

都市スケールの三次元水熱フラックス解析 モデルによる都市の緑化施策の評価

濱野 裕之¹・中山 忠暢¹・堀 紘子²・藤田 壮¹・田上 浩孝¹

¹ 正会員 (独)国立環境研究所 環境技術評価システム研究室 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)
E-mail: hamano.hiroyuki@nies.go.jp

² 東洋大学大学院 工学研究科 環境・デザイン専攻 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

都市熱環境緩和技術導入による都市気象緩和効果や空調使用エネルギー削減量算定のツールとして、都市域の統合的水熱収支解析が可能なNICE-URBANモデルの開発を行った。本モデルは、メソスケール気象モデル及び都市キャノピーモデルを結合したマルチスケールモデルであり、都市キャノピーモデル内へのパッチ化導入により計算精度の向上が確認された。また、本研究では都市熱環境改善策として緑化施策を取り上げ、NICE-URBANモデルを用いた緑化導入による都市気象および外気負荷から算定される空調エネルギーに与える影響を評価した。その結果、川崎市における緑化施策及び緑化可能地全面での導入により、2006年8月の住宅・業務部門に対し1日当たり14MWh、197MWhのエネルギー消費削減効果となることが明らかにになった。

Key Words : *heat environmental mitigation, multi-scale model, evaluation system, patch method, NICE-URBAN*

1. はじめに

都市は世界中の人口約半分が集中しており、地球温暖化問題に対応できる低炭素都市形成に向けて、省エネ技術開発や都市環境改善技術の導入効果を算定する手法の構築が緊急課題となっている。日本国内での二酸化炭素排出では民生部門からのエネルギー消費量の増加が続いており、今後その排出量の削減が重要な課題となっている¹⁾。都市の熱環境改善技術として、屋上緑化、壁面緑化、都市緑化、日射反射率の向上、保水性舗装の導入などが提案されてきており、個々の要素技術・施策についてのエネルギー消費削減についても評価が行われてきている^{2,7)}。これらの要素技術の導入は、現在では行政が業務・家庭部門を対象とした「エネルギーの使用の合理化に関する法律(省エネ法)」により、積極的にこれらの都市域における熱環境改善技術の導入の検討が進められてきている。

以上のように、都市の熱環境改善策の導入の規模と立地による効果算定方法の確立が重要となるが、都市の環境改善による隣接する都市や地域スケールへの波及効果は無視できない。その影響の時空間的な範囲の把握、都市環境施策のステイクホルダーの同定によって、具体的な都市環境政策シナリオの構築が可能になる。

筆者らはこれまで、MODIS衛星データから得られる

LAIやFPAR等のデータと同化することによって植生の季節変化・増殖を考慮し、かつ、河川水、土壌水分、地下水及び植生間での相互作用を考慮した三次元グリッド型の水・熱・物質収支モデル(NICE^{8,9)})の開発を行ってきた。これまでに、中国長江・黄河流域、関東平野、霞ヶ浦、釧路湿原等を対象としてNICE-SNOW¹⁰⁾、NICE-AGR¹¹⁾、NICE-SEA¹²⁾、NICE-LAKE¹³⁾、NICE-FLD¹⁴⁾、NICE-MASS¹⁵⁾、NICE-VEG^{16,17)}などのモデルを開発し、中国における農業生産と地下水との関係と問題点、さらに釧路湿原における植生変化に伴う湿原の乾燥化の構造を明らかにしてきた。

本研究では、新たに都市熱環境改善技術の導入効果の評価を行うためのサブモデルを加えて、都市政策の検討に資する三次元の水熱フラックス解析モデル構築を行った。本論文では、自然流域における水収支解析で実績を有するNICEモデルをベースに、気象モデルにRAMS¹⁸⁾を、都市キャノピーモデルにはSiB2¹⁹⁾の構造にSiBUC^{20,21)}、AUSSSM²²⁾からキャノピー内運動量、水、熱移動現象過程を組み込み、大気-都市キャノピー-不飽和-地下水の三次元連成モデルを構築した。そのうえで、三次元都市水熱フラックス解析モデルの再現性の検証と、都市熱環境改善技術の導入効果算定を行った。具体的に緑化施策導入による空調負荷低減効果の算定を行った。

2. 研究方法

植生のヒートアイランドおよび都市気象に及ぼす影響評価に関する研究としては、主に数十kmのスケールのメソスケール気象モデルにより行われてきている^{23,29}。これらのモデルでは、都市の地表面被覆をグリッドに分割し、各グリッドにアルベドや蒸発効率などの物性値を与えている。全ての地表面被覆での地表面パラメータを得るには膨大な現地観測が必要であるために現実には困難であり、土地利用区分別にこれらのパラメータを設定し、土地利用データから各地表面パラメータの設定を行うのが一般的である²⁷。一方で、このメソスケール気象モデルの開発では、計算精度向上を目的としたパッチ化の研究が進められてきている^{28,32}。

一方、都市スケールでのモデル開発では、街区を対象とした都市キャノピーモデルに空調負荷計算プロセスを組み込んだモデル構築^{22,33}が進められてきている。これらのモデルは、建物高さ分布から決定される代表的建物構造が水平方向に連続している街区を想定し、この都市構造を仮定することにより都市キャノピー内の温度、湿度、風速などの垂直方向の分布の算定が可能である。しかし都市キャノピーモデルでは、隣接する街区間でのフラックス相互作用について考慮することができないという課題がある。そこで、メソスケール気象モデルに都市キャノピーモデルを地上境界のサブモデルとして組み込まれた三次元都市キャノピーモデルの開発として都市気候予測システム(UCSS)^{34,35}など³⁶が進められている。

本研究では、各スケールでのモデル利点を生かし、都市熱環境改善技術評価が可能なモデル構築のため、対象地領域を詳細に記述する都市キャノピーモデルと地域スケールでの解析を可能とするメソスケール気象モデルを連結したマルチスケールモデルの構築を試みた。これにより、対象地域内での現象の高い再現性を有し、都市熱環境改善技術のより詳細な条件設定が可能となるモデル構築を目的とした。

具体的には、対象となる領域周辺の境界条件をメソスケール気象モデルで推定し、植生や水面、土壌面などの自然地のみならず、住宅、商業地、工業地までの土地利用地域の都市構造を再現するために都市キャノピーモデルを組み合わせた、マルチスケールモデルの構築を行った。特に、都市キャノピーモデルでは、都市環境施策の都市外を含む地域スケールの解析を行うためメソスケール気象モデルとの結合を行うと共に、隣接する街区間でのフラックスの相互作用を考慮した三次元都市キャノピー内モデルを構築した。更に、都市キャノピーモデルにおいて、様々な土地利用用途が混在する都市域での計算の再現性の向上を目的とした各メッシュのパッチ化を行

った。主に都市域における気象環境の再現計算の向上を目的とし、緑化施策導入方法の考案や、保水性舗装導入効果の算定が可能なように、都市キャノピーモデル内にこれらの評価サブモデルを内包する構造となっている。更に、都市熱環境改善技術導入による外気温変化が空調負荷量の削減に効果があるかどうかの算定を行うための基本フレームを設計することで、統合的な都市熱環境改善評価システムモデルの構築を行った。

3. 対象地およびモデル、計算条件

(1) NICE-URBANモデルの構造

都市域の地表面を通しての水熱収支は周辺域の水熱循環に大きな影響を及ぼすため、本研究ではこれまでに開発してきたNICEモデル⁸⁹)に新たな改良を行った。図-11にNICE-URBANモデルの全体構造および算定プロセスの概要を示す。今回のモデル改善は、大きく2つに分けられる。1つ目に、陸域一大気域間での水・熱フラックスを考慮するため、都市キャノピー(自然地、都市域モデル)モデルと局所大気モデル(RAMS)¹⁸)の結合を行った。2つ目に、建物およびアスファルトから構成される都市キャノピー内モデルの構築を行った。

