

モデル連携による総合的な環境対策分析 フレームワークの開発

五味 馨¹・藤田 壮²・増井利彦²・藤井実²・芦名秀一²・大場真³・戸川卓哉⁴

¹正会員 国立研究開発法人国立環境研究所 福島支部 (〒963-7707 福島県田村郡三春町深作10-2)

E-mail: gomi.kei@nies.go.jp

²正会員 国立研究開発法人国立環境研究所 社会環境システム研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

³非会員 国立研究開発法人国立環境研究所 福島支部 (〒963-7707 福島県田村郡三春町深作10-2)

⁴正会員 国立研究開発法人国立環境研究所 福島支部 (〒963-7707 福島県田村郡三春町深作10-2)

地域毎に適切な低炭素対策等の環境対策を評価するためには、人口・経済活動等と環境負荷発生空間分布を明示的に分析し、分野間の相互効果や土地利用誘導の効果も考慮する必要がある。その定量的な分析を行うため、本研究では各分野のモデル連携により都市スケールで空間分布を考慮して総合的な環境対策効果を分析するフレームワークを提案する。「マクロモデル」「土地利用モデル」「交通モデル」「地域エネルギーモデル」「建設ストック・フローモデル」「廃棄物マネジメントモデル」「ヒートアイランドモデル」の各モデルを変数の入出力を通じて連携させる枠組みを示す。さらに共通の想定のもとで推計を行うことで、低炭素・資源循環・ヒートアイランド対策の各分野における対策を分野間の相互効果・相乗効果を考慮して評価することが可能となる。また、開発した手法を東京都市圏へ適用し、2020年、2030年、2050年における環境対策の効果を評価した事例を紹介する。

Key Words: Integrated modeling, spatial analysis, urban planning, low-carbon society

1. はじめに

(1) 背景

これまで低炭素対策をはじめとした総合的な環境対策の導入を市町村等の地域単位で評価・検討するための手法が開発され、適用されてきた¹⁾²⁾。また、環境省によりマニュアル等も整備され³⁾、地球温暖化対策を策定する地方自治体も増加している。

しかしながら、ある地域・地点にとって適切な低炭素対策等の環境対策とは、例えば分散型エネルギーシステムのように、人口・経済活動等の状況、特に空間分布によって左右されることがある。一方、いわゆるコンパクトシティ化のように、より環境負荷の少ない空間分布へ土地利用を誘導することも環境対策として検討されることがある。さらに、異なる分野の環境対策の間には相乗効果がある。例えばヒートアイランド対策による暑熱環境の緩和は冷房需要を低減させ、低炭素効果を期待され、同時に、低炭素対策による省エネルギー化により建物排熱が削減されれば暑熱環境が緩和されることが期待される。しかし、相反する効果も考えられる。例えば低

炭素効果を目的として都市のコンパクト化を行った場合、建設ストックの更新を促進して資源利用が増加したり、建物の集約化によりヒートアイランド現象が促進されたりする恐れもある。これまで低炭素対策による他の便益は共便益または副次的便益として議論されてきた⁴⁾。しかし、低炭素対策を前提として他分野への効果を論じるアプローチではある地域に適した総合的な環境対策の評価・選定には不十分であり、様々な環境分野と環境対策の間の相互効果を検討し、さらに詳細な地域の特性を反映するために空間分布を考慮した分析が必要となる。これまでに提案されてきた総合的な分析手法では空間分布を考慮されていない⁵⁾⁶⁾、空間分布を考慮するものは特定分野に限定されていた⁶⁾⁷⁾⁸⁾。

(2) 本研究の目的

以上の背景を受け、本研究ではモデル連携により都市スケールで空間分布を考慮して総合的な環境対策効果を分析するフレームワークを提案する。また、開発したフレームワークを東京都市圏を対象として適用した事例を紹介する。

