

土地利用および人間活動の都市気候へのインパクト評価
-東京23区を例として-
Impact of Land Use and Human Activities on Climate in Urban Area
-Case Study in 23 Wards of Tokyo Metropolis-

下堂 蘭和宏^{*} 一ノ瀬 俊明^{**} 鵜野 伊津志^{***} 花木 啓祐^{**}
Kazuhiro SHIMODOZONO^{*} Toshiaki ICHINOSE^{**} Itsushi UNO^{***} Keisuke HANAKI^{**}

ABSTRACT; The heat island is caused by 2 factors. One is a change of the urban land use, and the other is human activities like energy consumption. In this study, the authors quantified the contribution of urban land use and human activities to the heat island and evaluated the impact of land use's change and human activities' change on urban climate. Numerical simulations were practiced in the 23 wards of Tokyo Metropolis. The results are shown as follows;

- ・ The effect of anthropogenic heat on the urban surface temperature is around 1.5℃ in summer and 2.5℃ in winter at the most. And the urban land use effects around 1℃ in both seasons.
- ・ If 20% of the whole building area turns into the park, the surface temperature will decrease around 0.5℃, and if into the water, around 1℃ at the most.
- ・ If 100% of the anthropogenic heat for cooling use is decreased, the surface temperature will decrease around 0.5℃ at the most.

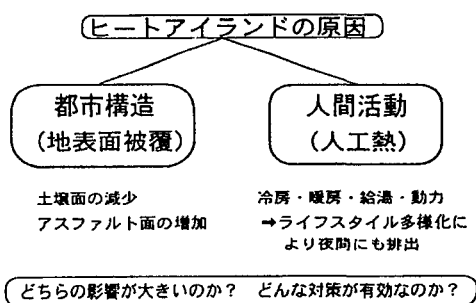
KEYWORDS; heat island, numerical simulation, land use, anthropogenic heat

1. はじめに

都市化の進展により、ヒートアイランドは深刻な問題となっている。ヒートアイランドの原因は大きく2つに分けられる(図1)。

第一には、都市構造の変化である。都市化によって土壌面は少なくなり、アスファルト舗装面が大部分を占めるようになる。蒸発効率や比熱など多くの点でアスファルト舗装面の熱特性は土壌と異なっている。特に蒸発効率の低下は地表面からの潜熱を減少させ、顕熱を増加させる。これは直接に都市域の高温化をもたらす。

第二には人間活動の変化である。人々の生活によりさまざまな形で多くの人工熱が排出される。近年のライフスタイルの多様化により、都市では夜間でも相当量の人工熱が排出されている。これらの熱が都市域の高温化をもたらしていることは明らかである。本研究では以上のような背景を基に、都市構造、人間活動がそれぞれどの程度ヒートアイランドに寄与しているのかを定量的に示すこと、さらに、その



(図1) ヒートアイランドの原因

^{*} 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 Department of Urban Engineering, Univ. of Tokyo
^{**} 東京大学先端科学技術研究センター Research Center for Advanced Science and Technology,
Univ. of Tokyo
^{***} 国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies

結果を踏まえてさまざまな都市構造及び人間活動変化のシナリオについて、都市の気温に与えるインパクトを評価することを目的とした。

フィールドには東京23区を選定し、数値シミュレーションによる解析を行った。

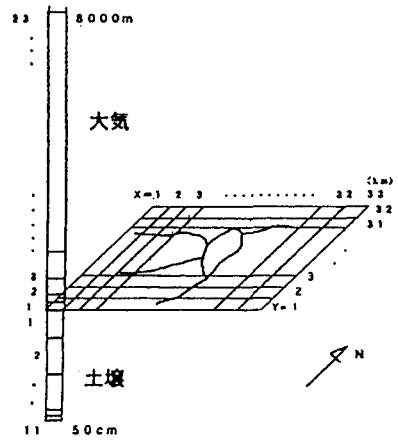
2. 解析方法および条件

2.1 モデルの概要

モデルとしてはメソスケール気象モデルNIESMMを用いた。これは、Pielke (1974) ¹⁾ を原型として改良されたものである。本研究を行うにあたってさらに、地表面パラメータや人工排熱をグリッドごとにファイルから読み込めるよう改良を行った。基礎方程式は非圧縮、静力学平衡、ブシネスク近似を仮定しており、運動方程式、熱エネルギー保存式、水蒸気保存式、連続の式などで構成されている。水平差分は3次元スプライン関数による風上差分、鉛直拡散については重み付きのクランクニコルソン法によっている。

2.2 計算条件

東京23区をカバーできる東西33×南北32(km)のフィールドを設定した。dx=dy=1kmとしている。鉛直方向については大気23層（上空8000mまで）、土壌11層（地中50cmまで）である（図2）。ヒートアイランドが顕著になる気象条件としては冬の夜間²⁾、風が弱いこと³⁾などが知られている。また、実際にヒートアイランドが都市生活に不快感をもたらしているのは夏の日中の猛暑や熱帯夜を通じてである。よって解析対象日としては夏と冬の典型的な静穏日を1日づつ選択することとした。極東天気図及びAMeDASデータより、夏については1989年7月22日が、冬については1989年2月3日が解析対象日として選択された。計算は午前6時から始め、24時間分を行った。数値計算の安定性を確保するため、計算間隔は10秒としてある。なお、6時における地上の気温、風向き、風速、相対湿度の初期値は計算領域（陸上）全体で一様とし、大手町（AMeDAS等）の観測値を与えた。計算の初期条件を（表1）に示す。



（図2） モデルのグリッドシステム

2.3 入力条件

都市構造を表す地表面パラメータと、人間活動を表す人工熱をモデルに入力した。

地表面パラメータはアルベド、蒸発効率、地表面粗度、密度、比熱、熱拡散係数の6種類を入力した。これらのパラメータは田、畑、果樹園、公園・緑地、森林、荒れ地、建物用地、交通用地、その他の用地、水面の10種類の土地利用ごとに与えられている（表2）。入力データはグリッド内の各土地利用別の面積に応じて与えられたパラメータを加重平均することで計算した。ここでグリッド内の各土地利用ごとの面積は、東京都都市計画局による土地利用現況調査（昭和61年度）の25mポイントサンプリングデータを用い、1kmメッシュに編集している。

ただし、粗度については建物用地の面積だけでなく建物の配置によっても変化する値であるため、厳密にはメッシュごとの加重平均は好ましくない。

（表1） 計算初期条件

	夏	冬
緯度 (度)	35.6	35.6
日付(Julian Day)	207	34
地表面気圧 (hPa)	1000	1010
地表面気温 (K)	298.0	276.0
海上の表面気温(K)	298.0	280.0
温位勾配 (K/cm)	0.000055	0.000060
相対湿度 (%)	70.0	60.0
比湿 (g/kg)	0.00001	0.00001
風向	南	北西
風速 (m/s)	0.5	0.5

しかし、モデルの感度解析を行った結果粗度に対するモデルの感度はあまり高くないことからここでは他のパラメータと同様の方法を用いた。

人工熱は一ノ瀬ら⁴⁾による原単位を用いた。一ノ瀬らの原単位は建物用途別、季節別に、床面積あたりの熱発生量の時間値となっている。また、冷房、暖房、給湯、動力などエネルギーの用途別にも分類されており、冷房を行わないと仮定した場合など様々なシナリオのシミュレーションが行える形になっている。ここでは前述の土地利用データから建物用途別の床面積を1kmメッシュ単位で算出し、これに一ノ瀬らによる原単位を乗じることで、発生する人工熱を季節ごと、時刻ごとに全てのメッシュについて計算した。ただし、給湯熱についてはその50%は下水に流入するものとして除いた。

