

名古屋市における人工排熱量の推定とその気温影響の解析

Estimation and sensitivity check of the anthropogenic heat in Nagoya city

保刈 和也*^{1,2} 近藤 裕昭*¹ 亀卦川 幸浩*³ 井原 智彦*⁴
Kazuya Hokari Hiroaki Kondo Yukihiro Kikegawa Tomohiko Ihara

*¹ 産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)*² 応用技術株式会社 Applied Technology Co.,Ltd. (現職)*³ 明星大学 Meisei University*⁴ 東京大学 The University of Tokyo

Corresponding author: Hiroaki KONDO, kondo-hrk@aist.go.jp

ABSTRACT

In this study, we estimated the monthly averaged daily variation of anthropogenic heat (AH) in Nagoya city, where the frequency of the extremely hot day with the daily maximum temperature exceeding 35°C is the highest among the three largest cities in Japan. The hourly AH was estimated with a horizontal resolution of about 500 m. In addition, we investigated the effect of the AH on surface air temperature by numerical simulations using a hydrostatic mesoscale model. As a result, the estimated AH explained 83% of the total energy consumption in Nagoya city in 2008. The peak values of the AH in downtown and industrial area were beyond 100 W/m². The impact of AH on the surface air temperature was greater at night, and it was found that AH slightly modified the wind flow and convergence zone in the city.

キーワード: ヒートアイランド, 人工排熱, エネルギー, 名古屋市

Key Words : Urban heat island, Anthropogenic heat, Energy, Nagoya City

1. はじめに

都市域の人間活動によってもたらされるエネルギー消費は、その地域に人工排熱を発生させる。東京都市部での排熱量推定を行った先行研究⁽¹⁾によれば、新宿地区では年平均で 44 W/m², 新宿西口高層ビル街ではピーク時に約 2000 W/m² となると報告されている。このピーク値は夏季日中の最大日射量の 2 倍～3 倍にのぼる。このような人工排熱は、その地域の気温に大きな影響を与える。東京と大阪において、都市街区内での気温観測等を通じ人工排熱が地上気温に与える影響を調査した先行研究⁽²⁾では、それぞれ 16 時に日最大の 1.3°C, 0.9°C に達する排熱による昇温が推定されており、これは決して小さいものではない。

人工排熱は、エネルギー消費の観点から大都市や工業地帯で排出が特に大きい。さらに夏季における冷房エネルギー需要を考えれば、猛暑が厳しい地域ほど大きくなる⁽³⁾。日本の三大都市のひとつである名古屋市は、その中で最も猛暑日の出現頻度が高く⁽⁴⁾、南部の沿岸部は中京工業地域の一部となっている。以上の観点から名古屋市では夏季地上気温に対する排熱の影響の顕在化の可能性が推察される。名古屋市を対象とした先行研究として、水鳥ほか(1994)⁽⁵⁾

があり、同市域における人工排熱の推定の結果、中区付近(市中心部)で年平均 58 W/m² にのぼるとされた。また、名古屋市の排熱削減による熱環境改善の効果を、シミュレーションにより検討した水鳥ほか(1994)⁽⁶⁾では、市内排熱量を半減させたケースで夜間に 0.5°C 程度の気温低下が予測された。このように名古屋市の人工排熱とその影響に着目した先行研究は存在するものの、近年における研究事例は東京・大阪に比べて極めて少ない。

以上を踏まえ、本研究では名古屋市の人工排熱が地上気温と気象場に与える影響を明らかにすることを目的として、名古屋市の人工排熱量の推定を行い、その影響について検討した。ここで、排熱推定の手法には既往研究ではインベントリー分析⁽¹⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾やシミュレーション⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾によるものがあるが、対象地域のエネルギー消費に関する実績データ、建物用途や延べ床面積の GIS データやシミュレーションのための計算パラメーターなど、多くのデータが必要となるため両手法による排熱推定は必ずしも容易ではない。よって、本研究ではウェブ上にあるデータを用いる簡易的な排熱推定手法⁽¹¹⁾を使用し、それをより現実的なものとなるよう改良して名古屋市内全域から排出される人工排熱量を推定した。その後、メソスケール気象数値モデル⁽¹²⁾を用いて

感度実験を行い、排熱が地上気温と日々の気象場にもたらず影響を調べた。

2. 研究手法

2.1 排熱データの推定

本研究での排熱量は、萱場ほか⁽¹¹⁾による手法で推定後、Kannari et al (2007)⁽¹³⁾、名古屋市 (2011)⁽¹⁴⁾によるデータを用いて補正を行った。それぞれについては以下の通りである。また、推定方法を図1にまとめた。

(1) 萱場ほか⁽¹¹⁾による推定 これは、全国の任意領域における人工排熱量の推定を目的とした重回帰分析による手法である。妹尾ほか (2004)⁽¹⁵⁾によって推定された東京都の人工排熱量を目的変数とし、説明変数は、総務省統計局の居住人口と従業者数、国土数値情報の土地利用 11 種の計 13 変数の中からステップワイズ法により選定された。その結果、居住人口密度・従業者数密度・幹線交通用地面積比が選定され、その際得られた偏回帰係数を使用して重回帰式より排熱量の推定を行っている。その精度は、東京だけでなく関東・近畿・東海地方においても概ね良好であるとの報告がなされている(既存排熱データと比較した相関係数 東京：0.97, 名古屋：0.81)。

そこで、本研究では、この手法を名古屋市および東海地方に適用した。説明変数については、居住人口と従業者数は総務省統計局のそれぞれ平成 17, 18 年の 4 次メッシュ値を、土地利用は国土数値情報の土地利用細分メッシュデータ(平成 18 年・1/10 細分メッシュ値)を使用した。メッシュデータはいずれも総務省統計局の地域メッシュ統計により整備されている。3 次メッシュ, 4 次メッシュ, 1/10 細分メッシュとはそれぞれ基準地域メッシュ (約 1 km 四方)、

2 分の 1 地域メッシュ (約 500 m 四方), 10 分の 1 地域メッシュ (約 100 m 四方) のことを指す⁽¹⁶⁾。

重回帰式を以下に示す。

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} \quad (1)$$

Y_i : 目的変数 i メッシュの人工排熱量(W/m²)

β_0 : 定数項

$\beta_{1\sim 3}$: 偏回帰係数(居住人口・従業者数・幹線交通用地)