2. 開発した分析フレームワーク

(1) フレームワークの全体像

開発したモデル連携によるフレームワークの全体像を図-1に示す。ここで示す「モデル」とは抽象的な意味での当該分野の分析・定量的推計を行う手法を意味し、具体的にどのような定式化を行うかは各々の適用の際に適したものが選ばれるべきである。しかしながら、ここで示す変数を入出力とするものであれば、実際に利用される様々な分析・定量的推計手法の設計思想等によらず、本フレームワークにあてはめることで他のモデルと連携しつつ一定の整合性を持った分野横断的な分析が可能となる。

本フレームワークでは7つの「モデル」を連携させる。まず「マクロモデル」は広域(都道府県や市町村といったスケールを想定)の人口、産業活動水準、エネルギー需給を計算するモデルである。将来の環境対策の分析にあたっては人口や産業活動水準の対象地域全体の合計値(これを「マクロフレーム」と呼ぶ)が必要となるため、これを与えるのがマクロモデルの一つの役割である。もう一つの役割は広域のエネルギー需給及び二酸化炭素(CO₂)排出量を推計しつつ、他の各分野のモデルによる計算結果を受けてこれを再計算し、対象地域全体のCO₂排出量削減への各対策の寄与を分析することである。

「土地利用モデル」はマクロモデルより受け取ったマクロフレームから人口・従業者数等の詳細な空間分布(例えば1kmグリッドでの分布)を推計する。これを他のモデルが共有することにより、空間分布に影響を受ける様々な環境対策を統合的に分析することが可能となる。例えばここで居住地・立地選択にあたって経済的要因を考慮するモデルを利用すれば、固定資産税等の経済的な土地利用誘導施策の環境対策上の効果を評価することが可能となる。一方、より操作的に人口密度等を設定する手法を用いれば、例えば鉄道駅等の拠点地区にある水準で人口や経済活動を(ひとまずそれを実現する政策手段は留保したとして)集中させた場合に同様の評価を行うことが出来る。

「建設ストック・フローモデル」は地域ごとに建築物や社会資本ストックの更新時期を推計する。このとき空間解像度は土地利用モデルと同様であることが望まれる。人口・従業者の空間分布が変化する際、その増える地域では(仮に空き家・空き室を考慮しなければ)より多くの建築物が必要となる。地域によっては建築物の更新時期に合わせてこのような変化が可能となることも考えられる(例えば容積率の増加)。建築物ストックの更新時期情報を土地利用モデルが制約条件として考慮することでよりその地域の状況に合った将来の空間分布の推計が可能となる。さらに、この関係を双方向とし、土地利用モデルの要求する空間分布を実現するストック更新を推計することも可能である。ここで建設ストックの更新により発生する物質フローやエネルギー需要を推計し、これを廃

棄物マネジメントモデルに与えれば、土地利用の集約化によって建設需要とそれにとまう環境負荷が増加し、例えば低炭素効果としてはかえって排出量の増加に繋がるのではないかと、といった課題に対して、他のモデルによる環境効果の分析と合わせて評価することが可能である。

「交通モデル」は土地利用モデルから人口・従業者分布を受け取り、交通量を推計する。土地利用モデルによって空間分布の様々なシナリオを検討することで、土地利用誘導による交通量変化とそれに伴うエネルギー消費や大気汚染物質排出の変化を検討することが出来る。ここで推計された交通量と交通エネルギー消費量の空間分布はヒートアイランドモデルへ熱源の情報として入力される。これにより特定のグリッドの自動車輸送量を増減させるような交通対策・環境対策のヒートアイランド対策との相互効果を検討することが可能となる。また、交通エネルギー需要はマクロモデルにも入力され、そこでエネルギー供給との総合的な分析を行うことで、例えば電気自動車の普及による低炭素効果を発電部門の低炭素化と同時に検討することが可能である。さらに建物のエネルギー効率改善は建て替えにより促進されると考えられることから、ストックの更新時期をマクロモデルに与え、将来の各時点における建物のエネルギー効率改善に際してこれを考慮することが可能となる。

