都市活動の立体的再配置による都市熱環境の制御に関する研究

A Study on the control of the thermal environment by re-allocation of urban activities

浦野 明* 花木啓祐* 一ノ瀬俊明** 下堂蘭和宏***
URANO, Akira HANAKI, Keisuke ICHINOSE, Toshiaki SHIMODOZONO, Kazuhiro

ABSTRACT: Computer simulation using meso-scale meteorological model was executed and the effect of the re-allocation of urban activities on the thermal environment was estimated.

In the case of vertical re-allocation in Tokyo 23 wards, it is found that centralization of urban activities largely decrease the temperature at near the ground surface because the anthropogenic heat is discharged at higher level. On the other hand, dispersion of urban activities raises the temperature of the area.

1. 研究の背景および目的

市街地の気温が郊外に比べて高くなる現象（ヒートアイランド）の原因としては主に地表面の人工被覆と人工排熱の両者が考えられており、その制御策として、省エネルギーや地域暖冷房の導入、緑化などの方策が多数検討されている。しかし実現性と効果とをあわせて検討した場合、現状の都市活動水準を大きく低下させるような施策、例えばエネルギー消費量の50%削減などは事実上不可能と言える。

そこで本研究では東京都区部を対象に、都市規模、人工排熱量などの指標で表せる「現状の都市活動総量」を変化させないという条件のもとで都市の立地や配置を変化させ、どれほどの都市熱環境制御効果が得られるかを解析することを目的とした。その上で省エネルギーなど既に検討されている都市熱環境制御策との比較検討を行った。手法としては局地気象モデルによるコンピュータシミュレーションを用いた。

2. モデルの概要

本研究で使用しているモデルNIESMMはメソスケール気象モデルであり、Pielke(1974)、Ulrickson and Mass(1990)によるCSUMMを元に鶴野(1995)により改良されたものである。

モデルは静力学平衡、ブシネスク近似をもとにしており、Terrain-followingの座標系において構成されている。乱流拡散係数はTherry and Lacarrere(1983)に従い、乱流エネルギーと長さのスケールを用いて計算している。境界条件としては、境界部においては勾配なし(zero-gradient)とした。また、地中については地中50cmにおいて等温であるとした。

本研究においてNIESMMを利用する際には、都市の熱環境をよりよく表現するために人工排熱の空間分布および時間分布を加えるように修正を加えた。人工排熱の排出先として大気に直接与える方法と地表面に与える方法の2種類の方法を考え、各解析において両者の特徴を検討して適宜使い分けた。運動量の方程式は、

$$\frac{Du}{Dt} = -\theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + g \left(\frac{z^* - \bar{s}}{\bar{s}} \right) \frac{\partial z_s}{\partial x} + \left(\frac{\bar{s}}{\bar{s} - z_s} \right) \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z^*} \right) + f(v - V_g) - C_d A u |u|$$

$$\frac{Dv}{Dt} = \theta \frac{\partial \pi}{\partial y} + g \left(\frac{z^* - \bar{s}}{\bar{s}} \right) \frac{\partial z_s}{\partial y} + \left(\frac{\bar{s}}{\bar{s} - z_s} \right) \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z^*} \right) + f(u - U_g) - C_d A v |v|$$

となる。ここで u, v はそれぞれ x, y 方向の風速成分であり、 θ は温位、 π は exner function、 z^* は地形に沿った鉛直方向の座標である。 U_g, V_g は地衡風、 $\bar{s}$ はモデルの上端の高さ、 K_m は渦拡散係数である。建物のドラッグ効果を考慮する場合は、Uno (1989) のモデルに従い、ドラッグ係数 C_d と建物の壁面の面積密度 A を用いている。熱量と水蒸気の保存式はそれぞれ、

$$\frac{D\theta}{Dt} = \left(\frac{\bar{s}}{\bar{s} - z_s} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_h \frac{\partial \theta}{\partial z^*} \right) + S_\theta + \frac{Q_{m,n,l}}{\rho C_p}$$

$$\frac{Dq}{Dt} = \left(\frac{\bar{s}}{\bar{s} - z_s} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_h \frac{\partial q}{\partial z^*} \right)$$

