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

空調排熱モデルの開発とヒートアイランド緩和方策の効果に対する検討

URBAN CLIMATE ANALYSIS BASED ON LOCAL CLIMATE MODEL
COUPLED WITH HEAT RELEASE MODEL THROUGH AIR CONDITIONINGDevelopment of heat release model through air conditioning and study on effects
of countermeasures for urban heat island原田 雄介^{*1}, 村上周三^{*2}, 大岡 龍三^{*3}原山 和也^{*4}, 佐藤 大樹^{*1}, 川本 陽一^{*5}Yusuke HARADA, Shuzo MURAKAMI, Ryozo OOKA,
Kazuya HARAYAMA, Taiki SATO and Yoichi KAWAMOTO

Local climate model incorporated with the urban canopy model as the boundary conditions have been developed. In this paper, the model is coupled with the heat release model through air conditioning in order to evaluate heat transfer between the atmosphere and the building. Furthermore, the authors analyze the urban environment based on the new local climate model, and examine the effects of various countermeasures for urban heat island, the roof planting, high albedo roof coating, the high efficiency of air conditioning system and the 50% reduction of internal heat. As a result, it is clarified that these countermeasures have an effect on the temperature field of the pedestrian space near the ground. In particular, the roof planting has possibilities for the reduction of air temperature near the ground by 0.20-0.40 °C in the daytime.

Keywords: Heat Release Model through Air Conditioning, Urban Canopy Model, Local Climate Model, Urban Heat Island

空調排熱モデル、都市キャノピーモデル、局地気候モデル、ヒートアイランド現象

1. はじめに

近年、ヒートアイランド現象の深刻化に伴い、都市の暑熱環境は悪化の一途を辿っている^{※1)}。ヒートアイランド緩和方策の有効な検討手法の1つに、局地気候解析がある。しかし、従来の局地気候解析^{※2)}では、地表近傍の建物や樹木等の流体力学の影響を粗度長の値によってモデル化しており、キャノピー層内を格子分割できなかった。そこで筆者らは、都市キャノピーモデルを地表面境界条件に組み込んだ局地気候モデルの開発によりこれを可能としてきた^{※3)}。

一方、都市大気を加熱する源として、人工排熱は約2割を占めており、都市温暖化の原因の1つと考えられている。特に、建物からの排熱割合はその多くを占め、都心部においては、全人工排熱の4~5割程度であるとの報告がある^{※4)}。そのため、人工排熱とヒートアイランド現象の相互影響を解明し、実効的な対策の検討を進めるためには、局地気候解析と建物の空調排熱計算を連成させ、都市熱環境の予測プロセスに組み込む必要がある。しかし、従来の筆者らのモデル^{※5)}において、建物内の空調負荷は与条件として与える人工排熱の一部として扱い、東京都のエネルギー消費関連資料^{※6)}を参考として地表面の熱収支式、及び温位や水蒸気混合比の輸送方程式に組み込んでいた。

そこで本研究では、外気温等に応じた建物内への各種熱移動を物理

的なメカニズムに基づいて計算し^{※7)}、そこから得られる空調排熱量を算出するモデル(以下、空調排熱モデル)を構築し、先述の都市キャノピーモデルを地表付近の境界条件に組み込んだ局地気候モデル^{※3)}との連成を行う。さらに、空調排熱モデルを組み込んだ新しい局地気候モデルを用いて、ヒートアイランド現象緩和方策が、空調排熱量と屋外歩行者空間を含めた都市熱環境に及ぼす影響の検討を行う。

2. 空調排熱モデルの概要

図1に本解析で局地気候モデルに組み込んだ空調排熱モデルの概要を示す。具体的には、①建物躯体からの貫流熱負荷、②窓面を透過する日射熱負荷、③外気導入に伴う換気熱負荷、④建物の内部熱負荷、という建物の空調負荷を構成する各種熱負荷を物理現象に基づいて詳細にモデル化し、都市キャノピーモデルの組み込まれた局地気候モデルに組み込んだ。本研究では全建物を、戸建住宅・集合住宅・事務所系ビル・商業系ビルの4通りの用途に大別し、それぞれについて①~④の各種熱負荷を算出し、解析メッシュにおけるそれぞれの棟数と総延床面積から、各メッシュの空調排熱の総量を決定した^{※8)}。これによって、従来のモデルと比較し、より高精度な解析が可能になるとともに、検討可能なヒートアイランド緩和方策の項目が大幅に増加する。以下に空調排熱モデルの詳細を示す。

^{*1} 慶應義塾大学大学院 大学院生

^{*2} 慶應義塾大学理工学部 教授・工博

^{*3} 東京大学生産技術研究所 助教授・博士(工学)

^{*4} 俣山武 博士(工学)
(当時 東京大学大学院)

^{*5} 東京大学大学院 大学院生

Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Keio University
Prof., Faculty of Science and Technology, Keio University, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Ph. D.
Yamatake Corporation, Ph. D.