「地域エネルギーモデル」は空間分布からグリッドごとのエネルギー需要量を推計し、地域エネルギーマネジメントシステムや地域熱供給等の分散型エネルギーシステムの導入可能性とそのシステム内のエネルギー需給を検討する。例えば地域熱供給事業の成立条件として一定の範囲に一定以上の密度の熱需要があることが必要となるが、ここで土地利用モデルによる空間分布の推計結果を利用することで土地利用誘導による集約によって成立条件を満たす地域が増加すれば、その省エネルギー・低炭素効果を評価することが可能である。また、地点ごとに利用可能な未利用エネルギーや、廃棄物マネジメントモデルによって推計される近傍の清掃工場からの熱供給の可能性も検討することが出来る。

「廃棄物マネジメントモデル」は一般廃棄物および産業廃棄物の発生・収集・リサイクル・焼却・最終処分等のプロセス、それに伴う環境負荷の発生、焼却やバイオマスのメタン発酵等によるエネルギー回収を推計する。空間分布の変化により一般廃棄物の発生地点が変化するため、例えばここで収集に伴う車両の走行距離を推計するモデルを利用すればその影響を考慮することが出来る。また、清掃工場でのエネルギー回収は我が国では現在広く行われているが、上記「地域エネルギーモデル」との連携により熱需要の近傍への立地を想定することで特に熱の供給可能性を検討することが出来る。

最後に「ヒートアイランドモデル」では各部門の地点ごとのエネルギー消費を熱源の情報として与え、将来の気温を推計する。このとき交通、家庭、業務等の部門での省エネルギーにより排熱が減少すれば外気温を低下させる効果がある

一方、土地利用の集約化には集約拠点でのヒートアイランド現象を悪化させる可能性がある。他の各モデルと連携することでこれらの効果を統合的に考慮した将来の暑熱環境と、ヒートアイランド対策によるその緩和効果を評価することが出来る。さらにヒートアイランド現象の緩和による冷房需要の低減効果をマクロモデルに入力することでヒートアイランド対策の

低炭素効果も他分野の各対策の効果と統合的に推計することが出来る。

これらのモデル群を連携させ、シナリオの設定と、将来の推計時点を共通させることで、それぞれ時間解像度・空間解像度・設計思想・動学または静学の違い等があっても、一定の整合性をもって総合的な分析を行うことできる。