$X_{1i\sim 3i}$: 説明変数 i メッシュにおける居住人口密度・従業者数密度・幹線交通用地割合 (いずれも 4 次メッシュ値)

(1)式によって、名古屋市および東海地方の人工排熱量を月別時別で 4 次メッシュ毎に算出した。なお、式中の定数項と偏回帰係数は、萱場ほか⁽¹¹⁾のものをそのまま用いた。

(2) Kannari et al⁽¹³⁾、名古屋市⁽¹⁴⁾による推定 人口と交通部門が排熱に寄与すると考える(1)の手法では、工場や発電所等の燃焼施設からの排熱を考慮するのは難しく、萱場ほか⁽¹¹⁾でもそれが示されている。よって、ここではそれを補うことを目的として、名古屋市の領域に対し、大気汚染の排出源データを使用して燃料消費量を逆推計し、大規模燃焼施設が存在する地域について燃料消費による排熱量を推定した。

具体的には、Kannari et al⁽¹³⁾にある EAGrid2000-JAPAN データの MAPgrid2000 月別時刻別 CO₂ 排出量(3 次メッシュ単位)と、名古屋市⁽¹⁴⁾の産業部門及びエネルギー転換部門における 2008 年度燃料消費構成比と環境省(2003)⁽¹⁷⁾の燃料別排出係数を使用して、大規模燃焼施設が存在する地域での燃料消費による排熱量を推定した。推定における基本的

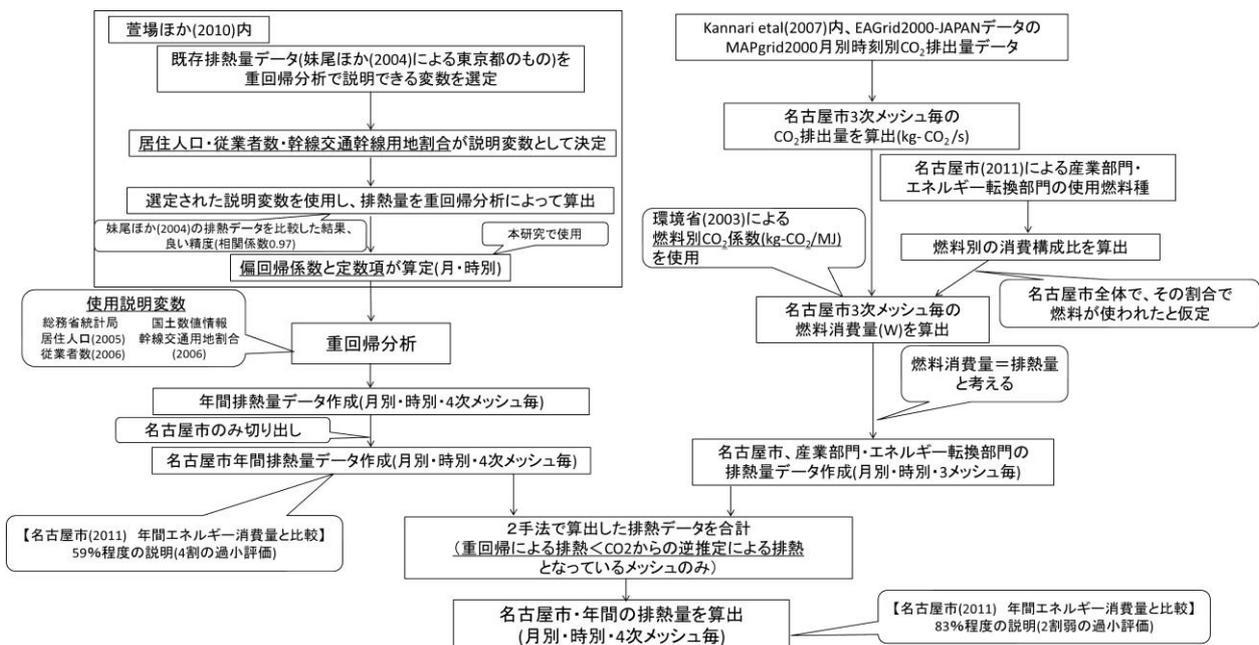


図1. 人工排熱算出手法

な条件及び手法は以下の通りである。

- ① 産業部門及びエネルギー転換部門では、灯油、軽油、A重油、C重油、LPG、石油コークス、石炭、石炭コークス、LNGの9燃料が使用される(名古屋市⁽¹⁴⁾による調査結果)。
- ② 燃料消費の内訳(構成比)は、名古屋市全域で一律と仮定。
- ③ EAGrid2000-JAPANのMAPgrid2000の月別時刻別CO₂排出データから、3次メッシュ毎の1秒あたりのCO₂排出量を算出(kg-CO₂/s)。
- ④ ①②③の条件から、ある3次メッシュ(j)における1秒あたりの燃料消費量(AH_j)を以下の(2)(3)式で算出

$$C_j = AH_j(E_1F_1 + E_2F_2 + \dots + E_9F_9) \quad (2)$$
 より

$$AH_j = C_j / (E_1F_1 + E_2F_2 + \dots + E_9F_9) \quad (3)$$
- ⑤ ④で算出された燃料消費量(AH_j)は産業部門及びエネルギー転換部門における総発熱量であり、発電所を除き、全量が排熱に変わると仮定。
- ⑥ 発電所の場合は総発熱量の15%が大気に排熱されると仮定。

以上、①から⑥の条件で排熱量を算出した。

ここで算出されたメッシュ毎の排熱量は産業とエネルギー転換部門によるもののみであるため、全部門からの排熱を考える萱場ほか⁽¹¹⁾による排熱量を下回らなければならないが、そうでないメッシュは重回帰分析手法によって求めた排熱量が過小評価されていると考え、そのメッシュにおいてこの手法で算出した排熱量を加え、補正を行った。

上記、(1)と(2)の手法から算出した排熱データを最終的に4次メッシュ単位で集約して、後述するメソスケール気象数値モデルに組み込んだ。

2.2 シミュレーションによる排熱影響の感度実験

排熱影響の感度実験には、メソスケール気象モデル(AIST-MM)⁽¹²⁾を使用した。計算・解析条件とモデルの概要は以下の通りである。

- (1) 計算・解析条件 条件設定は表1、図2に示した通りである。

表1 シミュレーションにおける計算・解析条件

計算期間	2011/8/1 11:00 ~ 8/5 10:00
計算領域1	56×60×36 【10km水平格子間隔】
計算領域2	107×107×36 【3km水平格子間隔】
計算領域3	80×120×36 【1km水平格子間隔】



