

# 東京都市圏の気候変動緩和・適応策の相互作用 に関する土地利用シナリオ分析評価

山形 与志樹<sup>1</sup>・中道 久美子<sup>2</sup>・瀬谷 創<sup>3</sup>

<sup>1</sup>非会員 国立環境研究所 地球環境研究センター (〒305-8506 つくば市小野川16-2)

E-mail: yamagata@nies.go.jp

<sup>2</sup>正会員 東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail: nakamichi@ide.titech.ac.jp

<sup>3</sup>学生会員 国立環境研究所 地球環境研究センター (〒305-8506 つくば市小野川16-2)

E-mail: seya.hajime@nies.go.jp

今後の地球温暖化による台風の大規模化等に伴って、特に資産の集中する大都市圏での水災規模が拡大する可能性が高く、気候変動影響への適応策と緩和策を同時に検討することが急務となっている。本研究では、東京都市圏を対象に、土地利用規制による緩和策（都市集約化）、適応策（水害リスク低減）とともに、PV・EV導入による緩和策を想定したシナリオ分析に基づき、家計最終需要に伴うCO<sub>2</sub>排出量を直接・間接の両面から地区単位で定量的に評価した。分析の結果、土地利用規制としての緩和策と適応策はシナジー効果が得られる可能性があるが、PV・EV導入の緩和策を加えた場合には、緩和策と適応策はむしろトレードオフの関係になる可能性があり、その両立の方策を検討することが重要であることが示された。

**Key Words :** Climate change, mitigation, adaptation, Megacity, land use scenario,

## 1. はじめに

昨今頻発している異常気象の原因ともなっている気候変動が、今後さらに深刻化して行くことが科学的に予想されている中、大都市（Megacity）における水害リスクに対する脆弱性の克服と、気候変動に対する緩和・適応策を同時に進めていくことが喫緊の課題となっている。現状では、残念ながら、地球規模で有効な緩和策（CO<sub>2</sub>削減）の実施に目処がついていない状況であり、産業革命以前に比べて今世紀中に平均気温が4℃程度上昇する気候変動影響に備える必要が議論され始めている。

今後さらに大規模化する台風などによる集中豪雨等の異常気象が海面上昇（さらには津波）が重複発生した場合、これまでの都市計画では対処に限界があるため、水災頻度・規模変化などのリスク特性と、土地利用変化をはじめとする社会システムの脆弱性について予測・評価を実施し、大都市圏における気候変動影響への緩和・適応策のシナジーとトレードオフを検討することが急務となっている。

都市計画の分野では、国際的には、Auckland Sustainability Framework<sup>1)</sup>、"Future Megacities" ProgrammeのMegacity

Research Project TP. Ho Chi Minh<sup>2)</sup>、Suburban Neighbourhood Adaptation to Changing Climate (SNACC)<sup>3)</sup>等のプロジェクトにおいて適応策が検討されている。特に水害に関しては、個々の建築物の浸水被害対策を行うのみでなく、土地利用計画と連携させることで水害対策を強化する地域と低度利用に留める地域との区別を意図的に導入し、緩和策と適応策を両立できる可能性が検討されている。実務的事例として、スイスでは浸水の危険度に応じた土地利用規制が行われており、この方式は、ドイツ・ザクセン州、ニカラグア、エクアドル、チェコでも採用されている。日本でも名古屋市等で水害危険区域指定と建築物規制が行われている<sup>4)</sup>が、緩和策、特にコンパクトシティのような土地利用施策との連携の視点は入っていない。特に、東京都市圏では、人口・資産が集中し、東京、神奈川、千葉のみでも世帯数は全国の2割以上を占めている。大都市圏の特に沿岸部では、海拔0m地帯にも、近年、多くの住宅や事業所が立地し、洪水、高潮、さらには津波などによる被害が発生し大きくなることが想定される。