本モデルにおける都市キャノピーモデルの構造と特徴、メソ気象モデルと地下水モデルとの各種フラックスの入出力の構図を図-2に示す。また、NICE-URBANモデルは様々な既存モデルから構成されるため、各サブモデルにおける領域および変数などについてまとめたものを表-1に示す。陸面モデルとして、植生モデルSiB2に都市構造を与える都市キャノピーモデル(SiBUC^{19,20})を結合することにより、都市形状、放射過程などを考慮したキャノピー全体としての水・熱収支の算定が可能となる²¹。更に、都市キャノピー内部の微気象算定は、各サブグリッド内でAUSSSM²²)をベースとする鉛直一次元方向での水・熱・運動量の移動に加え、水平方向への二次元移流拡散プロセスを組み込むことにより、都市キャノピー内の三次元フラックス解析を可能とした。本モデルにおける都市キャノピー内の三次元解析とは、キャノピー内の各グリッド(200m×200m×1.6m)の温度、水蒸気、風速を鉛直一次元および二次元の水平方向を各々で算定することにより、都市キャノピー内の他点(隣接するグリッドからの移流)を考慮した空間的に連続(三次元)な場の予測を行うことができることを意味する。しかし都市キャノピー内の放射量については、各200mメッシュ内における詳細な放射分布ではなく、建物の三次元構造を考慮した建物壁面、地表面および天空の間で交換される全体の短波・長波放射熱量として算出される。また、都市キャ

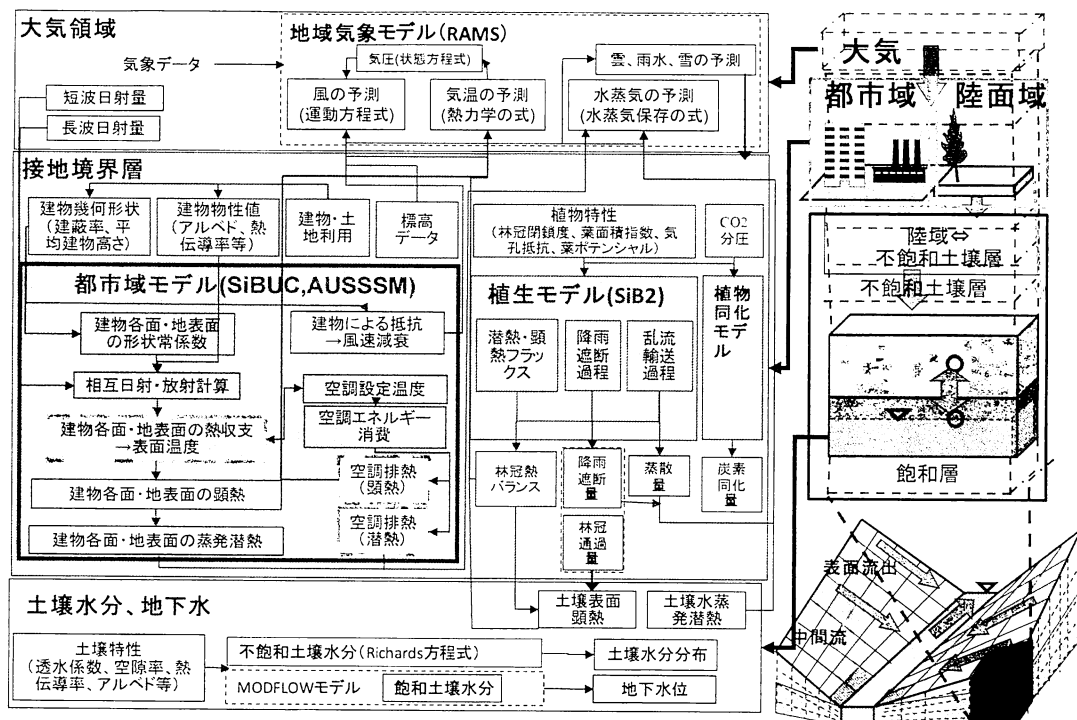


図-1 NICE-URBANのモデル構造

ノピーとメソ気象モデルおよび地下水モデルと連結させることで、大気から地下までを含めた水収支解析が可能としている点で特徴を有している。

都市キャンノピーモデルにおける水熱収支はSiBUCの基礎とする以下の式(1)～(5)で表わされる。ここで、 T_r 、 T_w [K]は屋根、壁面表面温度、 T_g [K]は地表面温度、 T_d [K]は地下温度を示す。(ここで、添え字のrは屋根、wは壁面を、gは路面を、dは地中を、bは建物を意味する)

$$C_r \frac{\partial T_r}{\partial t} = Rn_r - H_r - \lambda E_r - \omega C_r (T_r - T_b) \quad (1)$$

$$C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = Rn_w - H_w - \lambda E_w - \omega C_w (T_w - T_b) \quad (2)$$

$$C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = Rn_g - H_g - \lambda E_g - \omega C_g (T_g - T_d) \quad (3)$$

$$C_d \frac{\partial T_d}{\partial t} = Rn_d - H_d - \lambda E_d - \omega C_d (T_d - T_b) \quad (4)$$

上記式において、屋根、壁面、地表面、地中に関した各種フラックス及び物性値として、 Rn_r 、 Rn_w 、 Rn_g [W/m²]は吸収日射量を、 H_r 、 H_w 、 H_g [W/m²]は顕熱を、 E_r 、 E_w 、 E_g [kg/m²/s]は蒸発速度を、 C_r 、 C_w 、 C_g 、 C_d [J/m²/K]は有効熱容量を表す。また、 λ [J/kg]は水の蒸発潜熱量を、 ω [1/s]は日角振動数を表す。ここで、日射量の扱いについては、キャンノピーに入射する日射量は、メソ気象モデルから算定される放射量をパッチ面積に応じて分配し、自然地ではSiB2で用いられているTwo-stream approximation法¹⁹⁾により、都市域ではSiBUCにおける屋根、壁面、道路を含めた放射収支の計算を行った。

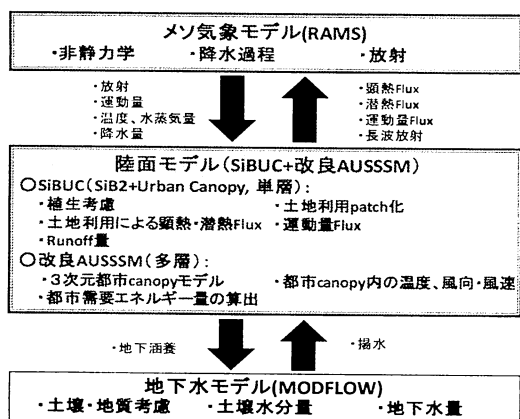


図-2 都市キャンノピーモデル構造

表-1 NICE-URBAN モデル構成要素

モデル 対象領域	NICE-URBAN			
	RAMS	改良AUSSSM	陸面モデル(SiBUC+改良AUSSSM)	地下水モデル(MODFLOW)
サブモデル	RAMS	改良AUSSSM	陸面モデル(SiBUC+改良AUSSSM)	地下水モデル(MODFLOW)
Coordinate	Arakawa Grid	Carterian	Arakawa Grid	Carterian
流体の扱い	非静力学・粘性	非圧縮	非圧縮	非圧縮
乱流処理	Med. and Yamada (準2次) Smagorinsky (準2次)	Gambitによる2次元方程式	(伝導率)	地質パラメータより決定
入射量の補正	3次元移動放射	和置(次元放射+水平移動放射)	3次元移動放射	3次元移動放射
予測変数	気温、比湿、風速、降水量、日射量等	気温、比湿、風速	気温、比湿、風速、降水量、日射量等	地下水位
計算領域	地上50m以上	地上50m以下のcanopy内	地表面	土壌を貫いた地下

水収支基礎式は以下の式(5)で表わされる。

$$\frac{\partial M_c}{\partial t} = P_i - D_i - \frac{E_i}{\rho_w} \quad (5)$$

ここで、 M_c [m]は貯留された水量、 P_i [m/s]は物体により遮断される降水量、 D_i [m/s]は流出水量、 E_i [kg/m²/s]は蒸発速度、 ρ_w [kg/m³]は水の密度を表わす。また、 i は屋根、壁、地表面に区分されている。