図2 計算領域(図中、赤線が名古屋市)

計算は排熱データ導入あり(現況)・なしの2ケース実施した。気象の日々の変動は大きいため、排熱の気象場への影響が有意であるかどうかを長期平均からみることはそう簡単ではない。ここでは計算の目的を人工排熱が日々の気象場の変動にどのような影響を与えるかをみることにし、計算期間は比較的短期の2011年の8/1~8/5とした。計算領域には、最も外側が日本の中央部を囲うよう約600km四方の領域を設定し、3段階一方向ネスティング手法を用いて、最も内側が名古屋市を含むよう約100km四方の領域を設定した。鉛直方向は全ての領域で36層に分割し、上空5400mまでを計算している。また、外側領域の境界条件としては気象庁の数値予報計算結果(GPV-MSM)を与えた。

(2) メソスケール気象モデル(AIST-MM) AIST-MMは、Kondo et al⁽¹²⁾によって開発された3次元メソスケール気象モデルである。

AIST-MMは上部大気層・接地境界層・土壌層の3層のサブモデルから構成されるビジネス近似を仮定した静力学モデルである。鉛直方向は地形に沿ったs座標系によって表現し⁽¹⁸⁾、上空から地表に向け格子間隔が小さくなる不等間隔の鉛直格子系を設定している。また、接地境界層モデル内、地表面の表現については平成18年度版国土数値情報の土地利用データ(図3)を用い、それに基づいた計算パラメーター(表2)を設定した。各格子の地表面熱フラックスの計算では、その格子での土地利用面積割合に応じて加重平均がなされている。同フラックスを直上の大気境界層モデルの下端境界条件として用いる計算手法が取られている⁽¹⁹⁾。

本研究では、排熱ありの計算において、2.1 で作成した排熱量を領域 3 の大気第 1 層(地上 5 m)に組み込んでいます。排出高度は、重回帰分析で算出した排熱は最下層の計算格子(地上約 5 m)、CO₂ 排出量から逆推定した排熱は、有効煙突高を考慮して地上約 225 m 付近の計算格子で排出されるよう設定した。

3. 解析結果

3.1 人工排熱量の推定結果とその精度

推定された名古屋市内の排熱総量は、表 3 に示すように 1.47×10^8 GJ/year となり、2008 年名古屋市年間エネルギー消費量⁽¹⁴⁾ 1.77×10^8 GJ/year の 83% を説明する結果となった。萱場ほか⁽¹¹⁾ の重回帰式のみによる推定では 1.05×10^8 GJ/year で 59% の説明に過ぎなかったため、本研究の CO₂ 排出量にもとづく排熱データの補正は妥当なものであったと考えられる。

なお、推定した排熱量は単位面積当たりでは名古屋市年平均で 14.31 W/m^2 となり、年代・推定手法ともに異なるが東京都⁽¹⁾での 12.9 W/m^2 を上回る結果となった。

次に、名古屋市内における季節別の人工排熱の変動を見る。図 4 に、夏季(8 月)、冬季(1 月)と中間期(5 月、11 月)における市平均排熱の時間変動を示す。夏季 8 月では 9 時から 18 時にかけての排熱が 20 W/m^2 前後であり、従業者数を排熱推定の因子に使用したことによる昼間の人間活動を捉えていると考えられる。冬季 1 月では、排熱のピークは 8 時(23.19 W/m^2)と 19 時(23.98 W/m^2)の 2 つあり夏季と傾向が大きく異なる。特に、この 1 月 19 時の排熱量は年間最大の値となった。これらは、気温が低い時間帯の暖房需要によるエネルギー消費を捉えていると考えられ、8 時の排熱は夏季同時刻の約 2 倍の数値となっている。中間期の 5 月 11 月はともに大きな差はないが、朝晩の排熱は 11 月の方が若干高くなっている。

続いて、8 月の排熱について考察するため、名古屋市における日平均排熱量の空間分布(図 5)と特定の地域における排熱量(表 4)を以下に示す。ここで、空間分布については CO₂ 排出量データによって補正した効果も考察するため補正前のもも示した(図 6)。

図 5、表 4 によれば、市内中心部や沿岸部での排熱が大きいことが分かる。これは、前者は業務ビルや運輸部門による排熱であると考えられ、名古屋駅周辺や栄地区など局所的には 100 W/m^2 を上回った。後者は工場や発電所など燃焼施設によるものであると考えられ、 150 W/m^2 を大きく上回る地域も存在した。それに対し、図 6 では、市内中心部の排熱量は大きいものの沿岸部での排熱はほぼゼロとなっているのが分かる。これらより、排熱データを補正したことは適切であったことが確かめられた。

ここまでの、排熱の精度検証のため名古屋市のみに着目してきたが、本研究でのシミュレーションは領域 3 に排熱データを組み込んだ計算を行っている。よって、その領域全

表 2 土地利用別の地表面パラメーター

土地利用	アルベド	粗度長(m)	熱拡散係数 ($\times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)	体積熱容量 ($\times 10^6 \text{ Jm}^{-3} \text{ K}^{-1}$)
1. 田	0.2	0.1	0.6	2
2. その他の農業用地	0.2	0.2	0.6	2
5. 森林	0.2	0.3	0.3	2
6. 荒地	0.25	0.1	2	4
7. 建物用地	0.13	1	3.3	2.1
9. 幹線交通用地	0.13	0.2	2	2
A. その他の用地	0.25	0.1	1	2
B. 河川および湖沼	0.07	0.001	0.6	4.2
E. 海浜	0.2	0.05	1	2.9
F. 海水域	0.07	0.2	0.6	4.2
G. ゴルフ場	0.26	0.05	1	2

表 3 名古屋市人工排熱概要

2008年度 エネルギー消費量 ⁽¹⁴⁾	1.77E+08	GJ/year
推定年間総排熱量	1.47E+08	GJ/year
平均排熱量	1.43E+01	W/m ²



図 3 名古屋市内における土地利用
(平成 18 年版国土数値情報)
(凡例中の番号は表 2 の土地利用分類に対応)