(表2) 地表面パラメータ

土地利用区分	アルベド	蒸発効率	粗度 (cm)	密度 (g/cm ³)	比熱 (cal/g/K)	熱拡散係数 (cm ² /s)
田	0.17	0.50	10.0	1.8	0.28	0.0053
畑	0.17	0.30	10.0	1.8	0.28	0.0053
果樹園	0.16	0.30	50.0	1.8	0.28	0.0053
公園・緑地	0.16	0.30	50.0	1.8	0.28	0.0053
森林	0.16	0.35	50.0	1.8	0.28	0.0053
荒れ地	0.14	0.20	15.0	1.8	0.28	0.0053
建物用地	0.18	0.05	50.0	2.4	0.21	0.0072
交通用地	0.18	0.05	50.0	2.1	0.21	0.0038
その他の用地	0.18	0.10	20.0	1.8	0.28	0.0053
水面	0.08	1.00	0.001	1.0	1.00	0.0053

3. 結果と考察

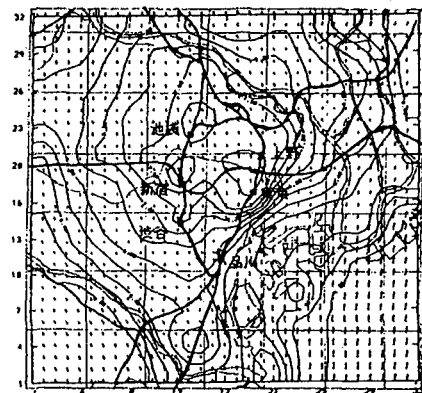
3・1 現状の場合

夏の日中は海風が強く明瞭なヒートアイランドは見られないが、23時頃になると海風が弱くなるため新宿付近を中心とするヒートアイランドが見られる。その強度（明瞭なクリップの外側と都心との気温差）は最高で約1.6℃である。

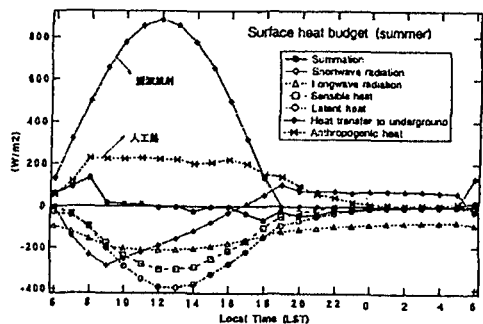
冬は太陽高度が低く、夏よりも海風が弱い。そのためヒートアイランドが明瞭に現れている。20時における地上7.5m（鉛直第2層のグリッドの中心点の高さ）における気温及び風系の水平分布によれば（図3）、大手町、新宿、池袋の3つの最高気温が見られ、ヒートアイランド強度は約2℃である。これは人工熱の排出量が多い地域と一致している。その後も都心の降温がわずかであるのに対して西部における降温が大きいと、ヒートアイランド強度は23時に最高約2.6℃に達し、深夜から早朝にかけてもヒートアイランドは継続して現れる。

ここでヒートアイランドの原因を明らかにするため、都心（大手町を含むグリッド）における地表面熱収支を図化した。ただし、長波放射については大気からのものと地表面からのものをまとめて正味の長波放射として扱っている。図中地表面が熱を受け取る方向の熱輸送を正にとっているため、上向き顕熱輸送や地中への下向き熱伝導は負の値で表現される。

夏（図4）においては太陽からの短波放射の影響が圧倒的に多く、12時に最大800(W/m²)以上に達している。人工熱はその4分の1程度である。大手町付近にはオフィスが多く、日中の人工熱は約200(W/m²)を維持しており、その後は徐々に減少す