メッシュ内の各種表面温度および水熱フラックス量は、SiBUC計算過程からの出力結果から得られる。SiBUCは都市キャノピーを単層モデルとして表現しており、NICE-URBANモデル中ではSiBUCから算定される各種フラックスを大気モデル側へ反映し、また道路等の地表面温度はSiBUCから算定される値を用いる。しかし、SiBUCは都市キャノピー内の大気温度は1点で代表するため、各高さでの温度分布等を算定することはできない。そこで本モデルでは、SiBUCから得られる路面温度 T_g を下端境界条件に、大気モデルRAMS最下層の温度、湿度、風向風速を上端境界条件とし、その間の運動量、熱、水蒸気量の詳細な分布を算定するためにAUSSSMの鉛直一次元基礎式を用いた。都市キャノピーでも、建物間における鉛直方向の分布を算定するための運動量、熱、水蒸気の一次元基礎式は、AUSSSMの基礎式から以下の式で表わされる。

$$m \frac{\partial U_a}{\partial t} = \frac{\partial \left(K_m m \frac{\partial U_a}{\partial z} \right)}{\partial z} - \frac{1}{2} c q |U_a|^2 \quad (6)$$

$$m \frac{\partial T_a}{\partial t} = \frac{\partial \left(K_h m \frac{\partial T_a}{\partial z} \right)}{\partial z} + H_{ex} \quad (7)$$

$$m \frac{\partial q_a}{\partial t} = \frac{\partial \left(K_v m \frac{\partial q_a}{\partial z} \right)}{\partial z} + W_{ex} \quad (8)$$

ここで、 z [m]は地表面からの垂直方向高さを、 U_a [m/s]は風速、 T_a [K]はキャノピー間の大気温度、 q_a [kg/kg]は比湿、 m [-]は流体体積密度、 c [-]は抵抗係数、 a [1/m]は単位流体体積当たりの建物立面積、 K_m 、 K_h 、 K_v [m²/s]は運動量、熱、水蒸気の乱流拡散係数、 H_{ex} 、 W_{ex} [W/m²]は建物・工場から排出される顕熱、潜熱を表している。なお、本モデルでは、建物の屋根、壁面、路面を含めた各面からの熱輸送はSiBUCで計算を行い、大気条件に反映している。このため、鉛直分布算定を行う改良AUSSSMにおける計算では各建物表面からの対流熱輸送は考慮していない。

(2) 入力データ及び計算条件について

入力データとして用いた土地利用区分は、主対象領域である川崎市は川崎市・都市計画基礎調査データを、周辺地域である川崎市以外の神奈川県地域は数値地図5000

を、東京都は細密数値情報10mのデータを用い作成した。また土壌・地質・地下水情報は、川崎市環境局環境対策部環境対策課が発行している平成19年度水質年報をもとに、モデルの各三次元グリッドに与えた。モデル境界条件としては、地域スケール計算のための広域境界条件として気象庁メソ客観解析データを用いた。都市域については、国土数値情報及び川崎市・横浜市・東京都提供の建物データ（都市計画基礎調査建物情報）を用いて作成した建物メッシュデータを入力条件とした。観測データのない集水域上流端(森林、草地、非灌漑地等)の境界では、表面流及び地下水流は尾根を越えて反対側には流れないという仮定で反射条件を用いた。南東側の境界(東京湾)では0mの定水頭を与えた。

本モデルは、地域スケールと都市スケールの2つモデルから構成される(図-3)。地域スケールモデルは、大気モデル(RAMS)と陸面モデル(SiBUC)で構成され、水平方向の計算領域としては260km×260km(格子サイズ2km×2km)、垂直方向に約14km(シグマ座標、25層、格子間隔0.1~1.2km、鉛直格子拡大率1.15)と設定した。地域スケールモデルでは、気象庁メソ客観解析データに関東メッシュに対しネスティング計算を行なった。陸面の設定としては、Atmospheric Meteorological and Environmental Technologies (ATMET)がRAMS用に提供している土地利用区分に従い、自然地はSiB2で定義されている9種類の植生分類と初期値を用い、都市域における建物形状情報については関東全域で建物面積比率を25%、平均建物高さを10mと一律に設定を行った。

都市スケールモデルは、大気モデル(RAMS)ー都市キャノピーモデル(SiBUC+AUSSSM+移流拡散方程式)ー陸面モデル(SiBUC)ー地下水モデル(MODFLOW)から構成される。対象領域は、水平方向に36km×36km(格子サイズ0.2km×0.2km)、垂直方向にはキャノピー構造は40m(25層、格子間隔1.6m)までとし、その上部に大気モデル(RAMS)が約5km(11層、格子間隔0.1m~1km)と設定を行った。都市スケールモデルでは、地域スケールの計算結果を川崎メッシュにone-way nestingすることで計算を行った。

都市スケールモデルでは、様々な土地利用用途が混在する都市域に対し、様々な都市環境改善技術・施策の導入効果の算定を想定し、200mメッシュに対してパッチ化を行った。都市キャノピーモデルから計算される地表面からの各土地利用用途からのフラックスは、キャノピー全体量として大気モデル(RAMS)に受け渡す構造となっている。しかし、本解析では気象モデルから都市キャノピーからの1方向で計算を行った。フラックスは、短波放射、長波放射、顕熱、潜熱、運動量を対象とし、土地利用区分を示すパッチ番号を*i*=1~5(1:水域、2:森

林, 3: 耕作地, 4: 公園/草地, 5: 都市域), 及び各パッチの面積比率を r_i とすると, 以下の式で表わされる.

$$S = \sum_{i=1}^n r_i S_i \quad (9)$$

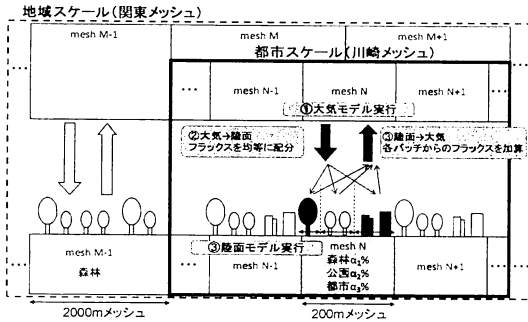


図-3 地域スケールおよび都市スケールの全体構造

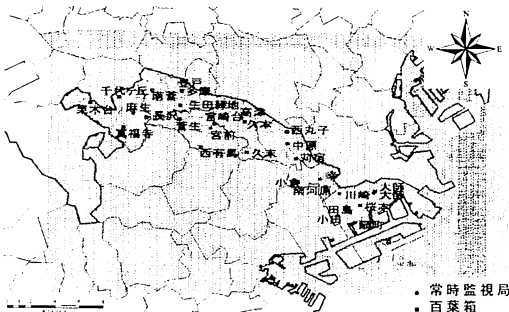


図-4 本研究の対象地および気象観測地点

シミュレーション期間は, 2006年8月1日~2006年8月31日の31日間とした. 時間ステップは関東メッシュにおけるRAMSでは5秒, 川崎メッシュにおけるRAMSで1.5秒, 都市キャノピーモデル内で2~30秒までスケール及びサブモデル間で可変とした. 本解析では, 計算時間を要するRAMSを先行して実施し, その後, その出力結果を都市キャノピー上面の境界条件として与えて計算を行った.

(3) 人工排熱データの算定

空調等に由来する建物排熱を, 国土交通省・環境省「平成15年度都市における人工排熱抑制によるヒートアイランド対策調査³⁷⁾」において整理された「建物排熱計算方法」に準じ算定した(図-5参照). 具体的には, 川崎市都市計画基礎調査建物情報から作成したGIS建物情報の建物規模・建物フロア別主用途より排熱原単位を選択し, フロア面積に乘以算定した. その際, 周辺都市である東京都・横浜市では, 建物フロア別主用途が得られないため, 一部川崎市の集計より作成した主用途別フロア主用途の割合を用い推計した.

さらに事業所建物のうち工場・清掃工場・火力発電所については, 燃焼施設からの排熱を「事業所排熱等の計算方法」に準じ算定し加算した. 具体的には, 川崎市については, 「大気汚染物質排出総合調査燃原料性状・標準値設定表1989年度実績」に内包される, 事業所ごとの燃料使用量に「平成17年度川崎市における都市排熱に関する推計業務に関する報告書」に示された燃料種別発熱量を乗じ, 事業所排熱の全体量を算定した. また, 事業所ごとの煙突関連データから煙突排熱量を算定した.