Graduate Student, University of Tokyo

① 建物躯体からの貫流熱負荷 Q_C

局地気候解析により得られる建物屋上面温度と建物壁面温度 θ_{WALL} を用いて、(1) 式に示す壁体中の非定常熱伝導計算を行い室内側の壁面温度 θ_{Wij} を求める。ただし、窓を通過する熱貫流量については、窓の熱容量が十分に小さいと考え、非定常計算を行わず定常の熱貫流計算を行っている。これを用いて、建物 1 棟当たりの天井または壁（いわゆる、壁体面と窓面を面積加重したもの）から室内への対流熱伝達による熱の流入量を (2) 式により算出する。室温 θ_i は、非空調時には 1 時刻前までに算出されている自然室温、空調時には設定温度で固定する。本報では空調時を想定し、26℃一定とする。本モデルでは、建物の種類によらず均等街区を仮定しているため、1 メッシュの建物別棟数 K_j （注 2）をこれに乘じることで、1 メッシュの貫流熱負荷の合計値 Q_{C_ALL} を求める ((3) 式)。また、建物壁体の構成は、文献 9 を参考に、全ての建物種類について図 2 のように設定する。

$$\rho_w C_{PW} \frac{\partial \theta_{WALL}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial \theta_{WALL}}{\partial x} \quad (1)$$

$$Q_{Cj} = \alpha \left\{ \sum_{i=1}^4 A_{Wij} (\theta_{Wij} - \theta_i) \right\} + A_{Rj} (\theta_{Rj} - \theta_i) \quad (2)$$

$$Q_{C_ALL} = \sum_{j=1}^4 Q_{Cj} K_j \quad (3)$$

ρ_w : 壁体の密度 [kg/m³], A_{Rj} : 屋上面積 [m²]
 A_{Wij} : 壁面積 (窓面を含む) [m²], λ : 壁体の熱伝導率 [W/m K]
 α : 室内側対流熱伝達率 (4.0) [W/m² K], θ_{WALL} : 壁体の温度 [°C]
 θ_{Wij} : 室内側壁面温度 (窓面を含んだ重み付け平均温度) [°C]
 C_{PW} : 壁体の比熱 [J/kg K], θ_{Rj} : 室内側天井面温度 [°C]
 θ_i : 室内の温度 [°C], K_j : 1 メッシュの建物別棟数
 添字 i : 壁面の番号 (1~4 が東西南北の各面を示す。)
 添字 j : 建物分類番号 (1~4 が建物種類を示す。)

② 窓面を透過する日射熱負荷 Q_S

建物壁面の窓面積率 R_{Wj} に応じて窓が存在するものとし、直接窓面に入射する成分と他の面で反射した後に入射する成分 (1 回反射まで) を考慮して (4) 式より建物 1 棟当たりの窓面透過日射負荷を算出する。そして、(5) 式より 1 メッシュの窓面透過日射負荷の合計値 Q_{S_ALL} を求める。また、日陰、天空率、反射計算等の詳細については、文献 3 を参照されたい。戸建住宅・集合住宅は単層透明ガラス (3mm)、事務所系ビル・商業系ビルは単層熱線吸収ガラス (8mm、中間色ブラインド) で構成されているものとし⁹⁾、窓の種類毎に日射遮蔽係数 k_j を決定している。

$$Q_{Sj} = \sum_{i=1}^4 \{ R_{Wj} A_{Wij} (1 - k_j) S_{Wij} \} \quad (4)$$

$$Q_{S_ALL} = \sum_{j=1}^4 Q_{Sj} K_j \quad (5)$$

R_{Wj} : 窓面積率 [-] (戸建: 0.24, 集合: 0.16, 事務所・商業: 0.21)
 k_j : 窓ガラスの日射遮蔽係数 [-] (住宅: 0, 事務所・商業: 0.48)
 S_{Wij} : 窓に入射する短波放射量 [W/m²], A_{Wij} : 壁面積 [m²]
 K_j : 1 メッシュの建物別棟数
 添字 i : 壁面の番号 (1~4 が東西南北の各面を示す。)
 添字 j : 建物分類番号 (1~4 が建物種類を示す。)