となる。ここで q は比湿であり、 $\frac{Q_{m,n,l}}{\rho C_p}$ は座標 (m, n, l) におい

て加わる人工排熱量、 ρ は空気密度を表す。なお、大気に人工排熱を与える場合には潜熱と顕熱を区別する必要がある。ビル屋上の冷却塔では潜熱の割合が大きいが、各部屋のエアコンの室外機などでは多くが顕熱として放出されると考えられ、一概には両者の比を決定することができない。本研究では最も気温への影響が大きくなると考えられる場合を想定し、すべてが顕熱として放出されるものとした。連続の式は

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z^*} - \frac{1}{\bar{s} - z_s} \left(u \frac{\partial z_s}{\partial x} + v \frac{\partial z_s}{\partial y} \right) = 0$$

と表わされ、乱流エネルギー(E)の式は

* 東京大学 : Univ. of Tokyo ** 国立環境研究所 : National Institute for Environmental Studies

*** 東京大学（現在：東京海上火災） : Univ. of Tokyo (present: Tokyo Marine)

$$\frac{DE}{Dt} = -\overline{u'v'} \frac{\partial u}{\partial z} - \overline{v'w'} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{g}{\theta} \overline{w'\theta'} - \frac{\partial}{\partial z} \overline{w'E} + \frac{p'w'}{\rho_0} - \varepsilon + C_d A [|u|^3 + |v|^3]$$

となる。また、地表面の熱収支の式は

$$Q_{\text{net}} = SR_{\text{net}} + IR_{\text{net}} + \rho c_p u^* \theta^* + \rho L u^* q^* - \sigma T_{\text{net}}^4 - \rho c_s K_s \frac{\partial T_s}{\partial z} + Q_{m, n, 0}$$

となる。左辺の各項において、 SR_{net} は地表面に入射する短波放射、 IR_{net} は地表面における大気からの下向き長波放射、 $\rho c_p u^* \theta^*$ は顕熱フラックス、 $\rho L u^* q^*$ は潜熱フラックス、 σT_{net}^4 は地表面における上向きの長波放射、 $\rho c_s K_s \frac{\partial T_s}{\partial z}$ は地中への顕熱フラックス、 $Q_{m, n, 0}$ は地表面に加わる人工排熱量である。また熱収支の計算に用いる地表面熱特性値は表1の値を用いた。

3. 計算条件および現状の熱環境の解析結果

計算領域としては、東京都区部におけるメソスケールの気象現象を正しく把握するため、中部山岳地帯の大部分を含むおよそ300km四方のフィールドを設定した。東京都区部を含む東西32km、南北37kmの領域においてはグリッドサイズを約1kmとし、周辺は2, 4, 8, 12, 16kmと段階的にグリッドサイズを拡大した。

鉛直方向の大気のグリッドは上空8000mまで不等間隔で23グリッドであり、最下層の3層は4m間隔である。地中のグリッドは地表面から深さ50cmまで不等間隔で11グリッドとした。

人工排熱量算出にあたっては、東京都区部については建物用途別・時刻別の床面積当たりエネルギー消費原単位（一ノ瀬, 1994）を用い、人工排熱の時間分布、空間分布、鉛直分布のすべてを表現できる形で入力した。床面積データは東京都土地利用現況調査（1986年調査分）によるものを用いた。東京都区部以外の地域における人工排熱量算出には東京都区部におけるエネルギー消費量の時間分布曲線（一ノ瀬, 1994, 図2）を適用し、建物用地面積に対して日平均値が30 W/m²になるように（守田, 1992）地表面に与えた。人工排熱の鉛直分布については現状の分布として鉛直方向のグリッドの位置に対応して1, 2, 3, 4, 5, 9,

10-19, 20-29, 30-49, 50-の各階高に存在する床面積をもとに人工排熱を計算し、それぞれ各階高の中央の高さにおいて排出されるものと仮定した。ただし、1階部分からの人工排熱については地中最上層（地表面）に排出されるものとし、2階以上については大気にすべて顕熱として排出されるものとした。また、交通による人工排熱については道路あるいは鉄道用地面積に比例するものとして算出し、地表面および大気最下層に50%ずつ排出されるものとした。計算は午前0時から48時間分を行い、解析には2日目の0時から24時までの24時間分を用いた。計算時間間隔は10秒である。