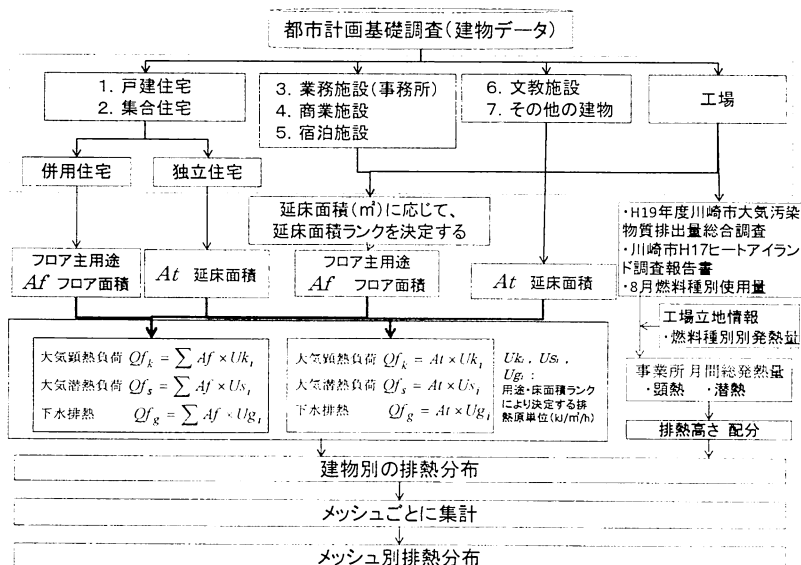


図-5 川崎市, 東京都, 横浜市における人工排熱量(東京, 横浜市の工場排熱を除く)の算定フロー

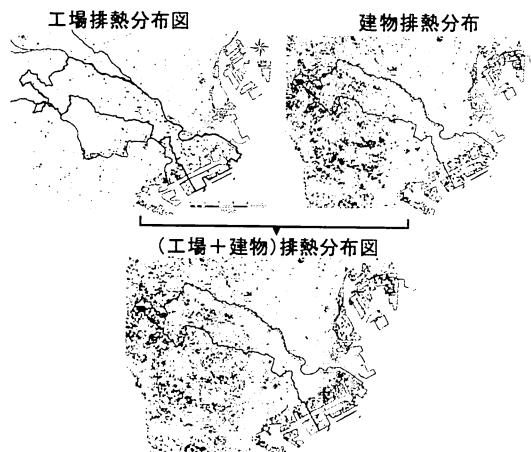


図-6 川崎市周辺における人工排熱分布

東京都・横浜市については、事業所ごとの詳細な情報が得られないため、川崎市の算定結果と、工業統計および川崎市GISデータの事業所敷地面積より、産業中分類およびそれに属さない工場別の、敷地面積に対する焼却施設からの排熱原単位を作成し、事業所排熱の全体量を算定した。煙突排熱については、横浜市の工場面積10,000㎡以上の建物を煙突ありと見なし、川崎市の算定結果より作成した排熱量の地上煙突比を用い算定した。川崎市、東京都、横浜市における人工排熱分布を図-6に示す。本解析では、川崎市内における排熱構造を三次元的に与えることで、都市キャノピー内に与える影響や土地利用被覆の改善効果の算定を目的としている。

4. モデルのパッチ化導入およびモデルの検証

メソスケール気象モデルにおける土地被覆の不均一性の再現精度については、計算目的によって大きく異なる。本研究では、行政レベルでの緑化導入や保水性舗装導入などを数百m単位の街区の都市設計に貢献することを目指している。このため、メソスケール気象モデルと連結した都市キャノピーモデル内の詳細な土地利用の再現の効果について、NICE-URBANモデルでのパッチ化導入前後の計算結果と観測結果の比較を行うことで、その有効性と精度向上について考察を行った。

(1) NICE-URBANモデルにおけるパッチ化導入

パッチ化を行わない場合、メソスケール気象モデルでの各メッシュの土地利用は最も被覆率の高い土地利用用途として割り当てられるため、それ以外に混在している土地利用用途からのフラックスについては無視される構造となっている。これまでの研究報告から、対象メッシュを更に小さなメッシュに分割するモザイク(Mosaic)化、

土地利用区分と割合を反映するパッチ(Patch, Tile)化、土地利用情報から決定される主用途でメッシュを代表させる(Aggregation)方法との比較・検討が行われてきている^{28, 32)}。本研究では、Aggregation法を評価基準とし、パッチ化を導入した場合の計算精度向上について検証を行った。

これまでのNICEモデルでは、陸面過程の計算はSiB2により計算しており、1つのメッシュに割り当てられる土地利用区分は1種類のみであった。従って、メッシュサイズより小さいスケールの土地利用で、主属性となる土地利用区分以外のフラックスへの影響は考慮されない構造であった。一方、NICE-URBANモデルでは、パッチ化を導入することにより単一メッシュ内に複数の土地利用を反映した計算が可能となり、陸面モデルの精度向上及び施策効果のより正確な評価が可能となる。

(2) モデルの再現性・検証

モデルの地上気温の再現性を検証するために、通常では気象庁による17~21km間隔で設置されたAMeDASによる観測値が利用されるが、本研究ではさらに狭い都市域の再現性を対象としているため、川崎市公害監視センターによって管理されている一般環境大気測定局9ヶ所のデータ、および川崎市公害研究所でさらに空間的に詳細に観測された20ヶ所の百葉箱データをモデル検証として利用した(図-4参照)。その結果、気象観測データは川崎市内の気象観測所間距離が0.5~5km(29地点)となる、空間的に高密度なデータでの検証が可能である。百葉箱を含めたモデル検証を行うことで、建物が密集する地域、自然地、さらには人工物と自然が混在する地域など様々な土地利用での再現性の検証が可能となる。

図-7に、代表的観測地点として菅生における百葉箱のデータとの比較図を示す。計算開始1-2日は助走期間となるため計算結果が大きく観測値と異なる値を示すが、それ以降は観測値に近づいていく。日温度変化に着目すると、最高温度が観測される時間はモデル結果が2-3時間ほど早く現れる傾向にある。原因としては都市キャノピー構造の代表性(建物高さ、建蔽率)や建物材質の熱伝導率や熱容量などの基礎物性の影響、更には都市キャノピー内鉛直分布算定における建物表面からの対流熱輸送効果の組み込みなどが考えられ、これらの都市域建物情報の高精度化は今後の課題となる。また、今回の広域スケールモデルでの計算では、降雨の再現性が十分に得られていない。田島観測所における降水データで広域スケールモデルの降雨再現性を確認したところ、8月8,9日で89mm、8月12日の9.5mm、8月16~18日27.5mm、8月25,26日で8mmと8月の1ヶ月間の総雨量が134mmとなっているが、モデル計算では79mmとなっており、この影響は図-7に示す都市スケールモデルの計算結果の再現性が悪

くなる原因となっている。

29地点の観測所における再現性の検証を表-2に示す。ここでは、二乗平均平方根誤差(RMSE)および相関係数を議論する。全観測地点平均でみると、都市キャノピーモデルにおける相関係数では0.72、RMSEは2.99℃となっている。相関係数では、小学校に設置されている百葉箱より、一般局の観測地点での再現性が悪いことが分かる。

(3) パッチによるモデル再現性の検証

本研究で行った、パッチ化による計算の有効性を検討するため、従来行ってきた非パッチ化との再現性の比較・検証を行った。図-7にパッチ化により相関係数、RMSEともに再現性が向上した菅生での時系列データを代表として示す。パッチ化導入の前後での算定結果の違いは、パッチ化導入により温度の日変動が大きくなることにあり、特に最高気温の再現性について向上が見られる。同様な傾向は、パッチ化による相関係数、RMSEがともに精度向上している南菅でも確認されている。これは、パッチ化導入前では観測地点を含むメッシュの土地利用面積比率が自然地は0.53、都市域が0.47であるため、このメッシュでは自然地として計算が行われたことによる。この観測地点は百葉箱が設置されている小学校や、住宅地が周辺に点在していることから、都市域としての扱いが適切である。今回のパッチ化では、菅生の観測地点のように、メッシュ内の土地利用が自然地と都市域が20～50%程度で混在している観測地点の再現精度が向上している(図-8参照)。