③ 外気導入に伴う換気熱負荷 Q_V

本解析では、室内の設定温度 26℃、設定相対湿度 50% とし、必要換気量⁹⁻¹¹⁾ は、単位床面積あたり戸建住宅・集合住宅の場合 $3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$ 、事務所系ビル・商業系ビルの場合 $1.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$ とす

図 1 空調排熱モデルの概要図

図 2 建物壁体及び屋根の構成

る。延床面積に対する空調面積比⁹⁻¹¹⁾を戸建住宅・集合住宅: 0.4、事務所系ビル・商業系ビル: 0.6、1 メッシュの建物別総延床面積を S_j として、(6) 式より換気熱負荷の合計値 Q_{V_ALL} を算出する。また室内外のエンタルピー差 Δi は、地上から建物高さまでの平均の外気温と絶対湿度を用いて算出する。

$$Q_{V_ALL} = \sum_{j=1}^4 \rho \Delta i q_j S_j \quad (6)$$

ρ : 空気密度 [kg/m³], S_j : 1 メッシュの建物別総延床面積 [m²]
 Δi : 室内外エンタルピー差 [J/kg], q_j : 単位必要換気量 [m³/m²s]
 添字 j : 建物分類番号 (1~4 が建物種類を示す。)

④ 建物の内部熱負荷 Q_H

建物内部の発熱源である給湯・照明・OA 機器・厨房・人間の発熱を考慮する。東京 23 区において、戸建住宅・集合住宅については日本建築学会標準問題¹²⁾、事務所系ビル・商業系ビルについては空気調和衛生工学会の標準問題⁹⁾と財団法人建築環境省エネルギー機構で定められた内部発熱データ^{10,11)}を用い、図 3 に示す単位床面積あたりの発熱量を与えた。商業系ビルは、店舗（平日）の内部発熱スケジュールを用いた。これらを用い、建物別の単位床面積あたりの発熱量と 1 メッシュの建物別総延床面積 S_j を掛けることによって内部熱負荷 Q_{H_ALL} を算出する ((7) 式)。また、東京 23 区以外については文献 6 のデータを用いて内部熱負荷を与えている。

図3 単位床面積あたりの発熱量 [W/m²]

$$Q_{H_ALL} = \sum_{j=1}^4 q_{hj} S_j \quad (7)$$

q_{hj} : 単位床面積あたりの発熱量 [W/m²]
 S_j : 1 メッシュの建物別総延床面積 [m²]
 添字 j : 建物分類番号 (1~4 が建物種類を示す。)

⑤ 空調排熱量 Q_{ALL}

戸建住宅・集合住宅・事務所系ビル・商業系ビル、4種類の建物種別を考慮し、算出された1メッシュ当たりの①~④の空調負荷の合計値(3), (5), (6), (7) 式の和)を求め、(8) 式より、1メッシュの総空調排熱量 Q_{ALL} を算出する。今回は、便宜的に排熱形態については顕熱・潜熱それぞれ50%ずつとし、COP は3.0と仮定して解析を行う。

$$Q_{ALL} = (Q_{C_ALL} + Q_{S_ALL} + Q_{V_ALL} + Q_{H_ALL}) \left(1 + \frac{1}{COP}\right) \quad (8)$$

また、(8) 式の下線部が1メッシュ当たりの空調負荷(図1: 空調機による除去熱)を示し、これを COP で除したものが、空調機稼動のためのエネルギー消費に伴う空調機自体の排熱に相当する。

3. 解析概要

3.1 解析領域(図4)、メッシュ分割(表1)

図4に解析領域及び本解析で設定した海面温度分布を示す。本解析では、関東地方を中心に東西480km、南北400km、鉛直方向は地中1m、大気部9600mまでを対象とし、この領域内に表1に示す3段階のネスティング領域を設定した。水平方向は各領域のメッシュ幅に従って等間隔に分割し、鉛直方向は各領域とも共通で、大気部、地中を不等間隔、各々47メッシュ、12メッシュに分割している。大気第1セルの鉛直方向のセル幅は1mである。

3.2 数値気候モデル

本研究では、静力学近似をした基礎方程式を持つ局地気候モデルを用いた。乱流モデルには、Mellor-Yamada モデル level2.5^{文13)} を利用した。乱流モデルの詳細については、文献2、13を参照されたい。また実際の解析は、Software Platform^{文14)} のメソスケール解析機能に都市キャノピーモデル、空調排熱モデルを組み込んで行った。

