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のCO₂排出量評価

中道 久美子^{1,2}・山形 与志樹³・瀬谷 創⁴

¹正会員 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: nakamichi.kumiko@nies.go.jp

²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

³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

⁴正会員 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

我が国では、今後地球温暖化による台風の大規模化や集中豪雨の増加により、資産の集中する大都市圏での水災リスクの上昇が懸念されており、気候変動への適応策と気候変動の緩和策の両面からの対応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、太陽光発電(PV)・電気自動車(EV)の導入による緩和策を想定したシナリオに基づき、家計最終需要に伴うCO₂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コベネフィットが得られるが、PV・EVを導入するとトレードオフになる可能性があることが示された。ただし、PV・EVによる削減効果は大きく、緩和策と適応策を同時に進める意義は大きい。

Key Words : *climate change, mitigation, adaptation, megacity, land-use scenario*

1. はじめに

我が国では、今後地球温暖化による台風の大規模化や集中豪雨の増加（頻度・量）が予測されており¹⁾³⁾、水害リスクに対する脆弱性の克服と、気候変動への適応策と気候変動の緩和策の両面からの対応が喫緊の課題となっている。特に、様々な研究で緩和策・適応策のシナジーとトレードオフを考慮することの重要性が指摘されている⁴⁾⁸⁾。現状では、残念ながら、地球規模で有効な緩和策（CO₂排出量削減）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適応策の必要性が議論され始めている。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することが検討されている。本研究が対象とする東京都市圏には、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。特に沿岸部の海拔0m地帯にも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水害リスクに極めて脆弱である。

さて、緩和策の評価で用いるCO₂排出量に関しては、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CO₂排出量だけでなく、その他のエネルギー利用に係るCO₂排出量も削減できる可能性がある。この際、排出量には、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を使用するユーザー（家計等の最終需要者）に、それぞれの消費量に応じて割り付けた「間接排出量」という2つの概念がある。このうち、消費者責任の明確化・受益者負担（公平性）の観点からは、間接排出量の観点からの評価が重要であり、近年、間接排出量を明示的に考慮した研究が数多く行われている⁹⁾¹⁴⁾。

さらに、東日本大震災以降の電力分野への社会的関心の高まりや、分散型電源への政策転換（パラダイムシフ

ト)を受けて、太陽光発電 (photovoltaic, PV) や、電気自動車 (Electric vehicle, EV) の大規模な導入がもたらすCO₂削減効果を推計することも重要となっている。特に、EVは、中国のように電力のCO₂排出係数が高い国では、ガソリン車よりもCO₂排出量を増加させる可能性があるとの指摘もあり¹⁵⁾、低炭素化のためにはPVとセットで考える必要がある¹⁶⁾。最近では、現状の技術レベルにおいて街区レベルでスマート (マイクロ) グリッドの導入適性を評価した研究¹⁷⁾や、将来の技術革新がその導入適性に与える影響を分析した研究¹⁸⁾が行われている。また、横浜市を対象に、スマートグリッド導入による都市全体のCO₂削減効果を計測した研究¹⁹⁾もある。

以上のような背景を鑑みれば、気候変動への緩和・適応策検討においては、[i] 緩和と適応の相互作用 (コベネフィットやトレードオフ) とともに、[ii] 新技術の導入の影響を、都市圏全体で把握・比較しておく必要がある。したがって本研究では、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 (CO₂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CO₂排出量を、直接・間接の両面から定量的に評価することを目的とする。

2. 気候変動の緩和策と水害脆弱性に対する適応策の概略

まず気候変動影響への適応策全般に関して、都市計画の分野では、国際的には、Auckland Sustainability Framework²⁰⁾、"Future Megacities" ProgrammeのMegacity Research Project TP. Ho Chi Minh²¹⁾、Suburban Neighbourhood Adaptation to Changing Climate (SNACC)²²⁾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、水害への適応策としては、前述の個々の建築物の浸水被害対策とともに、堤防の設置、排水ポンプの設置等のハードウェア対策だけでなく、水害脆弱性の高い地域から低い地域への人々の移転を誘導してリスクを軽減する土地利用規制の導入という、ソフトウェア対策が考えられる。また、都市における気候変動の緩和策、特に温室効果ガスの中でも濃度が高く問題視されているCO₂排出量を削減する方策としては、例えば、1) 建物の建て替えを進め、それに併せて、屋根にPVパネルを設置する等して、未利用・再生可能エネルギーを活用し、それによって発電された電力をEVに活用するエネルギー施策、2) 排出されたCO₂を吸収する森林や公園等の緑地を保全し、建物の屋上・壁面緑化を進める吸収源対策、3) 都市の用途混合や職住近接を進めて、特に交通分野でのエネルギー消費量を抑制しCO₂排出量を削減する土地利用施策がある。