5. 緑化施策導入効果の評価

都市域の緑化は、ヒートアイランド緩和策として有望視されているだけではなく、生態回復や洪水防止や景観やリクリエーションの場としての生活空間の創出などを目的とした行政としての取り組みが行われてきている。しかし、行政単位での最適な緑化導入指針となる目標は論理的根拠に乏しく、その指針作成の根拠となる都市熱環境課改善技術評価モデル構築と評価はその解析ツールとしての利用が期待されている。現在までに、野外観測からは、緑地による夏季外気温低減効果が検証され、市街地気温と比べ0.5～3℃の温度低減効果が見られているとの報告³⁸⁻⁴¹⁾がなされてきている。一方で、都市緑地のヒートアイランドやエネルギー消費に対する影響評価研究^{6, 33)}は進められてきており、都市域における緑化導入効果を緑被率の増加に伴う外気温変化などのから環境影響評価について報告^{6, 23-24)}されてきている。その評価手法は、土地利用として導入可能最大面積の抽出を行い、全

緑化可能地への導入を想定した際の外気温温度低減効果やエネルギー消費活動へ与える影響評価まで進められている。

表-2 観測値および計算値の再現性の検証

地点名	RMSE		相関係数	
	Aggregation	Patch	Aggregation	Patch
大師	3.53	3.41	0.70	0.70
田島	2.33	2.33	0.72	0.72
川崎	3.64	3.64	0.70	0.70
幸	3.46	3.49	0.68	0.67
中原	3.24	3.17	0.72	0.72
高津	2.84	2.56	0.73	0.72
宮前	3.05	3.04	0.71	0.71
多摩	3.60	3.45	0.71	0.71
麻生	3.62	3.55	0.70	0.69
大師(小学校)	2.80	2.65	0.76	0.76
桜本(小学校)	3.50	3.46	0.76	0.76
小田(小学校)	3.47	3.47	0.75	0.75
南河原(小学校)	3.01	2.93	0.77	0.77
小倉(小学校)	3.39	3.33	0.77	0.77
荏宿(小学校)	3.36	3.35	0.77	0.77
西丸子(小学校)	3.12	3.11	0.78	0.78
久本(小学校)	3.02	3.00	0.77	0.77
久末(小学校)	2.08	2.79	0.64	0.72
西有馬(小学校)	2.98	2.89	0.78	0.78
菅生(小学校)	2.23	2.20	0.72	0.77
宮崎台(小学校)	2.89	2.87	0.76	0.76
登戸(小学校)	3.38	3.37	0.77	0.77
南菅(小学校)	2.23	2.18	0.68	0.71
長沢(小学校)	2.72	2.69	0.77	0.75
千代ヶ丘(小学校)	2.97	2.77	0.78	0.78
真福寺(小学校)	2.45	2.70	0.68	0.74
栗木台(小学校)	2.82	2.78	0.77	0.77
扇町(臨海部)	2.06	1.90	0.65	0.74
生田緑地	2.99	2.98	0.52	0.52

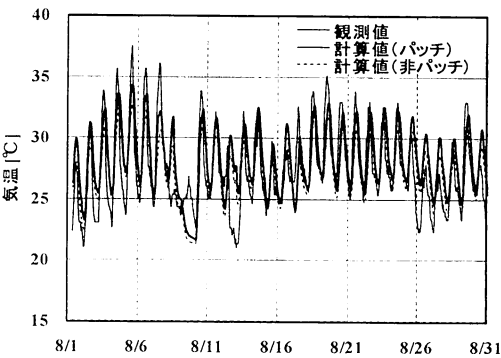


図-7 観測データと計算値の比較(菅生)

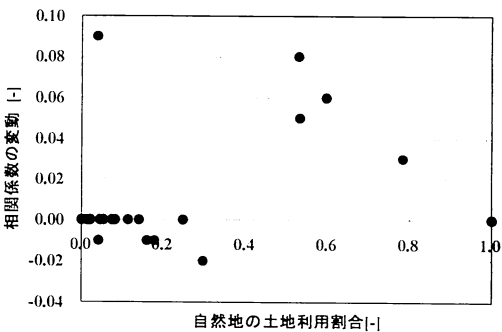


図-8 土地利用と再現性の向上

(1) 緑化導入条件

川崎市における住宅および事業系建物を対象とした緑化指針²⁾としては、川崎市緑の保全及び緑化の施策に関する条例³⁾があげられる。本指針では、公園における緑化面積率を30%に、公共公益施設においては建築敷地面積1,000㎡以上を対象に、その10%以上の緑地化を奨励している。平成19年8月1日現在で74事業所が達成している。この他、住宅地および事業所では建築敷地面積の20%と10%以上の緑化面積率の導入を考えている。更に、工場立地法の改正により条例による緑地面積率の緩和が可能となり、川崎市では都市計画法の工業専用地域の区域について緑地の面積の敷地面積に対する割合を15%と定めている。本計算では、これらの川崎市の条例での緑化面積率を参考にし、緑化施策導入効果の算定を行った。また、積極的な緑化強化策として、敷地内で建物が建っていない部分を緑化し、さらに公園の緑被率を100%にする、緑化導入可能な全地域での実施を想定した条件設定を行った。以上より本論文における計算条件としては、(1)川崎市条例に即した緑化面積率分の導入(表-3参照)(2)緑化導入可能な全地域での緑化の2条件を、現状計算を基に比較することで、その外気温の冷却効果など評価を進めていく。

表-3 川崎市における緑化施策目標

施策	主体	対象	規模	緑化面積率
川崎市緑の保全及び緑化の推進に関する条例	公有地	公園	街区公園程度	30%以上
		公共公益施設	建築敷地面積1,000㎡以上	建築敷地面積の10%以上
	民有地	住宅	事業区域面積が500㎡以上でかつ、計画戸数20戸以上の共同住宅	建築敷地面積の20%以上(近隣商業地域及び商業地域は、建築敷地面積の10%以上) ※用途地域がまたがる場合は面積積分とする
		事業所	建築敷地面積1,000㎡以上	建築敷地面積の10%以上
工場立地に関する地域準則を定める条例(工場立地法に基づく)		工業専用地域	—	敷地面積に対し15%以上

(2) 緑化導入による外気温低減効果

都市スケールモデルにおいて、降雨が見られず、気象観測値とよい相関性が得られた2006年8月19日～25日の期間のデータを用いて、緑化導入効果について検証を行った。

図-9は、現状計算と2つの緑化導入条件について、解析対象期間において、川崎市内全メッシュを用いて地上1.6m外気温の平均値を算出し、時系列で比較を行った結果を示す。この結果、緑化施策実施では、地上1.6mの高さでは日最高気温で0.1℃の温度低減効果が見られるが、最低気温については現状と変わらない傾向を示す。一方、緑化導入可能な土地全面での実施では、日最高気温では約3℃、最低気温でも0.6℃程の温度低減効果が見られた。次に、解析対象期間において、川崎市内全メッシュを

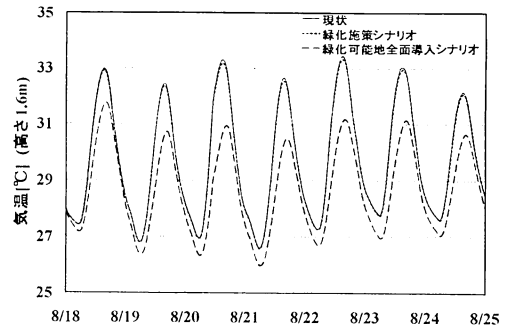


図-9 緑化導入による気温低減効果

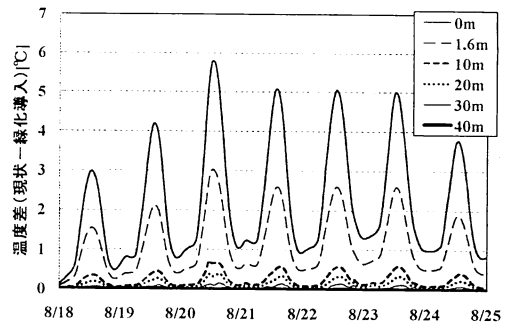
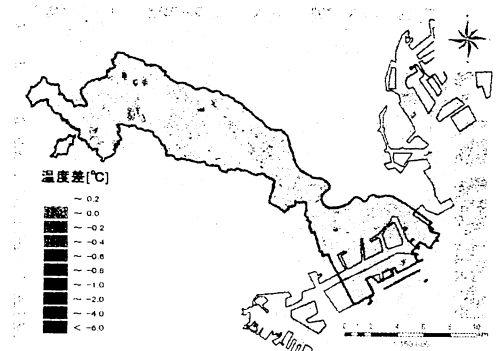
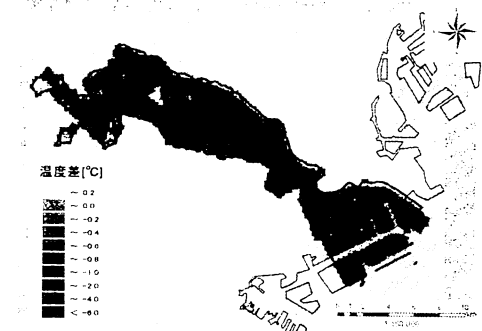