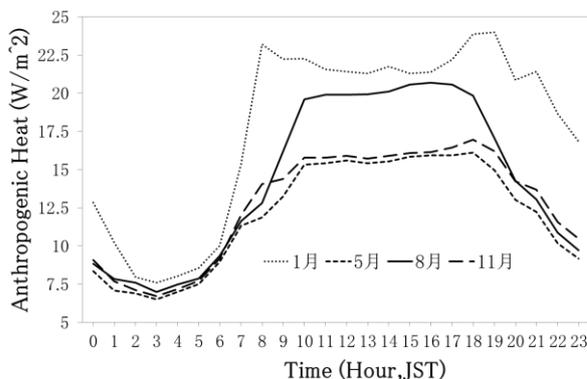


図 4 季節別人工排熱時系列(名古屋市平均)

体における8月日平均排熱分布(図7)を示す。

図7によれば、名古屋市全体の排熱が高いことが分かるが、その他岐阜市(15.09 W/m²)や春日井市(10.31 W/m²)、四日市市(18.93 W/m²)など人口が密集している特例市・中核市でも排熱が大きくなっていることがわかる。また、排熱が線状に大きくなっている地域は、中央自動車道や東名自動車道などの高速道路によるものであり、重回帰分析手法で幹線交通用地面積比を導入したことにより運輸部門による排熱が考慮されていることを示す。

3.2 シミュレーションで見られる排熱の影響

以降、排熱推定結果を踏まえ、それが気象場に与える影響について検討した。

まず、排熱を考慮した現況ケースの精度を確かめるため、地上気温(計算値は地上約5m、大気最下層の格子点値)について名古屋気象台における実測値(地上1.5m)と比較をしたのが図8である。8/1を助走期間としてはずした期間中の平均誤差と二乗平均平方根誤差(RMSE)は、それぞれ0.66℃、1.69℃であった。図によれば、期間前半で気温の大きな乖離があることが分かる。これは、8/2に名古屋気象台で5mm/日の降水を観測したが、計算ではそれを捉えることが出来なかったことが原因とみられる。従って、本研究における排熱による影響調査は、期間後半(8/3以降)を対象にして解析を行うこととした。その期間の平均誤差とRMSEはそれぞれ0.15℃、0.80℃であった。

次に、排熱あり(AH_on)の現況と排熱なし(AH_off)の2ケース計算で見られる地上気温の日変化について注目した。

図9、図10に、それぞれ名古屋市都市部(名古屋駅・栄駅付近)と郊外(守山区)における地上5mの計算気温と排熱量を示した。図中には8月3日と4日の計算結果について両地域での計算グリッド5格子から気温と排熱量を取り出し、その時刻別の2日間5格子平均値が示されている。都市部の日最大排熱量は110 W/m²(15時)、最小は13.83 W/m²(3時)であるのに対し、郊外の日最大排熱量は7.65 W/m²(17時)であり、一日を通じて都市の排熱量が郊外を上回っている。

図によれば、いずれも現況ケース(AH_on)の方が計算気温が高いことが分かる。排熱有無によって生じる気温差は、日平均で都市部は0.56℃、郊外は0.35℃となった。その地域差は日中(6:00~18:00)に大きく表れており、その時間帯の平均気温差は都市部は0.5℃だが、郊外は0.2℃であった。郊外の小さい排熱では日中の発達した混合層への感度は小さいことが考えられる。排熱による気温差が大きく現れるのはどちらの地域も夜間で、平均気温差は0.63℃(都市)、0.52℃(郊外)である。この理由としては、夜間は日射がないことや境界層が薄いことで排熱による影響を受けやすいことが原因であると考えられる。

以上から、排熱による地上気温への影響は排熱量が大きい日中よりも小さい夜間に強く表れることが確認できた。しかし、都市と郊外における夜間の排熱量の差(約10:1)を考えると、気温差の地域間差は大きくないと言える。こ

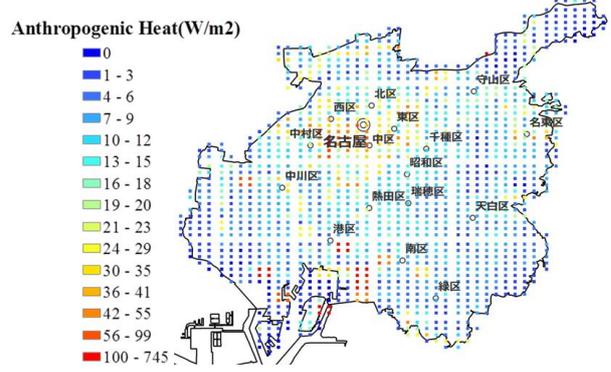


図5 8月における排熱空間分布(日平均)

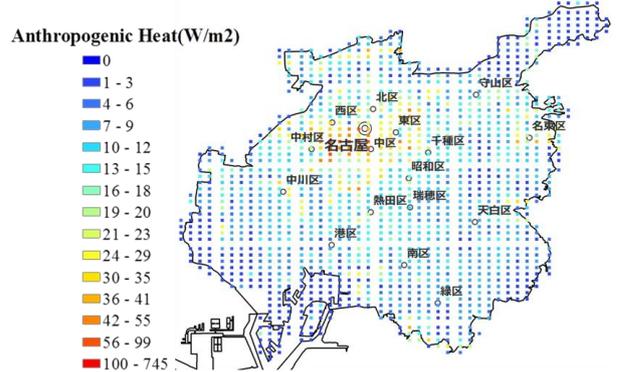


図6 図5と同じ

(但し重回帰分析手法のみによる推定結果)

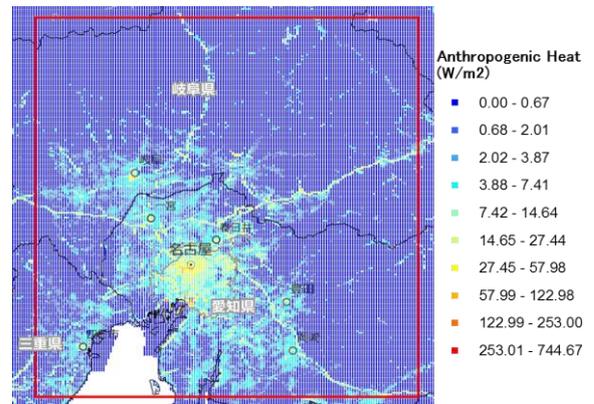


図7 計算領域3における排熱分布(8月日平均)