中でも、特に、3)の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する緩和策と適応策の両立が検討されつつある。まず適応策に関しては、海外での事例として、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いる。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。その他、イギリスやフランス、ニュージーランド等でも、災害リスクに応じた土地利用規制が行われている²³⁾⁻²⁶⁾。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が²⁷⁾⁻²⁹⁾、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。一方、我が国の自治体レベルでも、適応策策定の重要性が認識され始め³⁰⁾、自治体の適応策検討に資するための『適応策ガイドライン』の作成も行われている³¹⁾。

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を行った既往研究として、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を算出した例³²⁾、撤退・再集結地区の選定の一指標として災害安全性を取り入れて多面的に評価し、実際の地方都市に適用した例³³⁾、土地利用モデル (応用都市経済モデル) を用いて、土地利用規制や建築規制の経済評価を行った事例^{34), 35)}等がある。これらは、地方都市や、河川流域を扱ったものであるが、一方で、東京都市圏のように人口・資産が集中した広域な都市圏での評価もまた重要であろう。一方、海外では、Hamlin and Gurran (2009)³⁶⁾によって、米国と豪州を事例に、都市形状 (urban form) と、緩和・適応の関係性に関する定性的な議論が行われている。

本研究では、人口・資産の集中する東京都市圏を対象に、水害に脆弱な地域からの撤退という適応策と、コンパクトシティ政策のような土地利用計画の視点からの緩和策の連携を考慮する。さらに、新技術 (PV・EV) の導入という意味での緩和策も組み合わせ、それらの適応策と緩和策の相互作用 (コベネフィットやトレードオフ) を、排出責任を議論できる間接CO₂排出量の観点から定量的に評価する。

3. 使用データと分析方法

(1) CO₂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CO₂排出量を算出するため、2005年の3EIDデータ³⁷⁾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 CO₂排出量を算出することとした。具体的には、家計調査項目の支出額ごとに、対応する 3EID 項目の CO₂排出原単位を乗じて、支出額ベースの間接 CO₂排出量を算出し、町丁目単位で推計した。一方、直接 CO₂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 CO₂排出原単位を用いて計算した。それらを地区 $i(i=1, \dots, I)$ について集計すれば、都市圏全体の合計 CO₂排出量が次式のように得られる。

$$CE = \sum_i H_i \left[\sum_k E_{ik} (ic_k + dc_k) \right] \quad (1)$$

CE : 対象地域における合計 CO₂ 排出量 (kg-CO₂/year)

H_i : 地区 i の世帯数

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

ic_k : 品目 k の間接 CO₂ 排出原単位 (kg-CO₂/円)

dc_k : 品目 k の直接 CO₂ 排出原単位 (kg-CO₂/円)

(2) 土地利用モデル

将来の電力需要・PV供給可能量、CO₂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（不在地主）、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、モデル構造は堤ら³⁸⁾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おらず、従業者分布は固定された、簡易な住宅立地モデルとなっている。このモデルでは、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を誘因としてロジットモデルを用いた家計の立地選択が行われる。入力データ、効用関数の関数形、パラメータ推定値等の詳細については、本稿の趣旨からはずれるため詳細は省略することとする。これについてはYamagata et al. (2013)³⁹⁾を参照されたい。東京都市圏の町丁目数は22,603となっている。

直感的に予想されるとおり、このような大規模かつ詳細なゾーンにおける立地をモデルで説明することは容易ではない。本モデルにおいて、実データと予測値の相関係数でみた人口の再現性は、7世帯タイプごとにそれぞれ、高齢単身 (0.626)、若中年単身 (0.665)、高齢夫婦 (0.669)、若中年夫婦 (0.710)、夫婦＋子 (0.724)、片親＋子 (0.664)、そのほか (0.698) となった。モデルの再現性は必ずしも十分でないため、ここでは既往研究⁴⁰⁾同様、実

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	
	間接排出	直接排出
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	13	1
(ガソリン)	(1)	(1)
通信	6	
教育	12	
教養娯楽	47	
その他	27	

(): 内訳

図-1 土地利用モデルの概要

データを完全に再現するために定数項の導入によるバイアス補正を施している。このようなバイアス補正は将来気候予測分野では重要な技術とされ、知見が蓄積されているが、土地利用モデル分野での研究は皆無といってよ