図-10 緑化導入による垂直方向での気温低減効果



(a) 緑化施策シナリオ



(b) 緑化可能地全面導入シナリオ

図-11 緑化導入による気温低減効果：

(2006年8月21日 14:00、現状－緑化条件での温度差分布図)

用い各鉛直高さの平均気温を算出した。この結果を用いて、現状計算と緑化導入可能な土地全面での実施ケースとの温度差の算定結果を図-10に示す。この結果、地表面では約5℃前後の温度低減効果が確認され、垂直方向でも約30mまでは約0.1℃の冷却効果が見られている。平野ら(2004)²⁷⁾は、東京都23区での緑化による温度低減効果算定を行っており、高さ6.5mで夏季に0.7℃の気温低下が生じるとしているが、本研究での結果からも同じ高さでは約1℃の温度低減効果が見られている。これは、緑化による気温低減が空調負荷削減率を高めるためには、空調機器が集中する場所に緑地を配置することが望ましく、主に住宅など1階からの排熱が考えられる土地利用では、芝生や植栽などによる効果は高いものと考えられる。更に、集合住宅や業務建物で各階に空調機器が設置されている場合では、高さが増すに伴い緑化による温度低減効果は減少するが、約30m程度まではその冷却効果が及ぶものと考えられる。

緑化による温度低減効果分布を図-11に示す。川崎市内において緑化導入可能な土地全域に適用した場合、工場が立地する臨海部で最大6℃以上の温度低減効果が見られている。本結果では、特に臨海部の工業地帯で緑化導入可能地が多いためにこのような分布になったと考えられる。一方、緑化施策条件における温度低減効果としては、川崎市全体では0.6℃程度の抑制効果が見られ、特に川崎市内陸部の住宅地で顕著に見られている。つまり、川崎市における土地利用および緑化施策実施による温度低減効果としては、住宅地域における温度低減効果が考えられる。

6. 緑化施策導入による空調負荷削減効果の算定

(1) エネルギー消費量算定方法

本モデルは、都市キャノピーモデル内の運動量、熱、水蒸気の鉛直一次元基礎式はAUSSSMの構造を用いているが、AUSSSMに含まれる空調負荷計算のサブモデルの組み込みは行っていない。そこで、NICE-URBANモデルの解析結果から得られる外気温鉛直分布より、各建物についてフロアごとに吸気口周辺の外気温を用いて、空調エネルギー消費量の算定を行った。現状計算条件と緑化施策導入条件の算定結果の差を、空調エネルギー消費およびCO₂削減量として評価する。

本研究では、建物が受ける負荷のうち、緑化導入による効果が反映される外気負荷を対象とする。貫流熱負荷の算定式を式(10)、(11)、日射負荷の算定式を式(12)、(13)に示す。貫流熱負荷、日射負荷からなる、外気負荷による空調エネルギー消費量の算定については式(14)を用いる。

$$Q = \frac{\left\{ \sum (A_i K_i H_i) + \sum_i (L_{Fi} K_{Li} H_i + A_{Fi} K_{Fi}) + 0.3nB \right\}}{S} \quad (10)$$

Q : 熱損失係数[W/m²・K], A_i : 部位の面積[m²]
 K_i : 部位の熱貫流率[W/m²・K],
 L_{Fi} : 土間床等の外周長さ[m],
 K_{Li} : 土間床等の外周に対する熱貫流率[W/m²・K],
 H_i : 外気等の区分に応じて定まる温度差係数,
 A_{Fi} : 土間床等の中央部の面積[m²],
 K_{Fi} : 土間床等の中央部に対する熱貫流率[W/m²・K]
 n : 自然換気回数[回/h],
 B : 気積[m³], S : 床面積[m²](i : 部位の種類)

$$q_o = Q \times S \times \Delta t \quad (11)$$

q_o : 貫流熱による負荷[W], Δt : 室内外温度差[K]

$$\mu = \frac{\{ \sum (\sum A_{ij} \eta_{ij}) v_j + \sum A_{ri} \eta_{ri} \}}{S} \quad (12)$$

μ : 日射取得係数[-], A_g : 外気に接する壁面積[m²],
 η_g : 壁の日射侵入率[-],
 v_j : 方位係数[-], (j は方位を表す)
 A_n : 屋根の水平投影面積[m²],
 η_n : 屋根又は当該屋根の直下の天井の日射侵入率[-]

$$q_s = \mu \times S \times J \quad (13)$$

q_s : 日射による負荷[W], J : 日射量[W/m²]

$$q = (q_o + q_s) / \varepsilon \quad (14)$$

q : 空調エネルギー消費量[W] ε : 空調機の成績係数
 なお、空調稼働時間中は、室温は常に設定温度に維持されると仮定し、外気温が設定温度を超える時のみ空調を使用することとする。部材の性能等の建物の用途・構造別に設定したそれぞれの物性値を表-4に示す。

本研究では、空調エネルギー消費算定対象を、木造・非木造住宅および事業所建物とし、それぞれの空調稼働時間⁴³⁾は住宅を6～9時・12～14時・16～22時、事業所を8～18時、年間の稼働期間⁴⁴⁻⁴⁵⁾は住宅が112日間、事業所が207日間、設定温度を27℃⁴³⁾のとして算定を行った。

表-4 建物用途・構造別の定値一覧

記号		部位	建物用途			出典
			木造住宅	その他住宅	事業所(店舗併用倉庫)	
K_i 熱貫流率 [W/m ² ・K]	$i=g$	窓		5.75		住宅:省エネルギー対策等級3級 その他:設計用最大熱負荷計算法
	$i=r$	屋根天井	0.59	0.67	0.59	
	$i=w$	壁	1.2	1.11	0.92	
	$i=f$	床	1.03	1.26	0.92	
	$i=fo$	1F床	1.03	1.26	-	
H_i 温度差係数	$i=o$	居室と外気	1			省エネルギーハンドブック
	$i=h$	居室と床裏	0.6			
部位の日射侵入率	$i=w$	窓	0.83			
	$i=r$	屋根天井	0.04			
v_j 方位係数	$i=東・西$	東・西	0.45			
	$i=南$	南	0.49			
	$i=北$	北	0.24			
n	自然換気回数[回/h]		1	0.6	0.6	
ε	空調機成績係数		3.3			

(2) 緑化導入による空調エネルギー削減効果の算定

本研究では、都市内のエネルギー消費活動と都市水熱環境の空間分布および時間変化を反映した形で、緑化導入効果の算定が可能となっている。特に、空調排熱から外気温へのフィードバック効果や、工場排熱までも含めた局所的な高温化の再現が可能にし、それによる緑化の温度低減効果の算定を主眼としている。

緑化導入による外気温低減効果が空調エネルギー負荷に与える影響を評価した。その結果、住宅用建物における空調エネルギー消費量は、現状、緑化施策シナリオ、緑化可能地全面導入シナリオの各条件では、3.664 GWh/day, 3.654 GWh/day, 3.518 GWh/dayとなった。一方、業務用建物における現状、緑化施策シナリオ、緑化可能地全面導入シナリオでの空調エネルギー消費量は、1.231 GWh/day, 1.227 GWh/day, 1.179 GWh/dayとなった(図-12参照)。