このような状況において、土地利用政策による水害リスク管理に関する定量的分析として、地方都市を対象に、水害リスクの高い地区から撤退し都市コンパクト化を進

めた場合の自動車燃料消費量の削減効果が算出されている<sup>9)</sup>。都市のコンパクト化によって、自動車による燃料消費量やCO<sub>2</sub>排出量だけでなく、その他のエネルギー利用に係るCO<sub>2</sub>排出量も削減できる可能性がある。またこの際、緩和策の評価で用いるCO<sub>2</sub>排出量に関しては、1) エネルギー転換や製造・運輸等に伴う排出量を排出場所に割り付けた直接排出量と、2) エネルギーや製造物等使用するユーザー（家計等の最終需要）に、それぞれの消費量に応じて割り付けた間接排出量の2つの概念があり、エネルギーの消費者の責任や対策の観点からは、間接排出量の概念も重要であるため本研究では2つの観点から評価を実施することとした。

また、東日本大震災後の現在は、気候変動緩和策としての視点以上に、電力需給調整への関心の高まりもあり、太陽光発電（photovoltaic, PV）や、電気自動車（Electric vehicle, EV）の大規模な導入・普及がもたらすCO<sub>2</sub>削減効果と節電効果も推計することが重要となっている。

このような背景を踏まえ、本研究では、東京都市圏を対象に、土地利用規制（コンパクト化）における緩和策（CO<sub>2</sub>削減）、適応策（水害リスクの軽減）とともに、PV、EV導入による緩和策を想定した2050年のシナリオ分析に基づき、町丁目単位で家計最終需要に伴う直接CO<sub>2</sub>排出量・間接CO<sub>2</sub>排出量の両面から定量的に評価することを目的とする。

## 2. 使用データと分析方法

### (1) CO<sub>2</sub>排出量の推計方法

家計支出に関する統計として、本研究では2005年の家計調査のデータを利用した。これは毎年行われている全国規模の調査であり、世帯ごとに1世帯当たり1か月ごとの品目別の収支金額が年間にわたって調査されている。

この品目別の家計消費支出額から間接CO<sub>2</sub>排出量を算出するため、2005年の3EIDデータ<sup>1)</sup>を対応させた。3EIDは産業連関表を利用した環境負荷原単位を収録したもので、本研究では購入者価格ベースの原単位を利用した。

家計調査と3EIDは品目の分類が異なるため、それらを独自に対応させ、表-1のような品目分類、品目数について、間接CO<sub>2</sub>排出量を算出することとした。家計調査項目の支出額ごとの対応する3EID項目のCO<sub>2</sub>排出原単位を乗じて、支出額ベースの間接CO<sub>2</sub>排出量を算出し、式(1)を用いて町丁目単位で推計した。直接CO<sub>2</sub>排出量については、3EID記載の原燃料種別の家計消費支出部門でのCO<sub>2</sub>排出原単位を用いて計算した。

$$CE_i = \sum_i H_i [\sum_k E_{ik} (ic_{ik} + dc_{ik})] \quad (1)$$

$CE_i$ : 地区*i*における合計 CO<sub>2</sub> 排出量 (kg-CO<sub>2</sub>/year)

$H_i$ : 地区*i*の世帯数

表-1 排出量推計における各分類ごとの品目数

| 分類             | 品目数  |      |
|----------------|------|------|
|                | 直接排出 | 間接排出 |
| 食料             |      |      |
| 穀類             | 6    |      |
| 魚介類            | 5    |      |
| 肉類             | 6    |      |
| 乳卵類            | 3    |      |
| 野菜・海藻          | 9    |      |
| 果物             | 1    |      |
| 油脂・調味料         | 2    |      |
| 菓子類            | 1    |      |
| 調理食品           | 13   |      |
| 飲料             | 3    |      |
| 酒類             | 4    |      |
| 外食             | 12   |      |
| 賄い費            | 1    |      |
| 住居             | 2    |      |
| 光熱・水道          | 6    | 3    |
| 電気             | (1)  |      |
| 都市ガス           | (1)  | (1)  |
| プロパンガス         | (1)  | (1)  |
| 灯油             | (1)  | (1)  |
| 上下水道料          | (1)  |      |
| その他            | (1)  |      |
| 家具・家事用品        | 31   |      |
| 被服及び履物         | 8    |      |
| 保健医療           | 8    |      |
| 交通・通信          |      |      |
| 公共交通           | 10   |      |
| 自動車等<br>(ガソリン) | 13   | 1    |
| 通信             | (1)  | (1)  |
| 教育             | 6    |      |
| 教養娯楽           | 12   |      |
| その他            | 47   |      |
|                | 27   |      |