東京都区部における現状を表すと考えられる諸条件を入力した上で計算を行い、気温・風の分布についてその特徴を考察した。ただし、ここでは建物の運動量および乱流エネルギーに対するドラッグ効果は無視した。東京都区部は日中には東京湾からの海風に覆われる。また、明け方を除いてほぼ終日都心部を中心とするヒートアイランドが見られ、その強度は9時において約2.5℃である。日中、ヒートアイランドの中心は海風によって内陸へ移動する。ヒートアイランド強度が最大となるのは21時で約5℃に達する（図3）。これらの結果は観測データに基づく研究（藤部, 1993）と整合しており、モデル計算の有効性が示された。

4. 再配置シナリオの設定

東京都区部においては平面的には既にほぼ一面に都市活動が存在しており、更なる集中の可能性は低い。しかし、指定容積率の充足率などの指標から見ると、立体的にはまだ集中の可能性を残している。そこでここでは図4に示す東京都区部を対象に都市活動の平面的再配置に加えて立体的な再配置もあわせて行った場合に都市熱環境が受ける影響を解析する。都市活動の立体的再配置とは、都市全体について現状の床面積や人工排熱量を保存したまま高層化や低層化などの手法による再配置を意味する。

現状の都市活動を一定としたままその平面的および立体的配置を変化させた場合について、都市熱環境への影響をとらえる。ここでは「都市活動量」として再配置対象領域全域での各建物用途別床面積合計、あるいは人工排熱総量を用い、これらを一定としたまま再配置を行う。再配置の方法について表4に示す3ケースを設定した。

集中型(T2-C1, T2-C2)のシナリオでは用途の床面積が都心7区（千代田区、中央区、港区、豊島区、新宿区、渋谷区、文京区）に集中するものとする。この操作にあたっては、まず東京都区部における各用途の床面積合計を東京都土地利用現況調査の25mポイントサンプリングデータから算出し、これを都心7区内で既に建物が存在している場所に平均的に積み上げた。つま

（表1）土地利用区分別の地表面熱特性値

土地利用区分	粗度 (cm)	蒸発効率	アルベド	密度 (g/cm ³)	比熱 (cal/g/K)	熱拡散係数 (cm ² /s)
田	10.0	0.50	0.17	1.8	0.28	0.0053
畑	10.0	0.30	0.17	1.8	0.28	0.0053
果樹園	50.0	0.30	0.16	1.8	0.28	0.0053
公園およびその他畑	50.0	0.30	0.16	1.8	0.28	0.0053
森林	50.0	0.35	0.16	1.8	0.28	0.0053
荒地	15.0	0.20	0.14	1.8	0.28	0.0053
建物用地	50.0	0.00	0.18	2.4	0.21	0.0072
交通用地	50.0	0.00	0.18	2.4	0.21	0.0038
その他の用地	20.0	0.03	0.18	1.8	0.28	0.0053
河川・湖沼	0.0	1.00	0.08	1.0	1.00	0.0053
海浜	5.0	0.25	0.18	1.8	0.28	0.0053
海面	0.0	1.00	0.08	1.0	1.00	0.0053

（図2）人工排熱の時間分布

(図3) 現状のケースにおける気温分布
(地上4m・21時)

り、都心7区における平均建蔽率(32%と算出された)は不変であり、容積率のみを増加させている。東京都区部に存在する床面積を都心7区内の建物が存在するポイントに均等に分配すると約14.1階となったため、本解析では都心7区における建物の階高を原則的に15階とした。都心7区以外の地域においては、現状において建物(床面積)が存在していないポイント(25m単位)については土地利用を現状のままとし、建物が存在するポイントについては、都心7区への集中に伴い余剰となる用地であるため、建物は存在しないものとデータを改め、さらに土地利用を変化させた。余剰地に対しての土地利用の変化について2つのケース設定を行った。ケースT2-C1では、この余剰地が公園に変化するものとした。また、ケースT2-C2ではこの余剰地がアスファルトで覆われているものとし、既に示した土地利用区分別の地表面熱特性値において建物用地の値を用いた。

以上のように修正を加えた土地利用分布に基づいて地表面熱特性値および人工排熱を再計算し、入力データとした。

一方分散型(ケースT2-D)は東京都区部において都市活動が完全に分散した場合を想定した。現状を表すケースT1から東京都区部における人工排熱の総量を各時刻別に算出し、これを建物が存在するポイント(25m単位)に均等に加えることによって都市活動の完全な分散状況を表現した。東京都区部に存在する床面積を建物が存在するポイントに均等に分配すると約2.7階となったため、本解析では東京都区部における建物の階高をすべて3階とし、前述の方法により算出された各グリッドの人工排熱量を1.2,3階の高さに3等分して与えた。