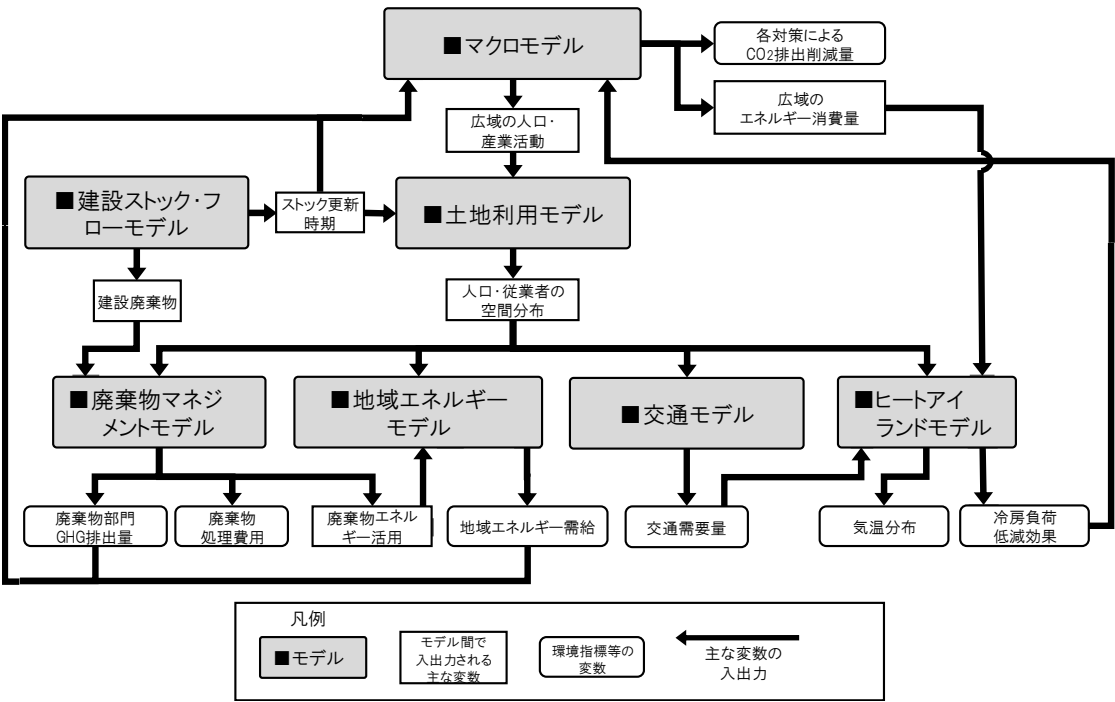


図-1 フレームワークの全体像

表-1 モデル間連携の入出力表への整理

		To						
		マクロモデル	土地利用モデル	建設ストック・フローモデル	交通モデル	地域エネルギーモデル	廃棄物マネジメントモデル	ヒートアイランドモデル
From	マクロモデル		人口(市町村) 従業者数(市町村)					建物エネルギー消費量変化(市町村)
	土地利用モデル				人口・従業者数(1x1km)	人口・従業者数(1x1km)	人口・従業者数(1x1km)	人口・従業者数(1x1km)
	建設ストック・フローモデル	建物更新割合(市町村)	建物更新割合(1x1km)				建設廃棄物発生量(市町村)	
	交通モデル	交通エネルギー需要(市町村)						自動車交通量(1x1km)
	地域エネルギーモデル	地域エネルギー需給(市町村)						
	廃棄物マネジメントモデル					排熱供給量(地点)		
	ヒートアイランドモデル	冷房需要低減効果						

(2) フレームワークの具体的適用にあたっての問題点

前節で示したフレームワークは理論的なものであり、これを具体的な地域を対象に適用し分析を行うには各「モデル」に該当するモデル・推計手法を選定し、必要なデータを収集・整備し、計算プログラムを実装して推計を行わなければならない。その際に想定されるいくつかの問題をここでは検討する。まず、上述のモデルが全て揃うとは限らず、あるモデル（例えばヒートアイランドモデル）が抜けることもあり得る。しかしながら、マクロモデルと土地利用モデルが他のモデル群を接続する要になっているため、この二つに該当するモデルを用意することが出来れば、他のモデルが全て揃っておらずとも分析が可能である。次に、モデルの保有・運営主体が複数の組織にまたがっている場合には意思疎通や情報の授受に作業上の不都合が大きくなることが考えられる。加えて、モデルによっては計算機への負荷が高く、相当な計算時間（例えば数か月）を要するものもあるだろう。一方で比較的短い計算時間（例えば数分）でひとつのケースを計算できるモデルもある。このような中でモデル連携を円滑に行うにはプロジェクトマネジメントに精通したプロジェクトマネージャーが必要となるだろう。そのための具体的なツールとしては各種の工程表の他、表-1 に示すような入出力表形式でモデル間の関係を表現することが有用であろうと考えられる。

3. 東京都市圏における適用例

(1) フレームワークの適用

適用例として東京都市圏（東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県）を対象とした分析事例を示す。本事例は本研究の成果を活用して行われ、「東京都市圏における環境対策のモデル分析最終とりまとめ報告書」⁹⁾として発表されているものであるため、ここでは同報告書では詳しく言及されていないフレームワークの適用に関する技術的側面を示し、分析結果そのものは紹介に留めることとする。

各分野のモデルとして多くは既存のモデルを利用し、低炭素・資源循環・ヒートアイランド緩和の各環境対策の効果を分析した。フレームワークの各「モデル」へ対応して実装されたモデル及びその選定理由は次の通りである。「マクロモデル」として「環境技術評価モデル」を利用した。「環境技術評価モデル」はこれまでに日本国を対象とした長期的な低炭素対策技術の分析に利用されてきたモデルであり⁹⁾、空間的な詳細は考慮しないものの、エネルギー需要部門・供給部門双方で利用されている技術を考慮して社会全体のエネルギー需給及びCO₂排出量を推計し、要因分析手法により各技術による低炭素効果を整合的に推計することが出来る。これにより他のモデルによる推計結果をパラメーターとして受け入れ、対象地域全体の排出量・削減量・削減への貢献度を分析する。「土地利用モデル」及び「交通モデル」としては「土地利用・