ここで算出された現状計算での空調エネルギー使用量を、報告されている統計データをもとに検証を行った。まず、住宅(家庭)部門における冷房使用エネルギーの延べ床面積当たりのエネルギー消費量で比較を行った。全国を対象とした家庭用用途別エネルギー消費原単位の推移データでは、2006年における冷房による消費量は902 MJ/(世帯・年)⁴⁶⁾と報告されており、これに世帯数、戸数、住宅の建て方別平均床面積データを用いて算出した結果、1年あたりで10.9 MJ/m²のエネルギー消費量に相当する。一方、本モデルで計算された結果を、同様な延べ床面積当たりのエネルギー消費量に換算すると44.5 MJ/m²と統計データより大きい値を示している。値が異なる原因としては、モデル計算では住宅に相当するフロア・建物全てに空調機器が設置されていると仮定している点、空調機器が想定している時間帯、設定温度で実際には稼働してない可能性などが考えられる。

業務部門についても、報告されている冷房の業務部門床面積当たり用途別エネルギー消費量の推移データをもとに比較を行った。その結果、統計データ⁴⁷⁻⁴⁸⁾でばらつきはあるものの、1年あたりで120~186 MJ/m²のエネルギー消費量と報告されている。一方のモデル計算から算定された冷房によるエネルギー消費量は62.3 MJ/m²となり、統計データより小さい値を示している。これまで建物用途別の空調負荷に関する報告では、事務所および商業系ビルのような業務系では貫流熱負荷を上回る建物内部負荷が発生するといわれている⁴⁹⁾。本研究における空調負荷の算定では、室内におけるOA機器、照明、給湯の利用による建物内部からの発熱を考慮していないことから、実際の空調エネルギー使用量よりも少なく見積る結果になったと考えられる。この他、計算条件とした空調機器の稼働時間が短いことも原因として考えられる。

以上より、住宅および業務を対象とした、建物内部熱負荷量を含まない外気負荷から算定される緑化による空調エネルギー消費量削減効果としては、1日当たり14 MWh、緑化可能地全面の場合には197MWhのエネルギー消費削減となる。

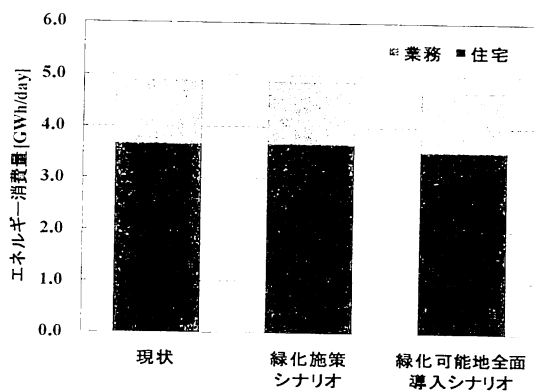


図-12 緑化導入による住宅および業務用建物における空調エネルギー負荷削減効果の算定

7. おわりに

本研究では、これまでに開発してきた陸域統合型NICEモデルをベースに、アスファルトや建物で覆われた人工地を対象とした都市キャノピーモデル及び大気モデル等を結合することにより、都市域の統合的な水熱収支解析が可能なNICE-URBANモデルを構築した。本モデルを用いることによって、都市熱環境改善として緑化施策導入による水熱循環の変化に及ぼす導入効果の予測シミュレーションを行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 統合型流域モデルに都市キャノピーモデルを組み込み、局所大気モデルと結合させたNICE-URBANモデルを構築した。また、建物空調機器からの人工排熱からの顕熱・潜熱フラックスを考慮し、その排出位置も建物用途別に与えるサブモデルの組み込みを行った。
- (2) NICE-URBANモデルにおいて、川崎市を中心としたモデルの検証を行った。計算結果は観測値と良い近似性が得られ、都市キャノピーモデルにおけるパッチ化の導入により、土地利用の再現性およびモデル計算精度の向上が確認された。特に、都市域および自然地が混在するメッシュでの精度向上が確認された。
- (3) 本解析では、都市キャノピーモデル内における三次元温度分布の算定結果および建物情報(フロア高さ、用途別)を用いることで、建物構造を考慮した緑化による外気温負荷低減効果の算定、更には空調エネルギー消費

削減量に与える影響評価が可能となった。

(4) 川崎市において緑地導入可能な土地全面への導入を行った場合、高さ1.6mでの川崎市全域平均気温では、0.6~3℃、緑化施策では最大で0.6℃程度外気温が低下する。また、その冷却効果は高さ30mまで及ぶ。

(5) 川崎市を対象とした住宅・業務部門における緑化導入において、建物内部熱負荷量を含まない外気負荷から算定される空調エネルギー消費量削減効果としては、緑化施策導入により1日当たり14MWh、緑化可能地全面の場合は197MWhのエネルギー消費削減効果があることが明らかになった。

謝辞：本研究は環境省・地球環境研究総合推進費(研究代表:藤田 壮)及び環境省・地球温暖化対策技術開発事業(課題代表:藤田 壮)の一貫として行われた。

参考文献

- 1) ヒートアイランド実態解析調査検討委員会：平成12年度ヒートアイランド現象の実態解析と対策のあり方について 報告書、社団法人環境情報科学センター、2001。
- 2) 亀掛川幸浩：都市温暖化対策の総合的評価システムの開発、明星大学研究成果報告会、2007。
- 3) 田村英寿、石井康一郎、横山仁、岩坪哲四朗、平口博丸、安藤晴夫、山口隆子、市野美夏、秋山祐佳里、三上岳彦：東京23区におけるヒートアイランド対策導入効果の数値予測、東京環境科学研究所年報、2005。
- 4) 二浦尾友佳子、橋本早紀、鳴海大典、下田吉之、水野稔：ヒートアイランド緩和対策による気温変化がエネルギー消費に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.581-582、2006。
- 5) 井原智彦、相田洋志、吉田好邦、半田隆志、松橋隆治、石谷久：都市熱環境を考慮した高反射高放射塗料導入による建築物のCO₂排出削減効果の評価、第19回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、pp.655-660、2003。
- 6) 平野勇二郎：ヒートアイランド緩和策の気温低下効果とそのエネルギー消費量への影響 東京都心部の地上緑化を対象とした夏季・冬季のケーススタディー、日本建築学会環境系論文集No.591、pp.75-82、2005。
- 7) 土田 えりか、角田 智彦、堀 紘子、藤田壮、中山 忠暢、高橋 克則、坂本 義仁：都市舗装改善技術による熱環境変化を評価する都市熱代謝評価モデルの構築と実証検証、環境情報科学論文集、Vol.21、pp.381-386、2007。
- 8) Nakayama, T. and Watanabe, M. : Simulation of drying phenomena associated with vegetation change caused by invasion of alder (*Alnus japonica*) in Kushiro Mire, *Water Resources Research*, Vol.40, W08402, doi: 10.1029/2004WR003174, 2004.
- 9) 東アジアの流域圏における生態系機能のモデル化と持続可能な環境管理プロジェクト(中間報告)、国立環境研究所特別研究報告、SR-58-2003, 2003.
- 10) Nakayama, T., and Watanabe, M. : Simulation of spring snowmelt runoff by considering micro-topography and phase changes in soil layer, *Hydrology and Earth System Science Discussions*, 3, pp.2101-2144, 2006.
- 11) Nakayama, T., Yang, Y., Watanabe, M. and Zhang, X. : Simulation of groundwater dynamics in the North China Plain by coupled hydrology and agricultural models, *Hydrological Processes*, Vol.20, pp.3441-3466, 2006.
- 12) Nakayama, T., Watanabe, M., Tanji, K., and Morioka, T. : Effect of underground urban structures on eutrophic coastal environment, *Science of the Total Environment*, 373(1), pp.270-288, doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.11.033, 2007.
- 13) Nakayama, T., and Watanabe, M. : Missing role of groundwater in water and nutrient cycles in the shallow eutrophic Lake Kasumigaura, Japan, *Hydrological Processes*, 22, pp.1150-1172, doi: 10.1002/hyp.6684, 2008.
- 14) Nakayama, T., Watanabe, M. : Role of flood storage ability of lakes in the Changjiang River catchment, *Global and Planetary Change*, 63, pp.9-22, doi: 10.1016/j.gloplacha.2008.04.002, 2008.
- 15) Nakayama, T. : Simulation of hydrologic and geomorphic changes affecting a shrinking mire, *River Research and Applications*, 25, doi: 10.1002/rra.1253 (in press).
- 16) Nakayama, T. : Factors controlling vegetation succession in Kushiro Mire, *Ecological Modelling*, Vol. 215, pp.225-236, 2008.
- 17) Nakayama, T. : Shrinkage of shrub forest and recovery of mire ecosystem by river restoration in northern Japan, *Forest Ecology and Management*, 256, pp.1927-1938, doi: 10.1016/j.foreco.2008.07.017, 2008.
- 18) Pielke, R. A., Cotton, W. R., Walko, R. L., Tremback, C. J., Lyons, W. A., Grasso, L. D., Nicholls, M. E., Moran, M. D., Wesley, D. A., Lee, T. J., Copeland, J. H. : A comprehensive meteorological modeling system-RAMS, *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 49, pp.69-91, 1992.
- 19) Sellers, P. J., Randall, D. A., Collatz, G. J., Berry, J. A., Field, C. B., Dazlich, D. A., Zhang, C., Collelo, G. D. and Bounoua, L. : A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I : Model formulation, *Journal of Climate*, Vol. 9, pp. 676-705, 1996.
- 20) 田中賢治、池淵周一：都市域・水体をも考慮した蒸発散モデルの構築とその琵琶湖流域への適用、京都大学防災研究所年報、第37号B-2、pp.299-313, 1994.
- 21) 環境省環境技術開発等推進事業：都市・流域圏における自然共生型水・物質循環の再生と生態系評価技術開発に関する研究、平成18年度研究成果最終報告書、2003.
- 22) 萩島 理、谷本 潤、片山 忠久、大原 健志：改良・建築一都市一土壌連成系モデル(AUSSM)による都市高温化の構造解析 第1報 モデルの理論構成及び標準解、日本建築学会計画系論文集、No.550, pp.79-86, 2001.
- 23) Sailor, D. J. : Simulated urban climate response to modifications in surface albedo and vegetative cover, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 34, pp. 1694-1704, 1995.
- 24) Sailor, D. J. : Simulations of annual degree day impacts of urban vegetative augmentation, *Atmospheric Environment*, Vol. 32, pp. 43-52, 1998.
- 25) Taha, H. : Modeling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the South Coast Air Basin, *Atmospheric Environment*, Vol. 30, pp. 3423-3430, 1996.
- 26) Avissar, R. : Potential effects of vegetation on the urban thermal environment, *Atmospheric Environment*, Vol. 30, pp. 437-448, 1996.
- 27) 平野勇二郎、安岡善文、一ノ瀬俊明：衛星リモートセンシングとメソスケール気象モデルを用いた都市緑地のヒートアイランド緩和効果の評価、環境科学会誌、Vol.17(5)、pp.343-358, 2004.
- 28) Avissar, R. and Pielke, P. A. : A parameterization of heterogeneous land surfaces for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology, *Monthly weather review*, Vol. 117, pp. 2113-2136, 1989.