( ): 内訳

$E_{ik}$ : 地区*i*の品目*k*の世帯每家計消費支出(円/year)

$ic_{ik}$ : 品目*k*の間接 CO<sub>2</sub> 排出原単位(kg-CO<sub>2</sub>/円)

$dc_{ik}$ : 品目*k*の直接 CO<sub>2</sub> 排出原単位(kg-CO<sub>2</sub>/円)

### (2) 土地利用モデル

将来の電力需要・PV供給可能量、CO<sub>2</sub>排出量をシミュレーションするために、建物床・土地・人口の分布を同時に算出できる、土地利用モデル（住宅立地モデル）を構築した。モデルの概要を図-1に示す。モデルは、家計、土地供給者、ディベロッパーの行動モデルであり、3主体はそれぞれ効用最大化、利潤最大化、利潤最大化行動をとる。

市場としては、建物市場と土地市場を考慮しており、

モデル構造は宮城ら (2010)<sup>7)</sup> と同様であるが、本研究のモデルは東京都市圏町丁目単位で構築した立地モデルであるため、交通モデルは組み込まれていない。東京都市圏の町丁目数は22603となっている。

建物市場で最適な賃料が決定されると、その賃料を反映した間接効用関数と地域固有変数（容積率、最寄駅距離、ゾーン面積の自然対数、平均標高、平均傾斜、地震リスク（30年以内に震度6弱の地震が発生する確率）、後述する液状化ポテンシャル、小売販売額）を誘因としてロジットモデルを用いた立地選択が行われる。入力データ、効用関数の関数形等の詳細については、本稿の趣旨からはずれするため詳細は省略することとする。これについてはYamagata and Seya (2012)<sup>8)</sup>を参照されたい。

### 3. シナリオの設定

2050年を想定し、以下の土地利用シナリオ、PV・EV導入シナリオを組み合わせ、土地利用モデルを用いて分析を行った。将来の人口減少を考慮するため、国立社会保障・人口問題研究所の予測<sup>9)</sup>を参考に2050年の東京都市圏の人口を予測した。

#### (1) 土地利用シナリオ

##### a) なりゆきシナリオ (BAU)

2050年も現状のまま郊外開発が継続した場合を想定する。

##### b) 緩和シナリオ (Mit.)

駅から250m未満の地区への居住者に年10万円の補助金を導入することで、都心と駅周辺への居住を促進するとともに、駅から500m以上の地区では、土地供給可能面積（市街化区域等）を50%削減することで、郊外は立地抑制を行う。都市コンパクト化施策の導入によって、駅から250m未満の地区の居住者は自動車利用が抑制される。

##### c) 適応シナリオ (Ad.)

水害リスクが高い地域で土地供給面積（市街化区域）を半分にする。具体的には、若松ら<sup>10)</sup>の方法に基づいて液状化リスク（0:なし、1:小、2:中、3:大）を計算し（図-2）、2、3の土地供給面積を半分にした。