さらに、現状の東京都区部の熱環境に人工排熱が与えている影響を把握し、また、都市活動の再配置による熱環境変化との比較を行うため、省エネルギーを行った場合の熱環境変化を解析した。省エネルギーの条件は表3のように設定した。

5. 再配置及び省エネルギーによる解析結果

集中型の2ケースでは気温は特に東京都区部の北西部で日中に最大6℃以上低下する領域が見られる。集中地域においても気温は日中を中心に約2℃低下している。これは、高層化によって人工熱の排出先が上空に移り、地表付近に対する影響が少なくなったことによる。図5に示すように大気第4層(層の中心が地表から26m)における気温は都心部において15時に40℃以上となっており、地表面付近の気温が低下

(図4) 再配置の対象地域

(表2) 東京都区部についての再配置ケース

	配置	方法
ケースT2-C1	集中型(高層化)	都心7区にすべての床面積を集中させる。 他の地域は公園とする。
ケースT2-C2	集中型(高層化)	都心7区にすべての床面積を集中させる。 他の地域はアスファルトとする。
ケースT2-D	分散型(低層化)	東京都区部全域に人工排熱を均等分布させる。

注) 都心7区とは
千代田区、中央区、港区、豊島区、新宿区、渋谷区、文京区を指す。

(表3) 省エネルギー条件

	条件
ケースT-10A	終日人工排熱を10%カット
ケースT-20A	終日人工排熱を20%カット
ケースT-20D	9時～15時まで人工排熱を20%カット
ケースT-20N	18時～6時まで人工排熱を20%カット

した反面、上空の気温は大きく上昇し、地表付近の大気が局地的な熱的安定状態となっていることがわかる。また夜間は日中よりも影響が少ない結果となった。

余剰地を公園としたケースT2-C1と、アスファルトとしたケースT2-C2との間には終日有意な差が見いだせなかった。人工排熱の分布を変化させたことによる影響が非常に大きいため、相対的に余剰地の被覆の違いによる差が現れなかったものと考えられる。

分散型(ケースT2-D)では日中には都心部を中心とする気温低下が著しく、周辺部における気温上昇は認められない。夜間においては都心部では気温が低下するが、周辺領域、特に都心の西に当たる地域において気温上昇が見られる。この気温上昇は21時において約1.4℃である。

都市活動の立体的再配置について、ここでは2種類の指標を用いた定量的検討を加え、省エネルギー策との比較を行った。なお、東京都区部を包含する東西32km、南北37kmの領域を指標算出の対象とした。

(1)指標a: 気温変化の積算値による評価

指標aでは指標算出の対象領域全体の各グリッドについて、現状(ケースT1)と各ケースとの気温の差を積算し、比較した。集中型についてはケースT2-C1およびケースT2-C2のいずれも特に日中において積算値が大きな負となっており、対象地域における気温低下を示している(図6)。一方分散型ケースT2-Dに

においてはほぼ終日積算値が正ないし0付近の値となっており、対象地域における気温上昇を示している。特に日中よりも夜間において気温上昇が大きい。省エネルギー策と比較した場合、日中には、集中型の2ケースにおいて最も気温低下が大きく、終日20%の人工排熱削減を行ったケースT-20Aを4倍以上上回る気温低下となっている。しかし、集中型においては夜間には急に気温低減効果がなくなる。一方で省エネルギー策では日中よりも夜間に気温低減効果が大きく現れているために、夜間においては両者の関係が逆転し、人工排熱を削減したケースの方がより大きく対象地域の気温を低下させていることがわかる。

(2)指標c：効果地域の面積による評価

現状(ケースT1)と比較して、基準値以上の気温低下が見られたグリッドを再配置による「効果地域」と認め、各ケースについて、対象領域全体の面積に対する割合を計算する。ここでは基準値として1℃を用いた。集中型においては日中はほぼ50%のグリッドにおいて1℃以上の気温低下が見られた。これに対して分散配置では1℃以上気温が低下したグリッドは終日ほとんどない。省エネルギー策との比較では日中と夜間で特徴が異なる。日中においては集中型のケースにおいて最も効果地域が広いが、夜間には人工排熱削減を行ったケースにおいて効果地域がやや広がっている(図7)。