い⁴¹⁾。したがって今後、方法論の開発が急務であるといえる。

さて、ここでは本モデルを用いて緩和・適応シナリオを構築する方法についてやや直感的に説明したい。本稿では、以下に詳述するように、緩和策として家計の駅前居住への補助金を、適応策としては災害リスクに基づく土地利用規制を想定している。まず、前者に関して、駅前居住に対する補助金により家計の所得が増加すると、建物床を含む財の購入可能量が増加するため、ゾーン居住者（家計）の効用が増大することとなる。それによって対象ゾーンへの立地量が、各市場が均衡するまで増加する（ただし、交通混雑による不効用は考慮していない）。一方で、土地利用規制を行った場合、賃料の上昇によりゾーン居住者（家計）の効用が低下するため、立地量は減少することとなる。

4. 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。2050年の人口は、国立社会保障・人口問題研究所の2030年までの世帯タイプ毎の予測（全国平均値）より、2030年世帯数の2005年に対する比率（高齢単身（2.07倍）、若中年単身（1.07倍）、高齢夫婦（1.39倍）、若中年夫婦（0.66倍）、夫婦＋子（0.69倍）、片親＋子（1.32倍）、そのほか（0.85倍））を、片側対数関数で外挿し、2050年の東京都市圏の総人口を得た。

(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。年10万円という設定は、都市のコンパクト化に積極的に取り組んでいる富山市の『富山市まちなか住宅家賃助成事業』における3年間で限度とした1万円／月（12万円／年）の助成を参考にした（ただし、本モデルは静学モデルであるため、3年間といった限度を設けることはできない）。

c) 適応シナリオ（Ad.）

水害リスクが高い地域で土地供給可能面積を半分に

図-2 液状化リスク計算結果

する。具体的には、若松ら⁴²⁾の方法に基づいて地形分類に基づいた液状化リスク（0:なし、1:小、2:中、3:大）を計算し（図-2）、2、3の土地供給可能面積を半分にした。言うまでもなく、液状化リスクは水害リスクとは異なるが、洪水時に長時間湛水する干拓地や後背湿地、洪水の流路となりやすい旧河道、高潮におそわれる可能性がある埋立地では液状化リスクが高い等、広域での分析に耐えるような重要な傾向は捉えられていると考えられるため、本研究では代理変数とみなせると仮定した。無論、本データの入れ替えは大きな課題であるが、広域で水害リスク指標である浸水深を得るには、大規模な河川シミュレーション⁴³⁾と何らかの統計的な内挿・外挿が必要であるため、現実的には容易でないと考えられる。

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、充電時の電気代による間接排出量が増加する（表-2）。これらは、東日本大震災後の電源構成の変化を考慮し、電気事業連合会データから独自に推計したCO₂排出係数（0.50 kgCO₂/kWh）を用いて計算した値である。

PVについては、戸建て住宅の屋根にパネルを設置し、電力を賄う場合を想定した。これは、集合住宅においては、空調設備等で導入が難しいことが多いためである。PV発電量の計算には、横井ら（2010）¹⁹⁾の方法をそのまま用いている。ただし、日射量は、NEDO:日射量データベースより、平均年、8月の晴天時（日照時間で最も良い条件の値）を使用している。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/cos 30°として算出した。図-3は、この与え方の妥当性を、横浜

表-2 ガソリン自動車とEVのCO₂排出量の比較

車種	CO ₂ 排出量(gCO ₂ /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⁴⁰を参考に算出)

注2: 交流電力量消費率: 124Wh/km⁴⁵

注3: 交流電力量消費率: 110Wh/km⁴⁶

(JC08 mode)

図-3 1階床面積推計

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

市の建物データを用いて検証したものである。図-3の、縦軸は、推計建物1階面積（土地面積×建蔽率）を、横軸は、都市計画基礎調査による戸建て住宅の建物1階面積を示している。決定係数はおおよそ0.7となり、横浜市のみにおける検証であるが、推計値は、実データを良く近似していることが分かる（図-3における3つの外れ値を除外したケースでは、決定係数は0.613となった）。戸建て住宅の割合は、説明変数を上述の7世帯タイプの割合で説明するロジスティック回帰モデルで推計した³⁹。

以下、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。

5. 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-4

図-4 緩和シナリオによる人口分布の変化 (Mit/BAU)

図-5 適応シナリオによる人口分布の変化 (Ad/BAU)