3.3 解析条件

本解析は、太平洋高気圧が張り出した典型的な夏季の気候であった1995年7月24日の24時間を評価対象日とし、計算は7月23日午前6時からスタートして、その後42時間の時間積分を行った。表2に解析対象日のAMeDAS等の観測データを参考に設定した初期条件、気象条件をまとめて示す。表3に建物に関するパラメータを示す^{注3)}。建物の側壁面と大気との間の顕熱の流入出については、対流熱伝達係数 α_c を

図4 解析領域

表1 計算領域、メッシュ分割数、メッシュ幅

	計算領域 (x[km]×y[km]×z[km])	メッシュ分割	水平方向 メッシュ幅[km]
grid 1	480×400×9.6	60×50×49	8
grid 2	232×200×9.6	58×50×49	4
grid 3	96×96×9.6	48×48×49	2

表2 初期条件、気象条件

解析対象日	1995/7/24
初期温位(地表付近)	25.6°C
水蒸気圧	20hPa
温位勾配	5.0 (K/km)
上空風速(風向)	2.0m/s (S)
地表付近の相対湿度	70%
雲量(10分比)	3.0
可降水量	3.5 (上空800hPaまで) , 1.3 (全層)

表3 建物のパラメータ

分類	蒸発効率	アルベド	粗度長[m]
屋上面	0	0.2	0.0007
側壁面	0	0.2	-

11.6 W/m²K として計算している。また、表4に地表面パラメータを示す。東京23区部は文献8、東京23区以外は国土数値情報を用いて現状の土地利用に応じて与えた。都市キャノピーモデルで用いている地表面境界条件に関する平均建物高さ、平均建物幅データ等の街区パラメータの設定については、文献3、8、15を参照されたい。

4. 東京首都圏の都市気候分析

4.1 表面温度分布、風速ベクトル分布(図5,6)

図5に7月24日13時の表面温度分布^{注4)}、図6に7月24日13時

表4 地表面パラメータ

土地利用分類	蒸発効率	アルベド	粗度長[m]
田	0.5	0.20	0.05
畑	0.3	0.10	0.01
果樹園	0.3	0.20	0.05
その他の樹木畑	0.3	0.20	0.05
森林	0.3	0.15	0.05
原野(荒地)	0.3	0.20	0.01
建物用地	0.0	0.10	0.05
幹線交通用地	0.0	0.10	0.01
その他の用地	0.0	0.10	0.01
河川地及び湖沼	1.0	0.03	0.001
海浜	0.6	0.25	0.005

の風速ベクトルの水平分布(地上70m)^{注4)}を示す。ここで示す表面温度とは、地表面温度、建物屋上面温度、植生部上端の表面温度をそれぞれメッシュ毎の面積比で重みづけして算出したものである。最も建物が密集し、人工被覆の多い都心付近で50~55℃である。埼玉県南部付近において、60℃前後の高温域が出現した。これは、地表面の境界条件に都市キャノピーモデルを組み込んだことで、建物や樹木の風速の低減効果がモデル化された結果、内陸部の風速が低下し(図6)、建物屋上面、或いは地表面からの顕熱・潜熱放散量が減少したことが大きく影響していると考えられる。

4.2 気温の水平分布(図7)

図7(1)に7月24日13時の気温の水平分布(地上2m)の計算値、図7(2)に気温の観測値^{※16)}(1995年7月24日13時 AMeDASデータ)を示す。東京23区から埼玉県南部にかけての気温上昇が良く再現されており、各観測点の気温と計算値を比較しても、概ね良い対応を示していることが分かる。

4.3 建物屋上面、側壁面、地表面温度の時間変化(図8)

図8に大手町に該当するメッシュの建物屋上面^{注3)}、建物側壁面^{注3)}、地表面温度の時間変化を示す。本解析では、文献8より与えられる平均建物高さを用いて、メッシュ毎に均等街区を仮定しているため、屋上面は1日を通して影ができず、12時頃に最高56℃程度と、他の面に比べ高い値を示す。側壁面は、最高約36℃程度の値を示す。屋上面に比べ、日中の温度上昇が小さい原因は、直達日射の影響の小さい北面を含む東西南北4面の平均値であることと、屋上面に比べ天空率が小さく、日射や大気からの長波放射の受熱量が小さいことが影響していると考えられる。また地表面は、建物の影の影響により屋上面に比べ温度上昇は小さく、日中最大で45℃程度となる。