##### d) 緩和+適応シナリオ (Mit.+Ad.)

上述の緩和シナリオと適応シナリオをともに行う場合を想定した。

#### (2) PV・EV導入シナリオ

EVが普及し、ガソリン乗用車がEVに置き換わる場合を想定した。EVを購入した世帯では、ガソリン購入による間接排出量・直接排出量がなくなり、充電時の電気

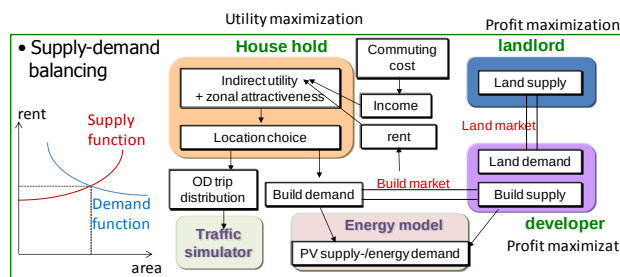


図-1 土地利用モデルの概要

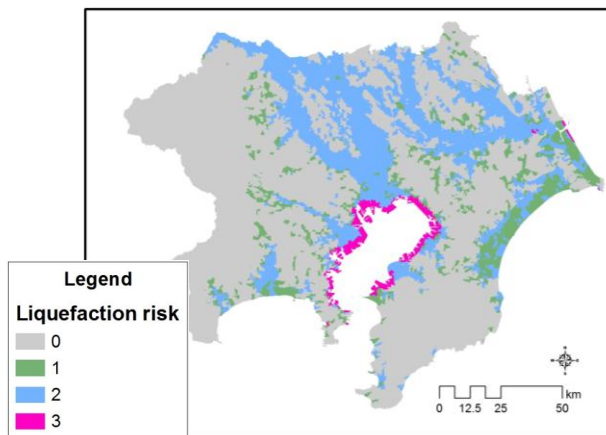


図-2 液状化リスク計算結果

表-2 ガソリン自動車とEVのCO<sub>2</sub>排出量の比較

| 車種          | CO <sub>2</sub> 排出量(gCO <sub>2</sub> /km) |
|-------------|-------------------------------------------|
| ガソリン車       | 136.0 注1                                  |
| EV (Lief)   | 62.1 注2                                   |
| EV (i-MiEV) | 55.1 注3                                   |

注1: 平均燃費: 17.0km/L (国土交通省資料<sup>12)</sup>を参考に算出)

注2: 交流電力量消費率: 124Wh/km<sup>13)</sup>

注3: 交流電力量消費率: 110Wh/km<sup>14)</sup>

(JC08 mode)

表-3 PV・EV普及率シナリオ

| 普及率シナリオ | EV 普及率(%) | PV 普及率(%) |
|---------|-----------|-----------|
| i       | 100       | 100       |
| ii      | 50        | 50        |
| iii     | 100       | 50        |
| iv      | 100       | 30        |

代による間接排出量が増加する（表-2）。

PVについては、一戸建ての屋根にパネルを設置し、電力を賄う場合を想定した。式(2)、(3)によってPVによる発電量を計算し、PV発電分の電力を節約できたと考えた。PV算出量は横井ら(2010)<sup>11)</sup>の方法を用いて求めた。

ただし、PV設置面積は、土地利用モデルから内生的に算出される土地面積×建蔽率で仮想的な建物1階面積を計算し、それに設置率（0.3）×1/cos30°として算出した。

EV、PVを導入しないシナリオを「1」、導入したシナリオを「2」とし、EV、PVの普及率については、比較のため表-3の4つのシナリオで計算を行った。

#### 4. 分析結果と考察

土地利用モデルを用い、設定した土地利用シナリオに基づいて各パラメータを算出した結果、人口分布は図-3、図-4、図-5のようになった。分析結果として、合計CO<sub>2</sub>排出量（直接CO<sub>2</sub>排出量と間接CO<sub>2</sub>排出量を合計した値）の空間分布について、まず、比較のベースとなるBAU1を図-6に示す。結果の一例として、EV普及率100%、PV普及率50%としたBAU2-iii、Mit2-iii、Ad2-iii、Mit+Ad2-iiiの場合の合計CO<sub>2</sub>排出量の分布を、それぞれ図-7、図-8、図-9、図-10に示す。また、東京都市圏全体の直接CO<sub>2</sub>排出量・間接CO<sub>2</sub>排出量を図-11に示す。

PV・EV導入あり（シナリオ2）の場合、EV導入によりガソリンによる直接・間接排出量が減少するが、その代わりに、EV充電時の電力利用による間接排出量が増加する。PV導入では、世帯の生活に係る電力需要の一部あるいは全部をPV発電分で賄える（今まで電力会社の電力を使っていた分を節約できる）ため、電力利用による間接排出量が減少することになる。

