのマイクロな空間データの基盤整備, 第 47 回土木計画学研究・講演集 (CD-ROM), 2013 (2018. 7.31)

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

Suil PARK, Hirokazu KATO, Hiromu SHIMIZU, Yuuki OONO,  
Yoshiharu ISHIKAWA, Hideo YAMANAKA, Masashi OKUSHIMA,  
Kojiro WATANABE, Kazuhisa IWAKA, Yuuki AKIYAMA

In order to shift Japanese cities which can overcome future climate change, this paper aims to propose a method for planning and implementing a strategy by local community. This method includes renewal process of buildings and infrastructure. Mitigation and adaptation measures to climate change are intended to be implemented at the timing of renewal. Strategy to shift will be gradually progressed in a long term.

In this research, we construct the evaluation model system of the long-term sustainability that integrates each aspect of the Triple Bottom Line consisting (Environment, Society, and Economy) in cities and city blocks, and resilience natural disasters in the recovery process and apply in to the real city. This system can provide location and transport measures and energy, environment related measures at the same time as urban renewal process, it is assembled into an evaluation system applicable to general cities, and indicates a roadmap for implementing policies contributing to the improvement of long-term urban sustainability and resilience plan. Also, it provides that can be used for the formulation and implementation of local government for mitigation and adaptation of global warning.