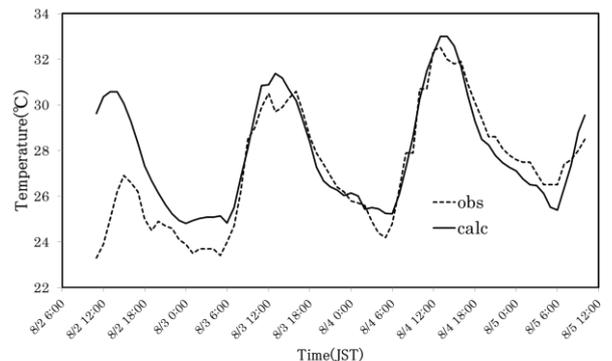


図8 名古屋気象台における気温時系列

の理由としては、夜間の境界層高度は都市部が高く郊外では低くなっていることが考えられ、低い郊外でより昇温しやすくなり今回のような結果が生まれたと考えられた。それらを確認するため、排熱量を導入しない計算で都市部と郊外におけるグリッドの鉛直気温プロファイルを見たのが図11である。それぞれの具体的な地点は、都市部は栄駅付近で郊外は守山区の北東部である(いずれも、図9、図10で示した計算グリッドのひとつ)。

図11によれば、両地点で地表付近に逆転層が存在してい

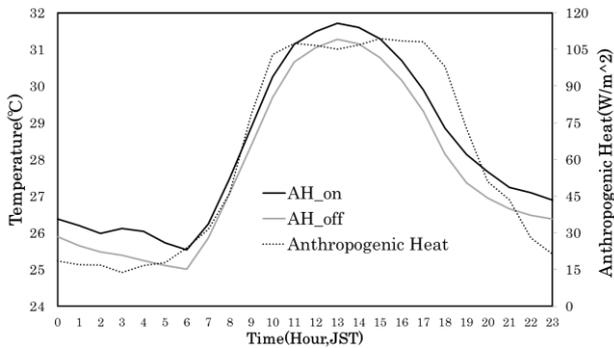


図9 都市における気温排熱時系列(5グリッド平均)

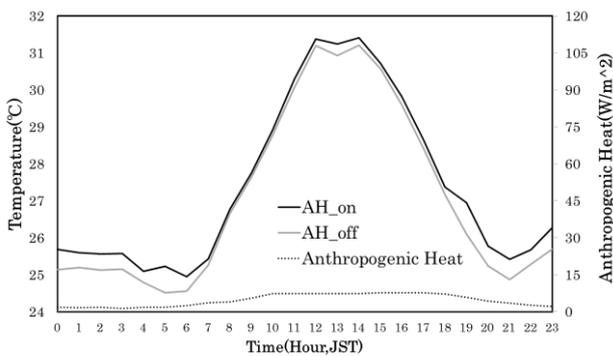


図10 郊外における気温排熱時系列(5グリッド平均)

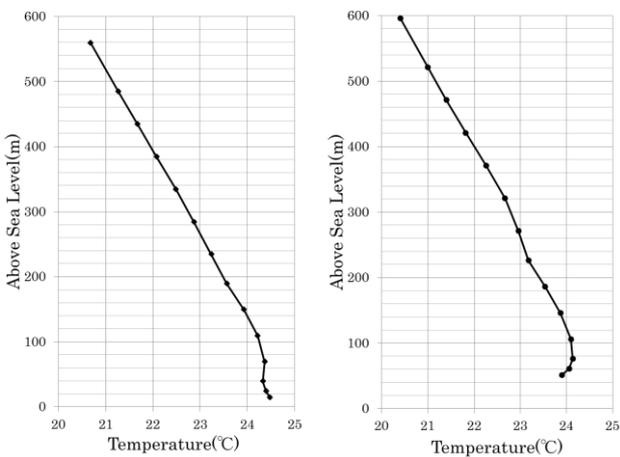


図11 都市(左)と郊外(右)における気温鉛直プロファイル
(どちらも 8/3 5:00 標高: 都市 9m 郊外 46m)

るのが分かるが、都市部でのそれは地表に接地しておらず上層逆転層となっており、排熱がない計算でも都市の効果が地表付近に現れていることが確認できる。また、郊外では夜間接地逆転層が見られた。これらの傾向は、他の計算グリッドでも同じであり、夜間における都市部と郊外の鉛直プロファイルとしては典型的なものであると考え、逆転層高度の地点差に着目した。逆転層高度は都市部で地上90m、郊外で地上45mであった。逆転層高度が半分で都市部と郊外の排熱差が約10:1であると考え、郊外の昇温量はやや大きすぎることから他に昇温を起こす原因があると考えられるが、上述の鉛直プロファイルから郊外の大気は都市部に比べ昇温しやすい成層構造を有し、夜間昇温の原因の一つであることが示唆された。このような傾向は他都市でも報告されている⁽²⁰⁾。

さらに、計算領域3での排熱による広域の影響を解析し

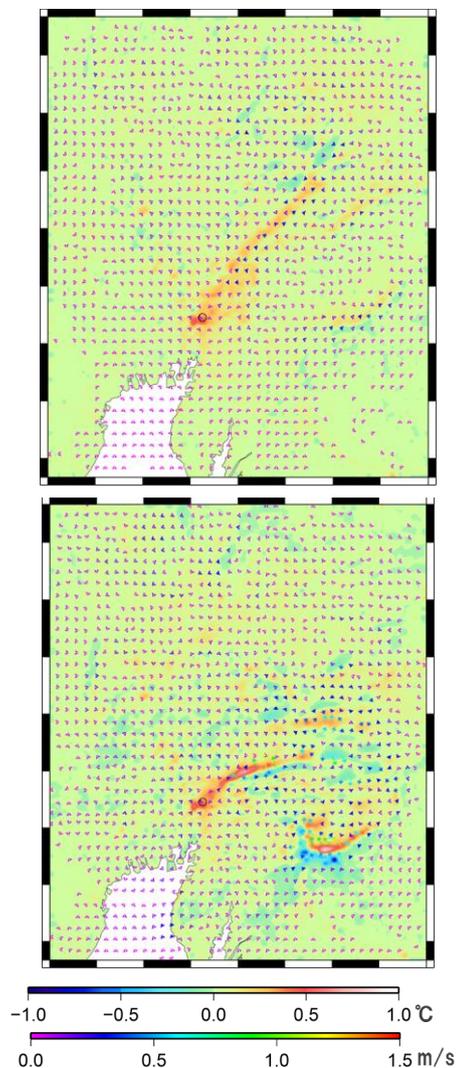


図12 計算領域3における地上気温と風のベクトル差
(上図: 8/3 下図: 8/4 いずれも 14:00
図中の○印は名古屋市役所を示す)