PV・EV導入なし（1）の場合、BAUでも、東京都市圏全体の人口減少に伴いCO<sub>2</sub>排出量が削減される。そして、緩和（Mit）、適応（Ad）、緩和+適応（Mit+Ad）ともに、BAUよりもさらにCO<sub>2</sub>排出量が削減されることがわかる。緩和と適応を比較すると緩和のほうが削減率は高いが、緩和+適応を同時に行うことで、僅かながら緩和シナリオ単独よりも高いCO<sub>2</sub>排出量削減効果が得られることがわかった。

PV・EV導入あり（2）の場合、緩和の場合はBAUよりもCO<sub>2</sub>排出量が削減されるが、適応の場合はBAUよりもCO<sub>2</sub>排出量が多くなり、緩和+適応でもBAUよりもCO<sub>2</sub>排出量が多くなる、という結果が得られた。これは、水害リスクの高い地域で市街化区域面積を縮退（半分に）させているため、結果として、土地面積が減って、かつ戸建て住宅が減り、それに伴ってPV発電可能量が減り、CO<sub>2</sub>排出量が増えたためである。緩和策と適応策の両立の方策を考えていく必要がある。

#### 5. おわりに

本研究では、大都市圏を対象に、都市集約化やPV・EV導入による緩和策、土地利用規制における水害リスクへの適応策を想定したシナリオ分析を行い、家計最終需要に伴う直接排出量・間接排出量の両面から、町丁目単位で定量的評価を行った。