交通モデル」⁹⁾を利用した。本モデルは東京都市圏を約 3000 のゾーンに分け、市場メカニズムを基礎として消費者の居住地選択と事業者の立地選択を行うモデルである。「建設ストック・フローモデル」としては「物質ストックマネジメントモデル」⁷⁾を利用した。本モデルは建築物ストックの情報を建物単位で時系列的に整備することで建物の建設時期を同定し、これをもとに廃棄率関数をあてはめ将来の更新を推計することが出来る。「地域エネルギーマネージメントモデル」としては「地域エネルギー・低炭素街区モデル」を新たに開発した。本モデルはグリッド単位でのエネルギー需要密度と地点ごとの未利用エネルギーを含むエネルギー減の情報から熱電併給による地域エネルギー事業の対象適地を選定し、その地点でのエネルギー需給を推計する。「廃棄物マネジメントモデル」として「地域資源循環モデル」を新たに開発した。廃棄物の発生量と清掃工場の規模及び立地点から収集、リサイクル、焼却等の各プロセスを推計する。清掃工場ごとの情報を入力することで、将来の廃棄物処理の広域化による統合・大規模化の影響を評価することが出来る。「ヒートアイランドモデル」としては Ashie ら⁸⁾によるモデルを利用した。本モデルは 5m グリッドで詳細な熱環境解析を行うモデルであり、各種のヒートアイランド対策に加え、建物排熱、自動車排熱を別個に分析できる。

これらのモデルを連携させるための具体的な変数の入出力の全体像を図-2 に示す。実際に利用したモデルの詳細な特徴や分析に要する時間的な制限等に合わせ、2. に示したフレームワークから若干の変更を行っている。大きな変更の一つは「応用一般均衡モデル」¹¹⁾を追加したことである。これにより市場メカニズムにもとづき、環境対策の経済影響を分析することが出来る。またモデル間の連携のうち、建設ストックの更新時期から建物エネルギー効率の改善を推計することや、ヒートアイランド対策による冷房需要低減のマクロモデルへの入力は研究期間の制約により省略された。

(2) ケース設定

環境対策を行わない固定ケース、拠点への土地利用誘導を含む既存の目標・計画等の環境対策を実施する対策ケース α 、さらに踏み込んだ環境対策と土地利用集約を実施する対策ケース β の3つを設定した。

(3) 推計結果

分析された環境効果の概要を表-2 に示す。対策ケース α では2030年のCO₂排出量が現状から29%、同じく β では33%削減された。また固定ケースに比べて対策ケース β では一般廃棄物処理費用が最大35%削減、体感気温が最大0.74℃低下することが示された。さらに対策別の低炭素効果を分析すると東京都市圏内の対策効果のうち16%が土地利用誘導に関するものとなり、その内訳は交通対策が418万t、地域エネルギーシステムが718万t、廃棄物焼却排熱の利用が57万tであった。