た。図 12 に日中(8/3 と 8/4 の 14:00)における排熱有無の 2 ケース間の地上気温差と風のベクトル差(いずれも, “排熱あり-排熱なし”, 地上約 5 m の最下層格子点値)を示す。図によれば, 名古屋市中心部とそこから北東に線状に昇温しているのが分かる。また, 工業地域が広がる沿岸部ではほとんど昇温が見られない。これは工場地域では排熱を上空で排出したことが大きな原因であると考えられ, 高い位置からの排熱は地上気温には大きな影響は与えないことがわかった。多くの場所で風のベクトル差はほとんど無いか非常に小さい。名古屋市北東部などに線状の昇温部が見られたのは, 排熱データを計算に組み込んだことで, 風場が若干変化した(風のベクトル差が他の部分に比べやや大きい)ことによる影響であると考えられる。特に, 2 日間を通してみられる名古屋市北東部の昇温帯は, 伊勢湾から名古屋市内を通る海風と太平洋から知多半島や知多湾を通

過して名古屋市東部を通る海風の収束帯と一致する。排熱を計算に組み込むことでその収束場の位置がわずかに変化し, それによって気温差が生じたと考えられる。以上から, 日中での排熱による昇温は, 日々の結果でみると排熱量が大きい地域と風場が変化する地域で見られることが分かった。

続いて, 夜間における排熱影響を見る。図 13 に夜間(8/3 と 8/4 の 2:00)の “排熱あり-排熱なし” のケース間の地上気温差と風向風速差を示す。気温差が現れた部分の南側で内陸に向かう矢印が大きくなる部分が見られ, 排熱なしのケースに比べてこの部分で内陸に向かう風が強くなっていることがわかる。図によれば, 昇温は名古屋市以外の排熱がほぼゼロである地域にも広がっており, 都市部の排熱が移流や拡散によって運ばれていることが示唆された。特に, 排熱導入前後で風況が局所的に大きく変化している地域の

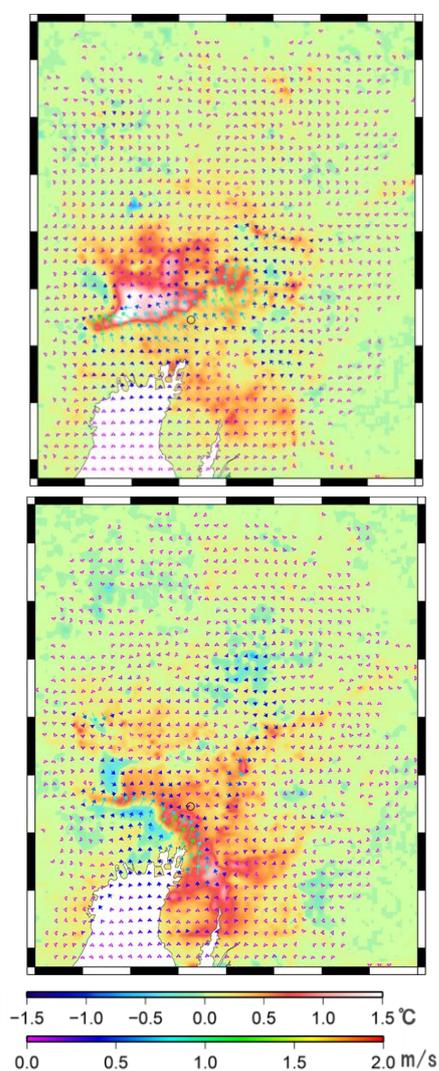


図 13 計算領域 3 における地上気温と風のベクトル差 (上図: 8/3 下図: 8/4 いずれも 2:00 図中の○印は名古屋市府所を示す)

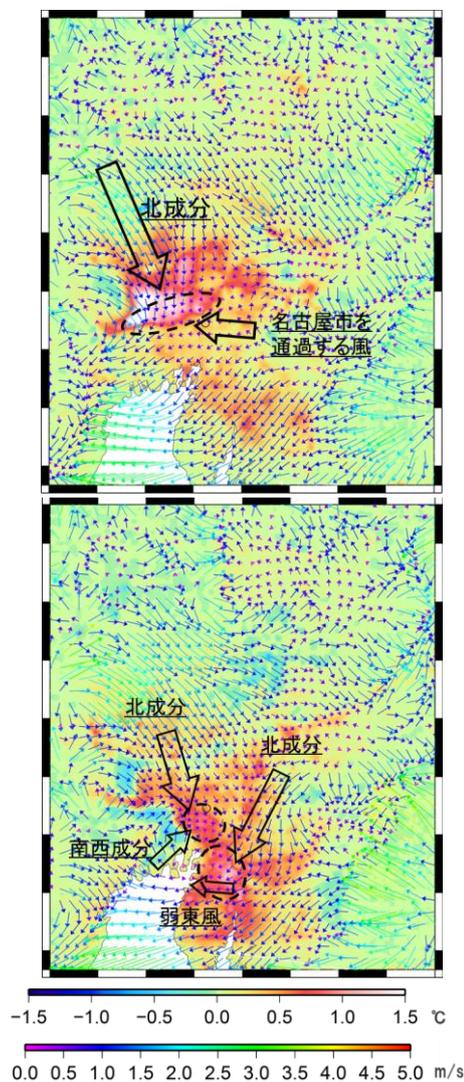


図 14 地上気温差(地上約 5 m: 排熱あり-なし)と排熱導入計算の風(上図: 8/3 下図: 8/4 いずれも 2:00. 図中の○印は名古屋市府所を示し, 点線内は昇温が大きい地域を示す.)