その結果、CO<sub>2</sub>排出量削減の観点からは、土地利用規制としての緩和策と適応策はシナジー効果が得られる可

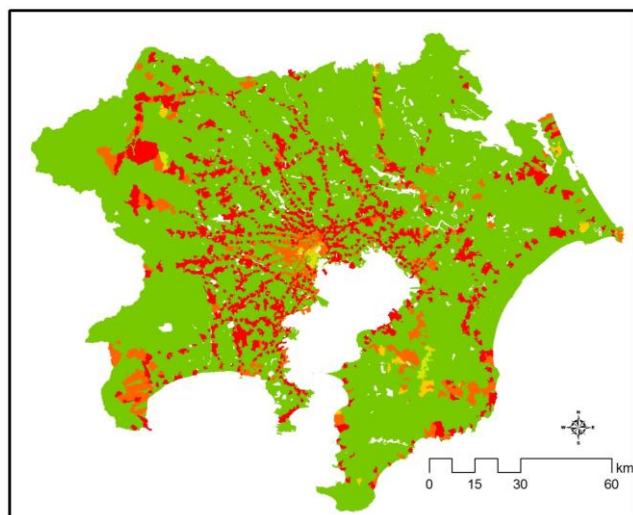


図-3 人口分布の比較（Mit/BAU）

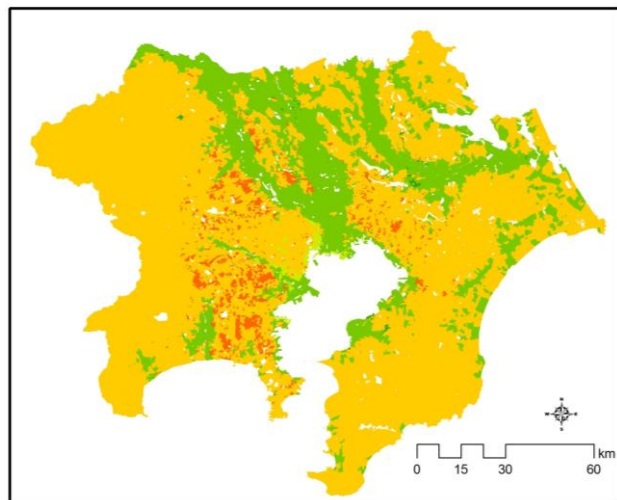


図-4 人口分布の比較（Ad/BAU）

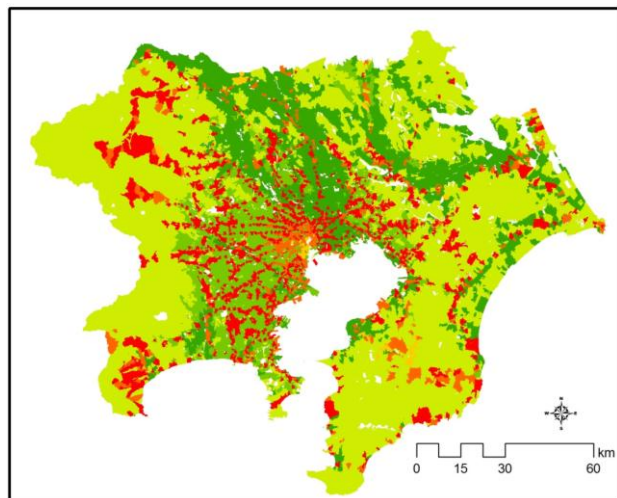
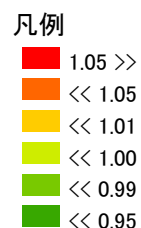


図-5 人口分布の比較（Mit+Ad/BAU）





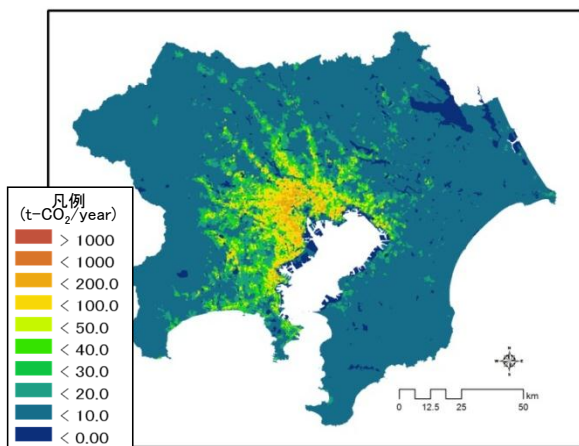


図-6 合計CO<sub>2</sub>排出量の空間分布  
(BAU1：なりゆきシナリオ, PV・EV導入なし)

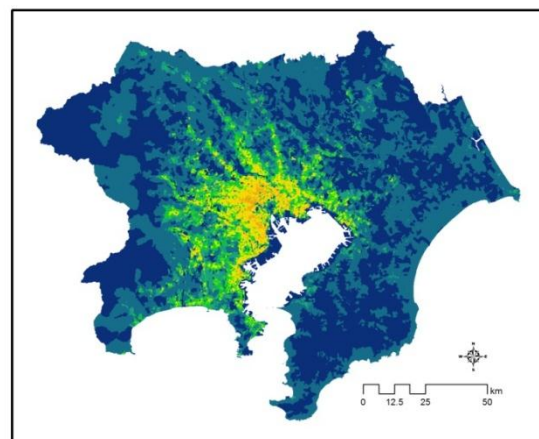


図-9 合計CO<sub>2</sub>排出量の空間分布  
(Ad2-iii：適応シナリオ, PV・EV導入あり,  
EV普及率100%, PV普及率50%)

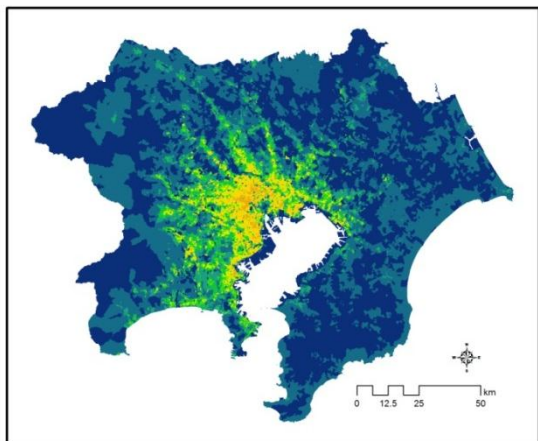


図-7 合計CO<sub>2</sub>排出量の空間分布  
(BAU2-iii：なりゆきシナリオ, PV・EV導入あり,  
EV普及率100%, PV普及率50%)