4.4 気温の時間変化(図9)

図9に大手町に該当するメッシュの地上2mにおける気温の時間変化について、計算値と観測値(1995年7月24日の AMeDAS データ)を示す。計算値と観測値を比較すると、昼間の最高気温が若干低くなったものの、1日を通して観測値と概ね良い対応を示す結果が得られた。

4.5 空調排熱の時間変化(図10,11)

図10に大手町に該当するメッシュの建物別空調排熱の合計値の時間変化、図11に同メッシュの建物からの空調排熱の合計値の時間変化を、(1)熱負荷別、(2)建物種類別に示す。対象とした大手町に該当するメッシュでは、日中約150-200W/m²の空調排熱が排出される(図11)。この内、住宅からの空調排熱が全体に占める割合は約1割程度

図5 表面温度分布 [℃]
(灰色部は45℃以上の領域)

図6 風速ベクトル水平分布 [m/s]

(1) 計算値
(Grid3, 地上2m, 7月24日13時)

(2) 観測値^{※16)}
(1995年7月24日13時 AMeDAS データ)

図7 気温の水平分布 [℃]

図8 屋上面、側壁面、地表面温度の時間変化 [℃]
(大手町に該当するメッシュについて)

図9 気温の時間変化(地上2m) [℃]
(大手町に該当するメッシュについて)

と小さく、事務所系ビルからの空調排熱量が、全体の約7割を占める結果となった(図10、11(2))。また、大手町メッシュの空調排熱の合計値を熱負荷別に見ると、建物内部で発生する熱負荷(機器発熱、照明発熱等)が、日中において全体の半分以上を占めていることが分かる(図11(1))。本解析における空調排熱量の妥当性については、文献17を参照して検討を行っており、朝5時頃に最低値を示し、15時

頃に最大値を示す傾向等、一日を通して良く再現された結果となった。また、正午における排熱量の減少等の、事務所系ビルの排熱スケジュール (図 3 (2)) の影響¹⁸⁾もよく再現された結果となった。

4.6 空調排熱の水平分布 (図 12)

図 12 (1) に 13 時、(2) に 21 時の東京 23 区における空調排熱量の水平分布を示す。(1) 13 時の分布では、大手町周辺のオフィス地域、高層ビルの集中している池袋、新宿、渋谷の周辺において建物からの空調排熱量が大きく、日中に事務所系ビル、または商業系ビルの密集エリアで排熱が局所的になる。また (2) 21 時の分布では、事務所系ビルの多い大手町周辺の空調排熱量が減少し、商業系ビルの多い池袋、新宿、渋谷の周辺から住宅地域へかけての空調排熱量が大きい。これらの結果は、内部発熱スケジュール (図 3) や、各地域の建物用途別割合を良く反映した結果となっている。また、これらの解析結果は文献 4、19 を参照し、日中と夜間に分けて空調排熱のオーダー、並びに水平分布の傾向の妥当性の検討を行っている²³⁾。

5. ヒートアイランド緩和方策が空調排熱量と都市熱環境に及ぼす影響の検討

本節では、前節までの東京首都圏の都市気候分析を踏まえ、近年提案されているヒートアイランド緩和方策についてケーススタディを行い、これらの対策が空調排熱と都市の屋外歩行者空間の熱環境に与える影響の検討を行う。

5.1 計算ケース

表 5 に計算ケースを示す。本解析では、ヒートアイランド緩和方策として、建物屋上面からの潜熱放散を促進させる屋上緑化 (Case2)、建物屋上面の日射吸収量を減少させる屋上面の高アルベド化 (Case3)、空調機器の高効率化 (Case4)・内部熱負荷 50%削減 (Case5) による空調排熱の削減を対象に解析を行った。対策領域は、東京 23 区全域とした。Case1 は現状 (基本ケース) で、屋上面の蒸発効率²⁴⁾は 0.0、屋

表 5 計算ケース

解析ケース	概要
Case1	無対策 (現状: 基本ケース)
Case2	屋上緑化 (蒸発効率 0.0→0.3)
Case3	屋上面の高アルベド化 (アルベド 0.2→0.6)
Case4	空調機器の高効率化 (COP 3.0→6.0)
Case5	内部熱負荷 50%削減

上面のアルベドは 0.2、COP (空調機の効率) は 3.0 として固定値を与えている。Case2,3,4,5 において変更したパラメータ以外の条件は、Case1 と同じである。また空調排熱の排出場所は、住宅は各階排出、事務所系ビル・商業系ビルは屋上排出としている²⁵⁾。