昇温量が大きい。そして、排熱が大きい地域と昇温域は一致していないことがわかる。これらの現象は夜間全ての時間帯で生じており、夜間には排熱量の大小よりも、排熱があることによって発生する風況の変化が、昇温量に影響を与えていることが考えられる。

従って、図 11 で考察した夜間における郊外の昇温量が、鉛直気温プロファイルのみでは説明しきれなかった部分は、ここで述べた風況の変化による影響が昇温をもたらしたと考えられる。

以上より、夜間に昇温が発生する地域では風向風速の変化が大きく影響することが確認できたことから、昇温部における地上風系の変化を詳細に見る。図 14 に、図 13 と同時刻における“排熱ありー排熱なし”の気温差に、排熱ありケースの地上風を重ねた分布を示す。図によれば、8/3 の事例では名古屋市北西部にある昇温域(図中、点線内)で、北寄りの風と名古屋市内の方向から吹く東風が収束しているのがわかる。8/4 の事例では、昇温部は 2 ケ所あり(図中、点線内)、そのうち北側にある昇温部は名古屋市中心部の南側に位置し、北風と南西風の収束帯で昇温が発生している。南側にある昇温部についてはその付近で北からの風が弱い東風に追いつくような形で収束している。排熱がない計算では、この付近における東風が見られず、排熱が風の場を変化させ、昇温させたと考えられる。

排熱ありケースの夜間にみられた風の収束と昇温場が一致する現象は、他の時間帯でも発生していた。それゆえ、夜間の昇温には風向風速の変化とその収束が大きく影響を及ぼしていることが考えられた。

4. おわりに

本研究では、名古屋市を中心とした東海地方において、人工排熱量を web 上から入手可能な情報により推定し、それが夏季の地上気象場に与える影響を数値シミュレーションによって検討した。その結果、以下の知見を得た。

- ・重回帰分析手法と EAGrid2000 の CO₂ 排出量データを使用して推定した人工排熱量は、名古屋年間エネルギー消費量の約 83% を説明した。重回帰分析手法のみで推定した場合は約 59% の説明にすぎなかったことから、CO₂ 排出量データを産業部門の排熱推定に使用したことは妥当であったと考えられた。
- ・名古屋市平均の季節別の特別人工排熱量は、夏季(8 月)においては 10 時～18 時に大きく、約 20 W/m² であった。冬季(1 月)においては一日を通じて夏季の値を上回り、8 時から 22 時までは 20 W/m² を越え、19 時における 23.98 W/m² は年最大値であった。
- ・排熱分布を 8 月日平均で見ると、名古屋市では市内中心部(名古屋駅や栄地区)と沿岸部工業地帯で大きく、前者では約 80 W/m² を、後者では 100 W/m² を上回るメッシュも存在した。また、他県の特例市や中核市などでも 15 W/m²

程度の排熱が推定される地域も存在した。

- ・このような排熱の有無が日々の気象場にどのような影響をみるためにシミュレーションを 2011 年の 8/1～8/5 を対象としたシミュレーションを実施した。計算期間中 8/2 には降水があり、期間の前半の計算と実測の一致度は悪かった。期間の後半のシミュレーション結果は晴天日で比較の実測との一致はよく、これより、排熱による地上気温への影響は、日平均で都市部(名古屋駅・栄駅付近)は 0.56°C、郊外(守山区)は 0.35°C であった。それを昼夜で分けると、昼間は都市部：0.5°C、郊外：0.2°C、夜間は都市部：0.63°C、郊外：0.52°C であり、気温への影響は排熱が小さいにもかかわらず夜間の方が大きいことがわかった。夜間における気温への影響が、都市と郊外で大きな差となっていないのは、それぞれの地域における気温鉛直構造の違い(逆転層高度)が原因のひとつであると示唆された。
- ・排熱による影響を計算領域全体で見たととき、昼間においては排熱がかなり大きい地域と昇温部が一致する。また、海風の侵入が排熱の影響でわずかに移動し、その部分で線状の昇温帯が見られた。夜間においては排熱が大きい地域と昇温域は一致せず、風の収束場で昇温量が大きくなる現象が見られた。なお、煙突を考慮して上空で排出している産業部門による排熱は、昼夜を通じて地上気温にはほとんど影響は及ぼさないことがわかった。

本研究の総括と今後の課題として、ここで行った排熱推定は重回帰式に必要な変数と CO₂ 排出量データなどの工場排熱を推定できるメッシュデータが揃えば比較的容易に排熱推定を行うことができる。しかしながら、重回帰分析手法による排熱推定は東京都の人工排熱データを基に作成しているため、東京と気候やライフスタイルが全く異なる地域の排熱推定をする際には注意が必要である。それは萱場ほか⁽¹¹⁾でも指摘されているが、同先行研究で名古屋市の排熱推定を行った結果、既存のデータを約 88% 説明したことから、本研究でも同手法を名古屋市に適用した。

しかしながら、本研究では、エネルギー消費量に対して約 60% 程度の説明にとどまり、多くの部分を過小評価する結果となった。この原因として、推定に使用する人口などの変数データの年次にずれがあることが考えられ、萱場ほか⁽¹¹⁾では平成 4 年の既存排熱データを推定するのに、3 つの説明変数は平成 12 年または 13 年のものを使用していた。また、資源エネルギー庁の資料⁽²¹⁾より、人口 1 人当たりの年間エネルギー消費(民生家庭部門)を国勢調査が行われた年で算出すると、平成 2 年は 13.39 GJ/year/人であるのに対し、平成 12 年は 16.66 GJ/year/人であり、1 人当たりの消費するエネルギー量も年によって異なる。これらは、景気や気象条件によって変化すると考えられる。

以上から、重回帰分析で排熱量を推定するには、推定年と説明変数の年次を一致させることや、偏回帰係数にも毎年のエネルギー消費データなどから補正をかけることが必

要であると示唆された。

また、この手法の推定のもととした妹尾ほか(2004)⁽¹⁵⁾の東京都の人工排熱量データには、工場の煙突などからによる排熱量が考慮されていない。ゆえに、本研究ではそれを考慮すべく産業部門からのCO₂排出量データを使用した排熱の補正を行うことで、年間エネルギー消費の83%を説明できるようになった。しかしながら、まだ全体量が過小評価となっている部分については、上述のエネルギー消費の年変動に関する問題に加え、排熱を推定する場の地域特性による影響であると考えられる。特に、愛知県は自家用自動車保有台数が全国で最も多い都道府県であり⁽²²⁾、さらに愛知県の2009年度の1世帯あたりの自家用自動車保有率は1.33台と東京都の0.50台を大きく上回る⁽²²⁾。これを踏まえ、東京都と名古屋市における道路面積1km²あたりの2008年自動車運輸部門年間エネルギー消費量⁽¹⁴⁾⁽²³⁾を算出すると、東京都が 9.42×10^5 GJ/year/km²、名古屋市が 1.03×10^6 GJ/year/km²となった。名古屋市が東京都を上回る結果となり、東京都の排熱推定に使用した運輸部門を考慮する偏回帰係数では名古屋市に対しては過小評価となってしまうことがわかった。