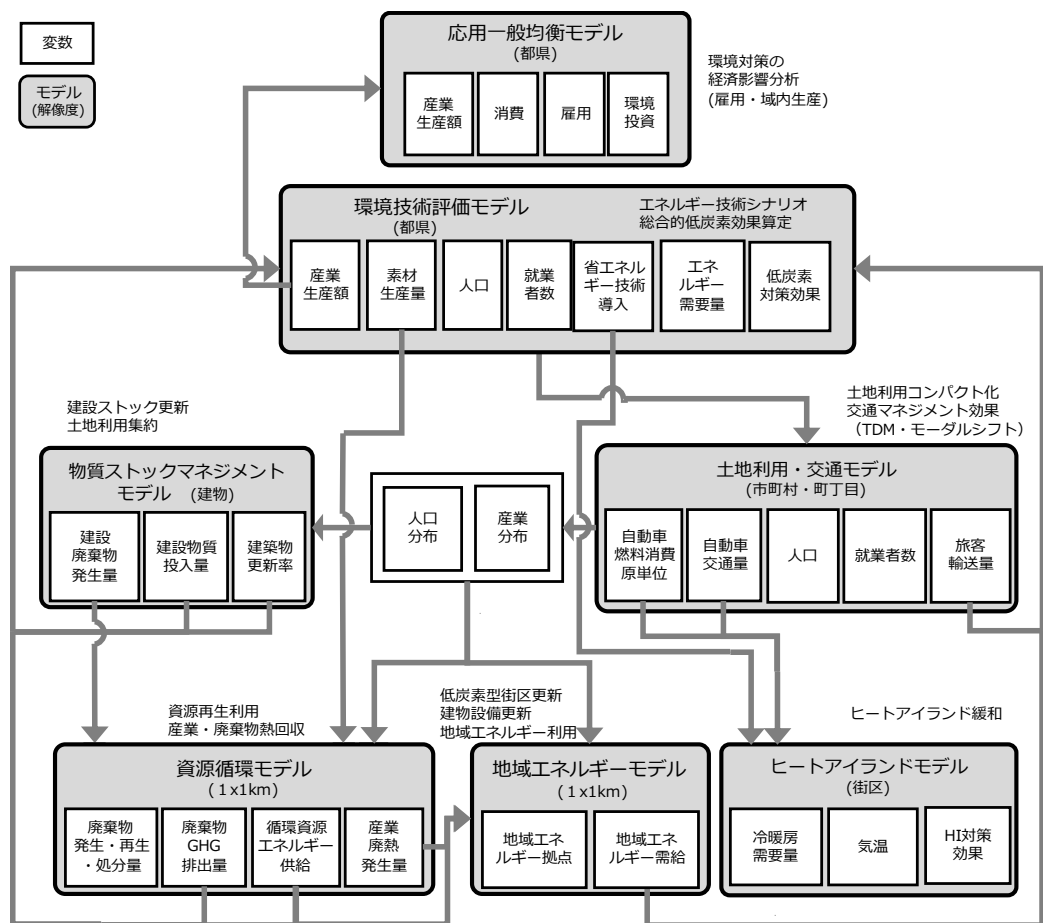


図-2 東京都市圏における適用例のモデル連携の全体像

表-2 東京都市圏における適用例の環境対策効果の概要

		低炭素 (現状比)	物質循環 (固定ケース比)	大気環境(ヒートアイランド) (固定ケース比)
対策ケース α	2020年	二酸化炭素排出量 5%削減	廃棄物処理費用1%削減	昼間気温 最大 0.23℃低下
	2030年	29%削減	建設廃棄物11%減 廃棄物処理費用16%削減	最大 0.26℃低下
	2050年	81%削減	建設廃棄物15%削減 廃棄物処理費用19%削減	最大 0.30℃低下
対策ケース β	2020年	8%削減	廃棄物処理費用1%削減	最大 0.71℃低下
	2030年	33%削減	建設廃棄物14%削減 廃棄物処理費用55%削減	最大 0.84℃低下
	2050年	85%削減	建設廃棄物19%削減 廃棄物処理費用69%削減	最大 1.00℃低下

4. まとめ

本研究では複数のモデルを連携させることにより、将来の空間分布を考慮して低炭素、資源循環、ヒートアイランド緩和といった各種の環境対策を整合的に分析し、対策の相互効果・相乗効果を含めて環境効果を推計する手法を提案した。また東京都市圏における適用事例を紹介した。本手法を応用することにより、地域の様々な特徴に応じた環境対策の評価とこれにもとづいた環境関連計画の立案や事業の提案が可能になるものと考えられる。今後の課題として大気汚染緩和、生物多様性の保全、水質保全、景観保全等の様々な環境分野を含むフレームワークの構築と、具体的適用を通じた政策立案への有用性向上が挙げられる。