図-6 緩和+適応シナリオによる人口分布の変化 (Mit+Ad/BAU)

～図-6のようになった。分析結果をわかりやすく示した

め、CO₂排出量（直接CO₂排出量と間接CO₂排出量を合計した値）の空間分布について、シナリオBAU1と比較し

図-7 CO₂排出量の空間分布の変化 (Mit1/BAU1)
(Mit1：緩和シナリオ，PV・EV導入なし，
BAU1：なりゆきシナリオ，PV・EV導入なし)

た結果の一例を図-7～図-9に示す。また、東京都市圏全体の直接CO₂排出量・間接CO₂排出量を図-10に示す。

まず、BAUでPV・EVも導入していない場合と、土地利用シナリオとしての緩和策のみを行った場合とを比べると、郊外でCO₂排出量が減少し、都心部及び駅周辺で人口が集約されている様子が見て取れる（図-7）。それに加えて、技術革新による緩和策（PV・EV導入）を行った図-8では、戸建の多い郊外でCO₂排出量が削減される。さらに、緩和策を加えた図-9では、図-2でリスクが高いとされた地区で土地供給可能面積を縮退させているため、戸建住宅も減り、図-8ほど郊外でCO₂排出量が削減できていないことがわかる。

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CO₂排出量が3.2%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CO₂排出量が削減されることがわかる。適応策でも4.8%削減されるが、緩和＋適応を同時に行うことで5.0%削減され、適応策単

図-8 CO₂排出量の空間分布の変化 (Mit2-iii/BAU1)
(Mit2-iii：緩和シナリオ，PV・EV導入あり，
EV普及率100%，PV普及率50%，
BAU1：なりゆきシナリオ，PV・EV導入なし)

図-9 CO₂排出量の空間分布の変化 (Mit+Ad2-iii/BAU1)
(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%，
BAU1：なりゆきシナリオ，PV・EV導入なし)

図-10 分析結果（直接CO₂排出量，間接CO₂排出量のシナリオ別比較）

独よりも高いCO₂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CO₂排出量が削減されるが、適応の場合はBAUよりもCO₂排出量が多くなってしまいうことがわかった。緩和+適応でもBAUよりもCO₂排出量が多くなり、緩和策単独と比べると削減率が約2%小さ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土地供給可能面積を縮退(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(集合住宅が増え)、それに伴ってPV発電可能量が減り、CO₂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。ただし、図-10の各土地利用シナリオについて、PV・EV導入なし(シナリオ1)と導入あり(シナリオ2)を比較すると、例えば最もPV普及率が低いシナリオ(2-iv)でもPV・EVによるCO₂排出量の削減効果は大きく、緩和策と適応策を同時に進める意義は大きいといえる。

6. 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、CO₂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。ただし、PV・EVによる削減効果は土地利用シナリオによる削減効果と比べても非常に大きく、緩和策と適応策を同時に進める意義は大きいといえる。