以上、重回帰分析手法を使用した人工排熱の推定には、その年の景気や気象条件、使用データの年次の統一、さらに地域特性などに留意して推定することが必要であると考えられた。

排熱の感度実験に関しては、排熱量はエネルギー消費の観点から気象条件や平日休日によっても変動することを考え、全計算日の天候や曜日を考慮した排熱データの与え方が出来ればより現実的な計算条件の作成が可能になる。また、本研究で行った排熱計算のシミュレーションは5日間といった比較的短い期間であったが、従来は月平均程度の長期平均で排熱の影響を見るが多かった。今回の計算結果はそのような長期平均の解析では見えなかった、排熱の存在が日々の風況を微妙に変化させ、それが昇温化をもたらしている可能性が明らかとなった。今回の計算でみられた昇温域の場所については、日々の気象条件により変化するが、晴天・弱風日の夜間にはこのようなメカニズムは普遍的に生じており、月平均等で与えられる統計的な都市昇温域と昇温の幅は、人工排熱の直接の影響ばかりではなく、人工排熱によって生じた風の場の変化に伴う昇温も無視できないことが示唆された。

本研究での排熱感度実験は、メソスケールモデル単体での計算であった。よって、今後は都市キャノピーモデルを用いた計算を行うことで、人間生活空間である都市街区内における現実的な排熱影響の評価が期待できる。今後は、そういった計算条件のもと、夜間見られたような局地的な昇温域出現のパターン化や熱収支を考慮した解析で、排熱による気象場への影響を明らかとしたい。

謝辞

本研究は、文科省の気候変動適応研究推進プログラム「フ

ードバックパラメタリゼーションを用いた詳細なダウンスケールモデルの開発」(代表 飯塚悟名 古屋大准教授)により実施した。

参考文献

- (1) 資源環境技術総合研究所, 大都市における夏季高温化対策技術の評価手法の開発, (1997), 資源環境技術総合研究所.
- (2) 亀卦川幸浩・大橋唯太・重田祥範・井原智彦・田川稔・井上達也, 東京・大阪における夏季電力消費と都市熱環境の関係性に関する研究, 環境システム研究論文集, 37, (2009), pp.113-123.
- (3) 東京電力株式会社, TEPCO REPORT 特別号, (2003), p.12.
- (4) 国立大学法人名古屋大学, 「気候変動適応研究推進プログラム」平成23年度委託業務成果報告書, フィードバックパラメタリゼーションを用いた詳細なダウンスケールモデルの開発と都市暑熱環境・集中豪雨適応策への応用, (2012), p.2.
- (5) 水鳥雅文・角湯正剛, 名古屋市とその周辺地域における熱環境の実態, 水工学論文集, 38, (1994), pp.363-368.
- (6) 水鳥雅文・田村英寿・丸山康樹, 名古屋市とその周辺地域における熱環境シミュレーション, 環境システム研究論文集, 22, (1994), pp.292-299.
- (7) 一ノ瀬俊明・花木啓祐・松尾友矩, 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, (1994), pp.263-273.
- (8) 足永靖信・李海峰・尹聖皖, 顕熱潜熱の違いを考慮した東京23区における人工排熱の排出特性に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 92, (2004), pp.121-130.
- (9) 亀卦川幸浩・玄地裕・吉門洋・近藤裕昭, 建築物空調エネルギー需要への影響を考慮した都市高温化対策評価手法の開発, エネルギー・資源, 22-3, (2001), pp.55-60.
- (10) 近藤裕昭・亀卦川幸浩・玄地裕・井原智彦・大橋唯太・東海林孝幸, 都市気候・ビルエネルギー連成モデルによるヒートアイランド対策の評価, 日本ヒートアイランド学会論文集, 1, (2006), pp.53-57.
- (11) 萱場互起・青柳暁典・高橋俊二, 重回帰分析による人工排熱量の推定, 測候時報, 77, (2010), pp.137-151.
- (12) H.Kondo, N.Saigusa, S.Murayama, S.Yamamoto and A.Kannari, A numerical simulation of the daily variation of CO₂ in the central part of Japan -summer case-, J. Meteor. Soc. of Japan, 79, (2001), pp.11-21.
- (13) A.Kannari, Y.Tonooka, T.Baba and K.Murano, Development of multiple-species 1 km × 1 km resolution hourly basis emissions inventory for Japan, Atmospheric Environment, 41, (2007), pp.3428-3439.
- (14) 名古屋市, 名古屋地域からの温室効果ガス排出量(2008年)の調査結果, (2011).
<http://www.city.nagoya.jp/kankyo/cmsfiles/contents/0000011/11334/zenbun2008.pdf> 最終閲覧日: 2015.7.7.
- (15) 妹尾泰文・神田学・木内豪・萩島理, 潜熱割合を考慮した人工排熱時空間分布の推計と局地気象に対する影響, 水工学

論文集, 48, (2004), pp.169-174.

- (16) 総務省統計局, 地域メッシュ統計について, (2013)
http://www.stat.go.jp/data/mesh/m_tuite.htm 最終閲覧日 :
2015.7.7.
- (17) 環境省, 地球温暖化対策地域推進計画策定ガイドライン,
(2003)
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/suishin_g/2nd_edition.html
最終閲覧日 : 2015.7.7.
- (18) A.Kasahara, Various vertical coordinate system used for
numerical weather prediction, Mon. Wea. Rev. 102, (1974),
pp.509-522.
- (19) F.Kimura, Heat flux and mixtures of different land-use surface:
Test of a new parameterization scheme, J. Meteor. Soc. of Japan,
67, (1989), pp.401-409.
- (20) 藤部文昭, 都市の気候変動と異常気象. 気象学の新潮流 1,
朝倉書店, (2012).
- (21) 資源エネルギー庁, エネルギー白書 2011, (2011)
<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2011.html/> 最終
閲覧日 : 2015.7.7.
- (22) (一財)自動車検査登録情報協会, 自動車保有台数統計データ,
(2012).
<http://www.airia.or.jp/publish/statistics/number.html> 最終閲覧
日 : 2015.7.7.
- (23) 東京都, 2008 年度 都内の温室効果ガス排出量及びエネルギー
消費量(速報値), (2008).
[http://www.metro.tokyo.jp/INET/CHOUSA/2010/07/60k7f200.ht
m](http://www.metro.tokyo.jp/INET/CHOUSA/2010/07/60k7f200.htm) 最終閲覧日 : 2015.7.7

(Received May 9, 2013, Accepted Jul 6, 2015)