謝辞:本研究は、環境省の地球環境研究総合推進費(2-1404)、「二国間クレジット(JCM)推進のためのMRV等関連するインドネシアにおける技術高度化事業」、環境省「平成27年度東京オリンピックに向けた統合的アプローチによる環境対策推進検討委託業務報告書」同じく「平成28年度CO2テクノロジーアセスメント委託業務」の支援により実施された。また、国土技術総合研究所足永靖信室長、価値総合研究所山崎清執行役員並びに柳澤一希副主任研究員、名古屋大学谷川寛樹教授並びに奥岡桂次朗助教の各位に多大な協力を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 島田幸司, 田中吉隆, 五味馨, 松岡譲: 低炭素社会に向けた長期的地域シナリオ形成手法の開発と滋賀県への先駆的適用, 環境システム研究, Vol. 34, pp. 143-154, 2006.
- 2) 五味馨, 島田幸司, 松岡譲: 地方自治体における統合環境負荷推計ツール開発と滋賀県への適用, 環境システム研究, Vol. 35, pp. 255-264, 2007.

- 3) 五味馨, 仲座伯方, 松岡譲: 地域経済の開放性を考慮した低炭素社会シナリオ構築手法の開発と京都市への適用, 環境システム研究, Vol. 36, pp. 1-9, 2008.
- 4) 環境省: 地球温暖化対策地方公共団体実行計画(区域施策編) 策定マニュアル, 2009.
- 5) Barker, T., I. Bashmakov, A. Alharthi, M. Amann, L. Cifuentes, J. Drexhage, M. Duan, O. Edenhofer, B. Flannery, M. Grubb, M. Hoogwijk, F. I. Ibitoye, C. J. Japma, W.A. Pizer, K. Yamaji: Mitigation from a cross-sectoral perspective. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- 6) 山崎清, 武藤慎一, 開発・誘発交通を考慮した道路整備効果の分析, 運輸政策研究, Vol. 11, No. 2, pp. 014-025, 2008.
- 7) Tanikawa, H., Hashimoto, S.: Urban stock over time: spatial material stock analysis using 4d-GIS, Building Research & Information, Vol. 37(9), pp. 483-502, 2009.
- 8) Ashie, Y., Kono, T., Urban-scale CFD analysis in support of a climate-sensitive design for the Tokyo Bay area, International Journal of Climatology, Vol. 31(2), pp. 1740181, 2011. 東京都市圏における環境対策のモデル分析検討会: 日本の市区町村別将来推計人口, 2008.
- 9) 東京都市圏における環境対策のモデル分析検討会: 東京都市圏における環境対策のモデル分析 最終とりまとめ報告書, 2016.
- 10) 「2050 日本低炭素社会」プロジェクトチーム: 2050 日本低炭素社会シナリオ: 温室効果ガス 70%削減可能性検討, 2007.
- 11) 増井利彦, 日比野剛, 大城賢, 技術選択を考慮した応用一般均衡モデルによるわが国の温室効果ガス排出削減目標の評価, 土木学会論文集 G(環境), Vol70, No.5, pp.I_43-I_51, 2014.

(2016. 8. 26 受付)

DEVELOPMENT OF A FRAMEWORK FOR ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL MEASURES WITH LINKAGE OF MULTIPLE SIMULATION MODELS

Kei GOMI, Tsuyoshi FUJITA, Toshihiko MASUI, Minoru FUJII, Shuichi ASHINA, Makoto OOBA, Takuya TOGAWA

We developed a new framework of integration of models: macro-scale accounting model, micro-economic land-use and transport model, town-scale energy technology model, building stock model, process-based waste management model, physical heat island model, and computable general equilibrium model to assess environmental measures in metropolitan areas. The framework makes it possible to evaluate mutual impacts of measures in different environmental issues, and impacts from land and infrastructure development to environmental measures. The framework was applied in Tokyo metropolitan area and low-carbon effect, material-recycling effect and heat island mitigation effect were evaluated.