今後の課題として、時間変化・季節変化⁴⁷⁾、生活時間帯の異なる世帯間の電力融通^{17) 18)}、EVの蓄電池利用、PV・EV設備導入によるCO₂排出量、QOLの観点からの総合的評価等が挙げられる。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、各シナリオを費用対効果の観点から比較検討することも重要である。補助金を含む行政コストともに、家計負担の両面から評価する必要がある。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も必要となる。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研究推進プログラム(Research Program on Climate Change Adaptation: RECCA)の助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) 和田一範, 村瀬勝彦, 富澤洋介: 地球温暖化に伴う降雨特性の変化と洪水・渇水リスクの評価に関する研究, 土木学会論文集, No.796/II-72, pp.23-37, 2005.
- 2) 立川康人, 滝野晶平, 萬和明, キムスンミン, 椎葉充晴: 気候変化が日本の洪水発生に及ぼす影響の推定, 京都大学防災研究所年報, Vol.53, pp.23-36, 2010.
- 3) 新田友子, 鼎信次郎, 沖大幹: 流量確率指数を用いた地球温暖化に伴う日本域洪水リスク変化の推定, 水工学論文集, Vol.54, pp.451-456, 2010.
- 4) Swart, R. and Raes, F.: Making integration of adaptation and mitigation work: Mainstreaming into sustainable development policies?, *Climate Policy*, Vol.7, No.4, pp.288-303, 2007.
- 5) Wilbanks, T.J. and Sathaye, J.: Integrating mitigation and adaptation as responses to climate change: a synthesis, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol.12, No.5, pp.957-962, 2007.
- 6) Larsen, S.V., Kørnø, L. and Wejs, A.: Mind the gap in SEA: An institutional perspective on why assessment of synergies amongst climate change mitigation, adaptation and other policy areas are missing, *Environmental Impact Assessment Review*, Vol.33, No.1, pp.32-40, 2012.
- 7) Vigié, V. and Hallegatte, S.: Trade-offs and synergies in urban climate policies, *Nature Climate Change*, Vol.2, No.5, pp.334-337, 2012.
- 8) Thornbush, M., Golubchikov, O. and Bouzarovski, S.: Sustainable cities targeted by combined mitigation-adaptation efforts for future-proofing, *Sustainable Cities and Society*, in print, 2013.
- 9) 阿部成治, 三浦秀一, 外岡豊: LCA データベースによる家庭生活からの CO₂ 排出特性に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, Vol.551, pp.93-98, 2002.
- 10) 中村昌広, 乙間末廣: 家計消費に由来する二酸化炭素発生量-世帯属性による差に着目して-, 環境科学会誌, Vol.17, No.5, pp.389-401, 2004.
- 11) 山下隆久, 金森有子, 松岡譲: 人口・世帯構成と環境負荷発生量の係わりについて, 環境システム研究論文集, Vol.35, pp.315-325, 2007.
- 12) Dhakal, S.: Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications, *Energy Policy*, Vol.37, No.11, pp.4208-4219, 2009.
- 13) Kennedy, C., Steinberger, J., Gasson, B., Hansen, Y., Hillman, T., Havránek, M., Pataki, D., Phdungsilp, A., Ramaswami, A. and Mendez, G.V.: Methodology for inventorying greenhouse gas emissions from global cities, *Energy Policy*, Vol.38, No.9, pp.4828-4837, 2010.
- 14) Xi, F., Geng, Y., Chen, X., Zhang, Y., Wang, X., Xue, B., Dong, H., Liu, Z., Ren, W., Fujita, T. and Zhu, Q.: Contributing to local policy making on GHG emission re-