5.2 屋上面熱収支、屋上面温度の時間変化 (図 13,14)

図 13 に Case1~3 の大手町に該当するメッシュの屋上面熱収支を示す。また、図 14 に Case1~5 の同メッシュの屋上面温度の時間変化を示す。Case1 の基本ケースの場合、12 時頃に最高 56℃程度となる。Case2 の屋上緑化では、Case1 に比べて 13 時頃に最大で 13.6℃低下する。これは、Case1 (現状ケース) では見られない潜熱の放散量 (→) が大幅に増加したことによる (図 13 (2))。Case3 の屋上面の高アルベ

図 13 屋上面熱収支の時間変化 $[W/m^2]$
(大手町に該当するメッシュについて)

図 14 屋上面温度の時間変化 $[^{\circ}C]$
(大手町に該当するメッシュについて)

図 15 空調排熱の時間変化 $[W/m^2]$
(大手町に該当するメッシュの合計)

図 16 空調排熱の変化量の時間変化 $[W/m^2]$
(大手町に該当するメッシュの合計)

ド化では、Case1 と比較して 12 時頃に最大で $11.8^{\circ}C$ 低下する。これは、Case1 と比較して日射反射量 ($\diamond$) が増加したためである (図 13 (3))。これらの効果により、Case2 と Case3 については、Case1 と比べて日中 10 時～16 時頃に平均的に約 $10^{\circ}C$ 前後の屋上面温度の低減効果が見られた。また、Case4,5 については、Case1 と比べてほとんど違いが見られない。

5.3 空調排熱、空調排熱の変化量の時間変化 (図 15,16)

図 15 に Case1～5 の大手町に該当するメッシュ面積当たりの空調排熱の合計値の時間変化、図 16 に空調排熱の Case1 との差の時間変化を示す。Case2、Case3 の空調排熱量は、Case1 に比べ大きな変化はなく、空調排熱の削減量は最大でも約 $10W/m^2$ 程度である (図 16)。以上から、屋上緑化や屋上面の高アルベド化は、屋上面温度の低下による貫流熱負荷の減少効果は若干あるものの、全体的な空調排熱の削減に与える影響は小さいことが分かる。これは、今回検討している建物モデルが、図 2 で示した断熱設定を行っているため^{注 3)}、屋上緑化や屋上面の高アルベド化を施すことによる熱負荷削減の相対的效果が小さいためである。Case4 の空調機器の高効率化においては、Case1 と比較して空調排熱の削減量が最大約 $30W/m^2$ 程度となる。これは、COP の値を 3.0 から 6.0 に増加させたことにより、空調機の稼働に伴う空調機自体の排熱が半減したためである。また、Case5 の内部熱負荷 50%削減は、Case1 と比較して最大約 $60W/m^2$ の空調排熱の削減となり、空調機器を高効率化させた場合の約 2 倍の削減効果を示す。

5.4 鉛直気温分布、居住域の気温差の時間変化 (図 17,18)

図 17 に大手町に該当するメッシュの気温差の鉛直分布 (15 時)、図 18 に同メッシュの地上 2m における気温差の時間変化を示す。これらは、表 5 に示した計算ケースの内、Case1 (現状ケース) の気温を基準として、Case2～5 の気温から Case1 の気温を差し引いたものである。屋外歩行者空間である地上 2m の気温では、Case2 (屋上緑化) で他の

ケースに比べその低減効果が最も大きく、15 時頃最大で約 $0.40^{\circ}C$ の気温低下が認められた。屋上緑化が地表付近の気温を低下させた理由として、屋上面からの蒸発潜熱の増加により気温が低下した屋上付近の空気が都市のキャニオン空間内に拡散したこと、キャノピー層内の空気の温度差によって冷気が輸送されたことが考えられる (図 17)。また、Case3 (屋上面の高アルベド化) では、Case2 (屋上緑化) 程ではないものの一日を通して屋外歩行者空間の気温が低下し、最大で約 $0.33^{\circ}C$ 気温が低下した。これは、Case3 では Case1 に比べて屋上面温度が低下することで顕熱の発生量が減少し、基準ケースに比べ低下した屋上付近の空気が、温度差によってキャノピー層内に輸送されるからである。Case4 (空調機器の高効率化)、Case5 (内部熱負荷 50%削減) については、一日を通して気温低減効果を示すものの、屋上緑化、屋上面の高アルベド化程の効果は見られなかった。これは、日中の建物から大気への顕熱放散量の削減が、屋上緑化・屋上面の高アルベド化 (Case2,3) で約 $200 W/m^2$ であるのに対して、空調機器の高効率化 (Case4) で約 $30 W/m^2$ の削減量、内部熱負荷 50%削減 (Case5) で約 $60 W/m^2$ の削減量、と削減量が小さいために、屋上付近とキャニオン空間内の空気の温度差が小さくなり、上下方向の空気の混合が抑えられたことが影響していると考えられる。このことから、屋外歩行者空間の気温に着目した場合、屋上緑化、屋上面の高アルベド化と比較して、建物からの空調排熱の削減が与える影響は小さいことが分かる。