(図3) 気温の水平分布（地上7.5m・冬・20:00）



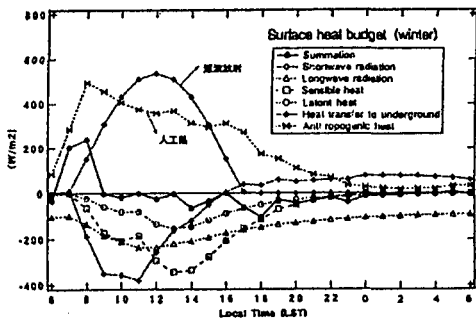
(図4) 地表面熱収支（大手町・夏）

る。午前中は地中への下向き熱伝導が多く、9時に地中熱伝導のピークがある。

その後地中が熱的に飽和してゆくためこの値は減少する。19時以降は短波放射はなくなり、潜熱、顕熱はともに0に近づく。地中熱伝導は17時に向きが逆転し、夜間は正味長波放射（上向き）と平衡する。

冬（図5）においては短波放射のピーク値は約550(W/m²)であり、夏よりも4割ほど少ない。これに対し人工排熱は8時において夏の2倍以上の値となり、短波放射のピークとはほぼ同じ水準である。

人工排熱の急激な立ち上がりのため、それが地中熱伝導などに振り分けられるまでに多少のタイムラグが生じ、地表面に熱が溜まる状態が見られる。これはこの時間帯における地表面温度の急激な上昇を示している。下向きの地中熱伝導は7時以降飛躍的に増加し、11時にピークの約400(W/m²)に達する。この値は夏の約300(W/m²)よりも大きい。夜間には夏と同様に上向き地中熱伝導が正味長波放射と平衡している。



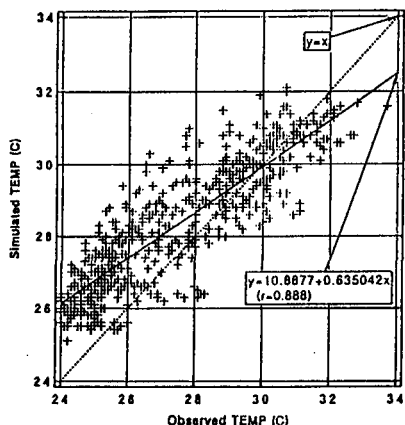
(図5) 地表面熱収支 (大手町・冬)

3・2 実測との照合

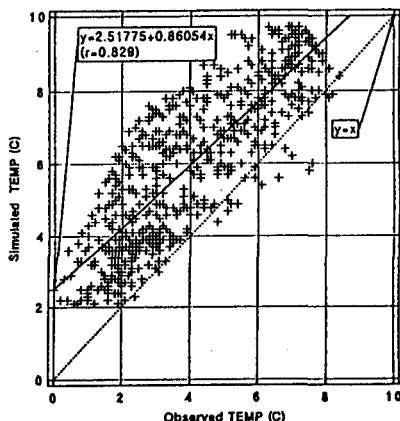
都市構造および人間活動の変化による影響を正しく評価できる地点を選ぶためシミュレーション結果をAMeDASおよび大気汚染常時監視測定網での観測値と照合した。現状の場合での気温変化が実測値と近ければ正しい評価が可能と思われる。

夏には全体的に気温変化が実測よりも小さく見積られる傾向があった（図6）。湾岸地区では気温変化が小さく見積られたが、これは海面水温を不変と仮定したためと考えられる。

冬は気温変化について夏よりも正しく見積もられていることが分かる（図7）。計算気温が実測気温よりも全体的に1～2℃高いが、これは計算の初期値として大手町の実測気温をフィールド全体に適用しているためと考えられる。



(図6) 実測気温と計算気温の関係 (夏)



(図7) 実測気温と計算気温の関係 (冬)

3・3 様々なシナリオによる実行

3・2の結果から、シミュレーション結果が実測結果と比較的一致していた地点を夏冬各4地点ずつ（夏：練馬、大手町、品川、立石、冬：久我山、世田谷、新宿、足立）選び、解析した。