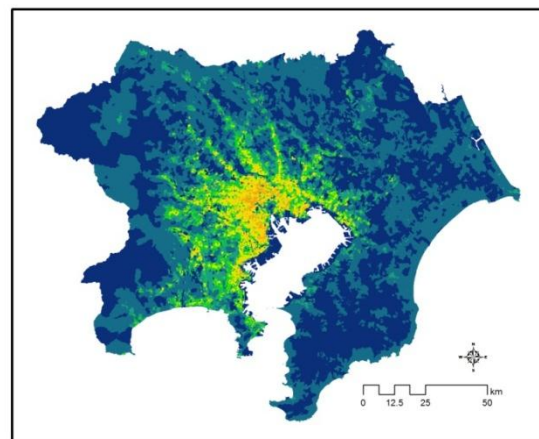


図-10 合計CO<sub>2</sub>排出量の空間分布  
(Mit+Ad2-iii：緩和+適応シナリオ, PV・EV導入あり,  
EV普及率100%, PV普及率50%)

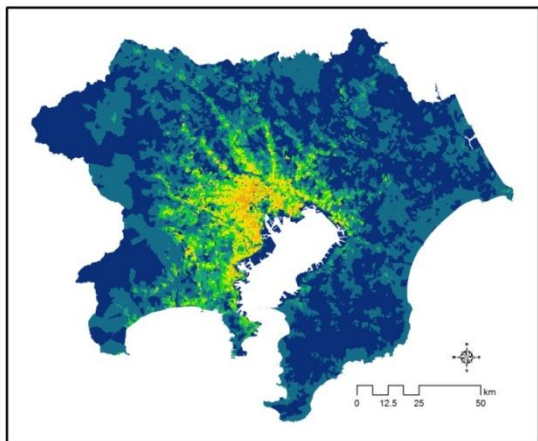


図-8 合計CO<sub>2</sub>排出量の空間分布  
(Mit2-iii：緩和シナリオ, PV・EV導入あり,  
EV普及率100%, PV普及率50%)

能性があるが、PV・EV導入という意味での緩和策を加えた場合には、PVの導入方法次第では、緩和策と適応策はむしろトレードオフの関係になる可能性が高いことが示された。今後は、縮退による土地面積の余剰分をメガソーラーに振り分けることや、集合住宅でのPV普及の推進等により、緩和策と適応策を両立させる方策を考

えていく必要がある。

また、時間変化、生活時間帯の異なる世帯間の電力融通<sup>15)</sup>、EVの蓄電池利用、QOLの観点から都市全体で総合的に評価することが重要である。また、シナリオを実際の政策として現実化していくためには、各シナリオをコストベネフィットの観点から比較検討することも重要であるが、そのためには広域においてハザードマップ等のより詳細な水害リスク情報が必要となる。これについては今後の課題としたい。

謝辞：本研究は、文部科学省の気候変動適応戦略イニシアチブプロジェクトの助成を受けて実施した。

#### 参考文献

- 1) Auckland Sustainability Framework: <http://www.arc.govt.nz/auckland/sustainability/auckland-sustainability-framework.cfm>, 2012.08.02 閲覧.