- 29) Ament, F. and Simmer, C. : Improved representation of land-surface heterogeneity in a non-hydrostatic numerical weather prediction model, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 121, pp. 153-174, 2006.
- 30) Heinemann, G. and Kerschgens, M. : Simulation of surface energy fluxes using high-resolution non-hydrostatic simulations and comparisons with measurements for the LITFASS-2003 experiment, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 121, pp.193-220, 2006.
- 31) Kimura, F. : Heat flux on mixtures of different land-use surface : Test of a new parameterization scheme, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 67, pp.401-409, 1989.
- 32) Avissar, R. : Potential effects of vegetation on the urban thermal environment, *Atmospheric Environment*, Vol. 30(3), pp. 437-448, 1996.
- 33) Ohashi, Y., Genchi, Y., Kondo, H., Kikegawa, Y., Yoshikado, H. and Hirano, Y. : Influence of air-conditioning waste heat on air temperature in Tokyo during summer: Numerical experiments using an urban canopy model coupled with a building energy model, *Journal of applied Meteorology and Climatology*, Vol. 46, pp.66-81, 2007.
- 34) ヴタンカ, 足永靖信, 浅枝隆 : 都市大気境界層の乱流モデリング, 都市建築計画における都市気候予測システムの開発 その1, 日本建築学会計画系論文集, No.536, pp.95-99, 2000.
- 35) 足永靖信, ヴタンカ : 空間平均処理を施した3次元都市キャノピーモデルの開発, 都市建築計画における都市気候予測システムの開発 その2, 日本建築学会計画系論文集, No.586, pp.45-51, 2004.
- 36) 原山和也, 大岡龍三, 村上周三, 吉田伸治, 瀬戸島政博, 近藤裕昭 : 都市キャノピーモデルを組み込んだメソスケールモデルによる関東地方の都市気候解析, 日本建築学会環境系論文集, No.592, pp.75-82, 2005.
- 37) 平成15年度新全国総合開発計画推進調査費 : 平成15年度都市における人工排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書, 国土交通省・環境省, 2004.
- 38) Yu, C. and Hien, W. N. : Thermal benefits of city parks, *Energy and buildings*, Vol. 38, pp. 105-120, 2006.
- 39) 塩野修平, 成田健一, 三坂育正, 石井康一郎 : 都市内緑地のヒートアイランド緩和効果の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 40316, 2007.
- 40) 橋田祥子, 大森宏, 加治屋亮一, 酒井孝司 : 4つの異なる緑化形態の環境緩和効果に関する実測研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 40317, 2007.
- 41) 山田裕明, 村上公哉 : 夏期日中の緑地規模によるにじみ出し冷却効果の違いに関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 40301, 2006.
- 42) 川崎市 : 緑の保全及び緑化の推進に関する条例, 平成11年川崎市条例第49号
- 43) 宇田川光弘 : 標準問題の提案(住宅用標準問題), 日本建築学会環境工学委員会熱分科会 第15回熱シンポジウム, pp.23-33, 1985.
- 44) 小熊孝典, 井上隆, 水谷傑, 矢野慶一, 田中俊彦 : 全国規模アンケートによる住宅内エネルギー消費の実態調査その9 冷房に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.199-200, 2006.
- 45) (社)日本冷凍空調工業会 : パッケージエアコンディショナーの期間エネルギー消費効率, JRA4048, 2006.
- 46) 住環境計画研究所編 : 家庭用エネルギーハンドブック, pp. 41-103, 省エネルギーセンター, 2009.
- 47) 日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット編 : エネルギー・経済統計要覧, pp.116-117, 省エネルギーセンター, 2009.
- 48) 資源エネルギー庁 総合政策課エネルギー政策企画室 : 平成19年度(2007年度)エネルギー需給実績, 経済産業省, 2008.
- 49) 原田雄介, 村上周三, 大岡龍三, 原山和也, 佐藤大樹, 川本陽一 : 空調排熱計算を連成させた局地気候モデルによる都市気候解析, 日本建築学会環境系論文集, No. 597, pp.65-71, 2005.

DEVELOPMENT OF MULTI-SCALE URBAN ENVIRONMENTAL SPACE ANALYTICAL MODEL AND EVALUATION OF URBAN GREENING EFFECTS ON AIR-CONDITIONING ENERGY CONSUMPTION

Hiroyuki HAMANO, Tadanobu NAKAYAMA, Hiroko HORI,
Tsuyoshi FUJITA and Hirotaka TAGAMI

It developed the multi-scale urban environmental space analytical model (NICE-URBAN) to estimate the urban climate mitigation effects and the air-conditioning energy consumption reduction for introduction of urban heat environment mitigation technology and scenario. The NICE-URBAN model is the multi-scale model coupled the process-based NIES integrated catchment-based eco-hydrology model to the mesoscale meteorological model and the urban canopy model. And the introduction of patch method into urban canopy model leads to the good approximation compared with weather observation data. By using this model, it estimated that about 14 MWh/day and 197MWh/day of air conditioning energy consumption energy for the house and office buildings without the effect of building inner load were reduced by introducing the greening regulation of Kawasaki city and ideal maximum greening area during August 2006.