以上より、どちらの指標を用いた場合においても、集中型においては気温の低下が見られ、分散型では気温の上昇をもたらしていることがわかり、高層化(立体的集中)を行うことで上空に人工熱を排出させることができ、地表面付近の気温上昇を小さくできるということが示された。

また、集中型再配置のケースは日中において気温低下効果が大きく、人工排熱削減のケースは夜間において気温低下効果が大きいことから、この両者の方策は互いに異なる時間帯において効果を持ち、組み合わせることによってより大きな都市熱環境制御効果が得られるものと考えられる。

6. 建物のドラッグ効果の影響

全章までの計算で無視してきた、建物の運動量および乱流エネルギーに対するドラッグ効果を考慮した解析を行った。ある格子に存在する建物の床面積の合計が与えられた場合に壁面の面積密度を求めるためには、各建物の幅を仮定する必要がある。集中型のケースT2-C1を対象として、各格子における建物の床面積を変更せずに都心7区に存在する建物の幅をそれぞれ10 m, 50 m, 100 mと仮定した場合の解析を行った。ケース名はそれぞれケースT2-C3, T2-C4, T2-C5とする。

図8, 9, 10に15時の地上2 mにおけるケースT2-C3, C4, C5とケースT2-C2の温度および風速の差の水平分布を示す。各ケースともケースT2-C2と比較して都心部分の温度が上昇するとともに、図5に示される東京湾からの南東とは逆方向の風が発生している。これは建物のドラッグ効果により海風が弱まり、発生した人工排熱の移流が妨げられたため温度が上昇したものと考えられる。

各ケースを比較すると、建物の幅が小さいほど壁面の面積密度が大きいため、ドラッグ効果の影響が強く出ており、ケースT2-C3では最大で11℃の温度上昇が示されている。

7. 結論

現状の「都市活動総量」を変化させずに都市の再配置を行った場合の熱環境制御効果を解析することを目的としていくつかの解析を行い、以下の結論を得た。

(図5) 集中再配置(ケースT2-C1)における15時の大気第4層の気温及び風速

(図6) 指標aによる再配置の評価

(図7) 指標cによる再配置の評価

(図8) 建物のドラッグ効果を考慮した場合と考慮しない場合の15時の大気第1層の気温及び風速差
ただし建物の幅は10mを仮定 ([T2-C3] - [T2-C2])

(図9) 図8と同様 ただし建物の幅は50mと仮定
([T2-C4] - [T2-C2])

(図10) 図8と同様 ただし建物の幅は100mと仮定
([T2-C5] - [T2-C2])

・ヒートアイランドの原因を大きく二分した場合、人工排熱の影響は夜間に大きく、地表面被覆の影響は日中に大きい。

・東京都区部を対象に都市活動の立体的再配置を行ったところ、集中型において気温が低下し、分散型では上昇する。これは、高層化に伴って人工熱が上空に排出されるようになり、地表面付近への影響が少なくなるためである。

・高層化による立体的集中によつては、特に日中において気温低下が大きく、反面、人工排熱削減によつては夜間の気温低下が大きいため、両者の方策は相互補完性を持つ可能性がある。

・地区内の建物の平均階高、床面積の合計が同一であれば、規模の小さな建物が多いほど運動量に対するドラッグ効果の影響で風速低減、気温上昇の可能性はある。

参考文献

藤部文昭：関東平野における春・夏季晴天日の気温分布の変化、天気、40-10、pp.29-37、1993

一ノ瀬俊明、花木啓祐、松尾友矩：細密地理情報にもとづく都市人工排熱の時空間分布の構造解析、環境工学研究論文集、31、pp.263-273、1994

神田学、角井充：甲府盆地における夏季晴天日の風系および気温分布の解析、天気、42-11、pp.15-23、1995

守田優：東京の人工熱排出構造とその時間変動について、環境システム研究、20、pp.287-293、1992

Pielke, R.A.: A three dimensional numerical model of the sea breezes over South Florida, Mon. Wea. Rev., 102, pp.115-134, 1974.

Therry, G. and P. Lacarrere: Improving the eddy kinetic energy model for planetary boundary layer description, Boundary-Layer Meteorology, 20, pp.515-531.

Uno, et. al.: Numerical modeling of the nocturnal urban boundary layer., Boundary-Layer Meteorology, 49, 77-98, 1989.

鶴野伊津志：4次元データ同化手法による関東地域の局地循環シミュレーションと評価、大気環境学会誌、30-6、pp.351-366、1995.