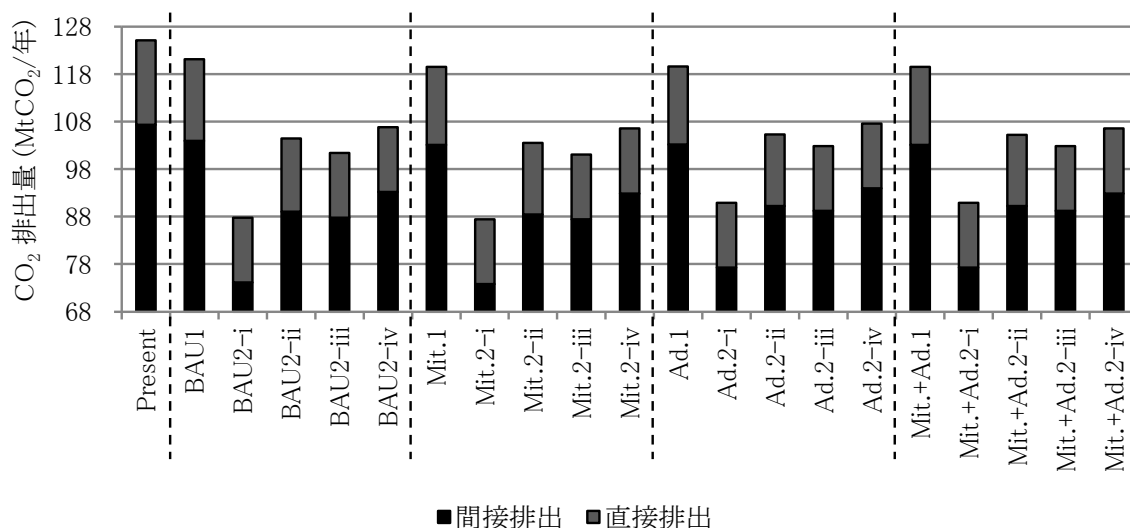


図-11 分析結果（直接CO<sub>2</sub>排出量，間接CO<sub>2</sub>排出量の比較）

- 2) Megacity Research Project TP. Ho Chi Minh: <http://www.tu-cottbus.de/fakultaet2/de/stadtplanung-und-raumgestaltung/lsg-forschung/forschung-laufend/bmbf-programm-future-megacities-megacity-research-project-tp-ho-chi-minh.html>, 2012.08.02 閲覧.
- 3) Suburban Neighbourhood Adaptation to Changing Climate (SNACC): <http://www.bne.uwe.ac.uk/cep/snacc/>, 2012.08.02 閲覧.
- 4) 内閣府: 第5回大規模水害対策に関する専門調査会資料, 2007, [http://www.mlit.go.jp/river/basic\\_info/jigyo\\_keikaku/gaiyou/kikouhendou/pdf/toshinref.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/kikouhendou/pdf/toshinref.pdf), 2012.08.02 閲覧.
- 5) 谷口守, 松中亮治, 中道久美子: SLIM CITY を用いた都市コンパクト化政策と水害軽減方策の連携に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.22, No.1, pp.171-176, 2005.
- 6) 南齋則介, 森口祐一, 東野達: 産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID), <http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/index-j.html>, 国立環境研究所, 2005.
- 7) 宮城卓也, 堤盛人, 山崎清: 開発者行動を考慮した応用都市経済モデルの可能性, 土木計画学研究・講演集, Vol.41, CD-ROM, 講演番号 390, 2010.
- 8) Yamagata, Y., and Seya, H.: An integrated modelling for smart city: Toward efficient CO<sub>2</sub> management of EV transport using PV system, will be presented at the 19th ITS World Congress 2012, Austria, 22-26, 2012.
- 9) 国立社会保障・人口問題研究所: 日本の世帯数の将来推計（都道府県別推計）, <http://www.ipss.go.jp/pp-pjsetai/j/hpjp2009/t-page.asp>, 2009.
- 10) 若松加寿江, 松岡昌志, 杉浦正美, 久保純子, 長谷川浩一: 日本の地形・地盤デジタルマップ, 東京大学出版会, 2005.
- 11) 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およ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, 66 (1), 17-34, 2010.
- 12) 国土交通省: 自動車燃費一覧（平成24年3月）, [http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha\\_fr10\\_000014.html](http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr10_000014.html), 2012.08.02 閲覧.
- 13) 日産自動車: 日産リーフ主要諸元/環境仕様書, [http://ev.nissan.co.jp/LEAF/PDF/leaf\\_specification.pdf](http://ev.nissan.co.jp/LEAF/PDF/leaf_specification.pdf), 2012.08.02 閲覧.
- 14) 三菱自動車工業株式会社: 三菱 i-MiEV スペック概要, <http://www.mitsubishi-motors.co.jp/i-miev/>, 2012.08.02 閲覧.
- 15) 谷口守, 落合淳太: 住宅街区特性から見たスマートグリッド導入適性, 不動産学会誌, Vol.25, No.3, pp.100-109, 2011.

(2012.8.3 受付)

## EVALUATION OF LAND USE SCENARIOS FOR INTERACTION BETWEEN CLIMATE MITIGATION AND ADAPTATION MEASURES IN THE TOKYO METROPOLITAN AREA

Yoshiki YAMAGATA, Kumiko NAKAMICHI and Hajime SEYA