5.5 絶対湿度差の時間変化 (図 19)

図 19 に大手町に該当するメッシュの絶対湿度差の時間変化 (地上 2m) を示す。これは、気温差と同様に Case1 (現状ケース) の絶対湿度の時間変化を基準として、各ケース間で差をとったものである。Case2 (屋上緑化) の場合に、他のケースに比べ最も絶対湿度が変化し、最大で約 $0.26g/kg$ 増加した。これは、屋上緑化によって潜熱放散量が増加し (図 13 (2))、屋上付近の水蒸気を多く含む空気が、乱流

図 17 気温差の鉛直分布 (15時) [°C]
(大手町に該当するメッシュについて)

図 18 居住域の気温差の時間変化 [°C]
(大手町に該当するメッシュについて：地上2m)

図 19 絶対湿度差の時間変化 [g/kg]
(大手町に該当するメッシュについて：地上2m)

拡散に伴い地表付近へ輸送されたことによると考えられる。また、Case3 (屋上面の高アルベド化) では、各面の蒸発効率も Case1 と変化はないものの、若干の絶対湿度の上昇が見られる。この様にヒートアイランド緩和策は、温度場だけではなく、湿度場へ影響を及ぼす可能性がある。Case4,5 については、Case1 からの変動はほとんど見られなかった。

6. まとめ

- (1) 都市キャノピーモデルを組み込んだ局地気候モデルに空調排熱モデルを組み込み、建物躯体からの貫流熱負荷・窓面を透過する日射熱負荷・外気導入に伴う換気熱負荷・建物の内部熱負荷からなる空調負荷及び空調排熱量の計算を可能とした。
- (2) 新しい局地気候モデルを用いて、東京首都圏を中心とした都市気候分析を行った。計算値は観測値と良い対応を示し、空調排熱モデルによって算出された空調排熱量も妥当な値が得られた。
- (3) 東京首都圏の都市気候分析に基づき、建物屋上面と空調排熱に着目したヒートアイランド緩和策が、空調排熱量と都市の屋外歩行者空間の熱環境に及ぼす影響の検討を行った。
- (4) 東京 23 区内の全ての建物を対象とした、屋上緑化と屋上面の高アルベド化による建物からの空調排熱の削減量は、最大でも約 10W/m² 程度である。また、空調機器の高効率化によって最大約 30W/m²、内部熱負荷 50%削減により最大約 60W/m² の空調排熱量を削減する。
- (5) 屋外歩行者空間 (地上 2m) において、屋上緑化で最大 0.40°C、屋上面の高アルベド化で最大 0.33°C 程度気温が低下した。
- (6) 空調機器の高効率化・内部熱負荷 50%削減による空調排熱の削減が、都市の居住域の気温の変化に与える影響は、屋上面への対策と比較して小さい。
- (7) 標準的な断熱性能を有した建築物の場合、屋上緑化や屋上面の高アルベド化の対策が、空調排熱量の削減に与える影響は小さい。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、日建設計・伊香賀俊治氏、東京ガス (株) 総合研究所・大森敬明氏、福井大学工学部・吉田伸治氏には甚大な御協力と御助言を頂きました。また、都市計画情報は東京都より借用させて頂きました。23 区内の平均建物高さデータは国際航業 (株) 瀬戸島政博氏の御好意により提供されました。記して謝意を表します。

注

- 注1) 建物分類、建物用途割合、各メッシュの棟数・総延床面積については、文献 8 のデータを参照している。建物分類については、公共用地、商業用地、住宅用地、工業用地の中に含まれる全 14 種類の土地建物主用途を、大きく 4 種類の用途 (戸建住宅、集合住宅、事務所系ビル、商業系ビル) に大別している。
- 注2) 建物別棟数は、戸建住宅・集合住宅・事務所系ビル、商業系ビルの 4 種類の建物棟数で定義している。各棟数は、文献 8 の建物種類別の延床面積割合に基づき、メッシュ毎の建物総数に各割合を乗ずることで算出している。また、均等街区と実街区を比較すると、建物の内部熱負荷・換気負荷計算では延床面積を基