- duction through inventorying and attribution: A case study of Shenyang, China, *Energy Policy*, Vol.39, No.10, pp.5999–6010, 2011.
- 15) Doucette, R.T. and McCulloch, M.D.: Modeling the prospects of plug-in hybrid electric vehicles to reduce CO₂ emissions, *Applied Energy*, Vol.88, No.7, pp.2315–2323, 2011.
 - 16) Nakamichi, K., Seya, H. and Yamagata, Y.: Geographically explicit direct/indirect CO₂ emission scenarios for a compact city in 2050, the 10th Symposium of the International Urban Planning and Environment Association (UPE10), Sydney, Australia, 2013.
 - 17) 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.
 - 18) 谷口守, 落合淳太: 住宅街区のスマートグリッド導入適性に技術革新が及ぼす影響, 不動産学会学術講演会論文集, No.28, pp.29–38, 2012.
 - 19) 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, Vol.66, No.1, pp.17–34, 2010.
 - 20) Auckland Sustainability Framework: <http://www.arc.govt.nz/auckland/sustainability/auckland-sustainability-framework.cfm>, 2013.02.20閲覧.
 - 21) 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>, 2013.02.20閲覧.
 - 22) Suburban Neighbourhood Adaptation to Changing Climate (SNACC): <http://www.bne.uwe.ac.uk/cep/snacc/>, 2013.02.20閲覧.
 - 23) 国土交通政策研究所: 水害に備えた社会システムに関する研究, 国土交通政策研究, Vol.98, 2011.
 - 24) 吉田恭, 古本一司, 馬場美智子: イギリスにおける水害土地利用規制・誘導と関連諸制度に関する研究, 都市計画論文集, Vol.45, pp.63–71, 2010.
 - 25) 吉田恭, 古本一司, 馬場美智子: フランスにおけるPPRを中心とした防災型土地利用規制に関する研究, 都市計画論文集, Vol.46, pp.88–98, 2011.
 - 26) 牧紀男: 土地利用規制を利用した防災対策の全体—安全・安心な国土を目指して—, 自然災害科学, Vol.25, No.2, pp.135–154, 2006.
 - 27) 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/gaiyoku/kikouhendou/pdf/toshinref.pdf, 2013.02.20閲覧.
 - 28) 塩崎由人, 加藤孝明, 中村仁, 小出治: 自治体による既成市街地での規制・誘導による浸水対策に関する調査, 生産研究, Vol.62, No.4, pp.105–110, 2010.
 - 29) 塩崎由人, 加藤孝明, 中村仁, 小出治: 建築物の規制・誘導による既成市街地での水害対策に関する事例研究, 日本建築学会技術報告集, Vol.17, No.36, pp.693–698, 2011.
 - 30) 三村信男: 地球温暖化対策における適応策の位置づけと課題, 地球環境, Vol.11, No.1, pp.103–110, 2006.
 - 31) 法政大学地域研究センター: 適応策ガイドライン～適応策の検討手順とまとめ方 Ver.1, S-8 温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究, 2012.
 - 32) 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.
 - 33) 長尾征洋, 青野隆仁, 戸川卓哉, 加藤博和, 佐野充: QOL 指標と維持費用に基づく撤退・集結市街地の遺伝的アルゴリズムを用いた選定方法, 土木学会論文集 D3, Vol.68, No.5, pp.I_339–I_348, 2012.
 - 34) 高木朗義, 武藤慎一, 太田奈智代: 応用都市経済モデルを用いた治水対策の経済評価 (修正版), 河川技術論文集, Vol.7, pp.423–428, 2001.
 - 35) 寺本雅子, 市川温, 立川康人, 椎葉充晴: 水災害危険度に基づく土地利用規制の適用性に関する分析, 土木学会論文集 B, Vol.66, No.2, pp.130–144, 2010.
 - 36) Hamlin, E.M. and Gurrin, N.: Urban form and climate change: Balancing adaptation and mitigation in the U.S. and Australia, *Habitat International*, Vol.33, No.3, pp.238–245, 2009.
 - 37) 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.
 - 38) 堤盛人, 宮城卓也, 山崎清: 建物市場を考慮した応用都市経済モデルの可能性, 土木学会論文集 D3, Vol.68, No.4, pp.333–343, 2012.
 - 39) Yamagata, Y., Seya, H. and Nakamichi, K.: Creation of future urban environmental scenarios using a geographically explicit land-use model: A case study of Tokyo, *Annals of GIS*, in print, 2013.
 - 40) 山崎清, 上田孝行, 岩上一騎: 開発人口及び誘発・開発交通を考慮した東京湾アクアラインの料金値下げ効果の計測, 高速道路と自動車, Vol.51, No.6, pp.20–32, 2008.
 - 41) 堤盛人, 山崎清, 小池淳司, 瀬谷 創: 応用都市経済モデルの課題と展望, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.68, No.4, pp.344–357, 2012.
 - 42) 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.
 - 43) 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, Vol.53, pp.847–852, 2009.
 - 44) 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, 2012.08.02閲覧.
 - 45) 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, 2013.02.20閲覧.
 - 46) 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/>, 2013.02.20 閲覧.
 - 47) Esteban, M., Zhang, Q. and Utama, A.: Estimation of the energy storage requirement of a future 100% renewable energy system in Japan, *Energy Policy*, Vol.47, pp.22–31, 2012.

(2013. 2. 25 受付)

EVALUATION OF CO₂ EMISSIONS UNDER LAND USE SCENARIOS FOR INTERACTION BETWEEN CLIMATE CHANGE MITIGATION AND ADAPTATION MEASURES IN THE TOKYO METROPOLITAN AREA

Kumiko NAKAMICHI, Yoshiki YAMAGATA and Hajime SEYA

Scientific forecasts predict that climate change will be magnified, raising the risk of natural disasters in the future. The climate change will be gradual, but extreme weather events will increase in frequency and intensity. Vulnerability created by the water related disaster should be solved especially in Megacity which many assets are located. The realization of climate change mitigation and adaptation remain an urgent global issue. As a way of flood risk adaptation and CO₂ emissions mitigation, it should be effective that people retreat from flood-hazard areas and realize compact city. It means climate change mitigation and adaptation is compatible. There is an urgent need to review synergy and trade-off between climate change mitigation and adaptation measures. The objective of this study is to develop an integrated evaluation system for direct and indirect CO₂ emissions under land-use scenarios considering compact city and flood risk prevention and electric vehicles (EVs) and photovoltaic (PV) panels introduction scenarios, in order to assess both mitigation and adaptation measures. For creating the scenarios, this study used a spatially explicit land-use model at a local town level. Indirect emissions based on household's expenditure are also estimated in addition to direct emissions. In this study, the Tokyo Metropolitan Area, Japan, is selected as a case study to apply the system for assessment. The simulation results suggest that climate change mitigation and adaptation can generate a synergistic effect from the viewpoint of CO₂ emissions.