(1) 土地利用および人間活動のインパクト評価

東京23区内の全領域について地表面が草原であるとした場合、また、人工熱の排出が全くないと仮定した場合に気温がどれほど低下するかを調べた。

結果を表3に示す。この気温低下は現状において土地利用（地表面状況）及び人間活動（人工熱）

がそれぞれどの程度東京23区内のヒートアイランド現象に寄与しているかを示すものである。夏のヒートアイランド形成については、日中は地表面状況による影響が人工熱によるものを上回り、夜間は逆に人工熱による影響が地表面状況による影響を上回っている。

これに対して冬のヒートアイランド形成については、日中、夜間ともに人工熱による影響が地表面状況による影響より大きい。

(表3) 地表面状況と人工熱のヒートアイランドに対する寄与

		地表面状況の寄与	人工熱の寄与
夏	日中	約1℃	約0.5℃
	夜間	約1℃	約1.5℃
冬	日中	約0.2℃	約1℃
	夜間	約1℃	約2.5℃

(2) 土地利用および人間活動の変化による影響の評価

東京23区の土地利用及び人間活動を変化させた場合、気候に与える影響がどれほどかを評価した。ここではヒートアイランドが直接都市域の快適性を損なう原因となっている夏に限定して解析を行った。評価は現状の場合のシミュレーション結果(3.1で述べた)と比べどれほど気温が低下するかを計算することで行っている。結果を(表4)に示す。

土地利用を変化させた場合のうち、建物用地の20%を公園にした場合の気温低下は約0.5℃と小さい。公園が都市域全体の気温を下げる効果は意外に小さいことが分かる。これに対して建物用地の20%を水面にした場合はより大きく気温が低下する。

(表4) さまざまなシナリオによる影響評価

	シナリオ	夏の気温低下
土地利用の変化	建物用地の20%を公園に	約0.5℃
	建物用地の20%を水面に	約1℃
人間活動の変化	冷房熱を100%除く	約0.5℃

しかし、東京23区内の建物用地の20%を水面にするというのは非常に大がかりな事業であるにもかかわらず、約1℃しか気温を低下させることができない。これは、土地利用の改善というアプローチからヒートアイランドを改善することが難しいことを示している。

人間活動を変化させた場合として冷房熱を全て除いたが、気温低下は約0.5℃と小さい。冷房による排熱は都市のヒートアイランドを悪化させているといわれているが、この結果を見る限りでは冷房を全てやめても東京23区のヒートアイランドはほとんど改善されないといえる。動力、照明など冷房以外のエネルギー需要を減らすため、機器の省エネルギー性の更なる向上が望まれる。

4. おわりに

本研究では土地利用および人間活動が都市気候にどのような影響を与えているか、また、都市気候を改善するためにはどのような方策が有効かを東京23区を例に考察した。その結果、土地利用や人間活動が都市気候にかなり大きく影響していることが明らかになった。また、都市気候の改善は容易ではなく、我々のライフスタイル全体を見直すことが必要とされていることが示された。

今後は東京湾、関東平野など東京23区を取り囲んでいる周辺状況も取り入れた形でシミュレーションを行い、そのうえでヒートアイランド改善策をさらに考えたい。

最後に、本研究を進めるに当たり有益なご助言を頂いた松尾友矩教授(東京大学大学院工学系研究科)に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Pielke, R.A. (1974) : A three dimensional numerical model of the sea breezes over South Florida, Man. Wea. Rev., 102, pp.115-134.
- 2) 例えば、河村武・浅井富雄・内田英治 監修 (1986) : 「気象の事典」 平凡社、530p.
- 3) 例えば、藤野毅・浅枝隆・和気亜紀夫 (1993) : 首都圏の夏季のヒートアイランドの形成と地衡風の関係について、環境システム研究、22、pp.280-285.
- 4) 一ノ瀬俊明・花木啓祐・松尾友矩 (1994) : 細密地理情報に基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.