に計算しており、その際の延床面積は、積上統計値が保存されている。一方、建物躯体からの貫流熱負荷・窓面透過日射負荷の計算では屋上、側壁面積に基づいて計算している。

注3) 図2に示すように、建物屋上表面はモルタル、側壁面は普通コンクリートである。

注4) 図5：表面温度分布、図6：風速ベクトル分布等の再現精度は、文献3において確認している。

注5) 文献4より推定される午後1時の空調排熱は、ほぼ 200W/m² となり、本計算において算定した同時刻の空調排熱とほぼ合致する。

注6) 建物側壁面は、東西南北の4面 (各面につき1メッシュ) で構成されており、上下方向等の、これより詳細なメッシュ分割は行っていない。また、建物が存在する大気部分については、鉛直方向にいくつかメッシュ分割されており、空調排熱を各階排出する場合は、分割した各メッシュに均等に排出している。

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14年度環境省請負業務報告書、平成14年度ヒートアイランド対策手法調査検討業務報告書、2003.3
- 2) 金相璣、村上周三、持田灯、大岡龍三、吉田伸治、数値気候モデルによる都市化がもたらす関東地方の気候変化のメカニズムの解析、日本建築学会計画系論文集、534号、83-88、2000.8
- 3) 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、592号、75-82、2005.6
- 4) ヒートアイランド現象における人工排熱に関する調査検討委員会、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、2004.3
- 5) 吉田伸治、大岡龍三、村上周三、原山和也、CFDによる人工排熱が都市のヒートアイランド現象に及ぼす影響の検討、第18回エネルギー・経済・環境コンファレンス論文集、499-502、2002.1
- 6) 資源環境技術総合研究所 環境影響予測部、大都市における夏季高温化対策技術の評価手法の開発、研究資料97-1、1997.3
- 7) 山本博士、増川隆久、気象と電力需要予測、電気評論、Vol.81、No.12、19-22、1996.12
- 8) 東京都都市計画局総合計画部、東京都都市計画地理情報システム、平成89年度土地利用現況および建物用途現況、1998.10
- 9) 社団法人・空気調和・衛生工学会、設計用最大熱負荷計算法、1994
- 10) 財団法人・住宅・建築省エネルギー機構 (IBEC)、空気調和設備の省エネルギー計算プログラム、BECS/CEC/AC for Windows 操作マニュアル、附表・附図、2-4-2-12
- 11) 財団法人・住宅・建築省エネルギー機構 (IBEC) SMASH For Windows Ver.2、住宅用熱負荷計算プログラムユーザーマニュアル、152-180
- 12) 宇田川光弘、標準問題の提案一住宅用標準問題一、日本建築学会環境工学委員会、熱分科会第15回熱シミュレーションテキスト、23-33、1985
- 13) George L. Mellor and Tetsuji Yamada, Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems Gradients, Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol.20, 851-875, 1982
- 14) 持田灯、村上周三、金相璣、近藤裕昭、島田昭男、大岡龍三、ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の総合的評価のための Software Platform の開発 (その1)、日本建築学会学術講演梗概集、D1、1099-1102、2000.9
- 15) 瀬戸島政博、赤松幸生、船橋学、今井靖晃、天野正博、航空機レーザスキャナによる森林域の計測とその適用性、写真測量とリモートセンシング、Vol.41、No.2、15-26、2002
- 16) 気象庁ホームページ http://www.jma.go.jp/JMA_HP/jma/index.html
- 17) Yasunobu Ashie, Vu Thanh Ca and Takashi Asaeda, Building Canopy Model for The Analysis of Urban Climate, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.81, 237-248, 1999
- 18) 近本智行、伊香賀俊治、永瀬修、東京における建物の省エネルギー効果、地球温暖化防止対策の定量化評価 (その1)、業務用ビルで消費されるエネルギーの定量化、第19回エネルギー・経済・環境コンファレンス論文集、455-460、2003.1
- 19) Yasunobu Ashie, Vu Thanh Ca and Takashi Asaeda, Numerical Analysis of Heat Island Phenomena for the Control of Cooling Energy in Cities, Journal of Global Environment Engineering, Vol.7, 101-117, 2001

(2005年3月10日原稿受理、2005年8月12日採用決定)