

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

ESTIMATION OF ANTHROPOGENIC HEAT AND VAPOR EMISSION,
AND
THE IMPACT ON LOCAL METEOROLOGY

妹尾 泰史¹・神田 学²・木内 豪³・萩島 理⁴

Hiroshi SENOO, Manabu KANDA, Tsuyoshi KINOCHI, Aya HAGISHIMA

¹学生会員 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

²正会員 工博 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

³正会員 工博 土木研究所水工研究グループ水理水文チーム主任研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁴非会員 工博 九州大学 総合理工学研究院エネルギー環境共生工学部門 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

To evaluate the impact of urban activities on urban climate, anthropogenic vapor emission as well as anthropogenic heat emission in Tokyo was estimated, and urban climate in summer was simulated. The following results are obtained.

- (1) In winter, anthropogenic heat emissions from residential area are greater than those from business area in summer.
- (2) The maximum value of anthropogenic vapor emission exceeds $400\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ in summer. This value is the same level of anthropogenic heat emission in the central Tokyo.
- (3) Air temperature is increased about 0.5°C and the water vapor mixing ratio is increased $0.1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ due to anthropogenic heat and vapor in central Tokyo.
- (4) At north of central Tokyo, the water vapor mixing ratio is increased. Anthropogenic vapor emissions, however, have little contribution to the increasing.

Key Words : anthropogenic heat and vapor, local circulation, Heat Island, RAMS

1. はじめに

近年, 急激な都市の過密化と拡大に伴い, 大都市ではヒートアイランド現象など, 都市熱環境の悪化が顕在化している. 人工被覆・都市のキャノピー構造とならんで人工排熱が都市特有の熱循環を形成し, 都市の局地気象へ大きく影響を及ぼしていることが知られている. また, 近年になって人工排熱(本稿では人工顕熱及び潜熱を指す)の影響はヒートアイランド形成のみではなく, 水蒸気動態への影響が指摘されている. 例えば, 東京都心のオフィス街では冷房機器の冷却塔から人工排熱が水の蒸発潜熱として放出されている(神田ら¹⁾). また, 藤部²⁾は東京都心における湿度の経年変化を解析し, 都心部が多湿傾向になる可能性を示唆した. この可能性は, 近年多発する東京近郊における局地的豪雨への影響という面からも興味深い問題である.

人工排熱のソースとしてのエネルギー消費量は時空間

的に変動するため, 広域・通年の現地調査は困難である. しかし, 都市の局地気象解析には重要な境界条件であることからさまざまな分野で人工排熱の時空間分布の推定が行われた. 特に人工顕熱分布に関しては多くの文献がある. 一方, 人工潜熱に関する解析例は著者の知る限り非常に少なく, 都市の局地気象に与える影響について解析した例はほとんどない.

一ノ瀬ら³⁾は細密な地理情報を用い, 東京23区における季節変化・時間変化を考慮した人工顕熱量の定量化を行った. ここでは, 熱環境負荷のみの解析のため, 冷房機器の排熱特性に伴う潜熱割合に関する議論は省略されている. しかし, 詳細なGISとエネルギー統計値を用いた人工排熱・ヒートアイランドの定量化に関する先駆的研究である. 木内ら⁴⁾は関東全域にデータベースを拡張した. ここではエネルギー消費に対する潜熱放出割合算出および, 冷房により室内の熱量を屋外に放出するプロセス(ヒートポンプ効果)に大きな仮定が含まれる. また, 足永ら⁵⁾は夏季の東京23区における人工顕熱・潜熱

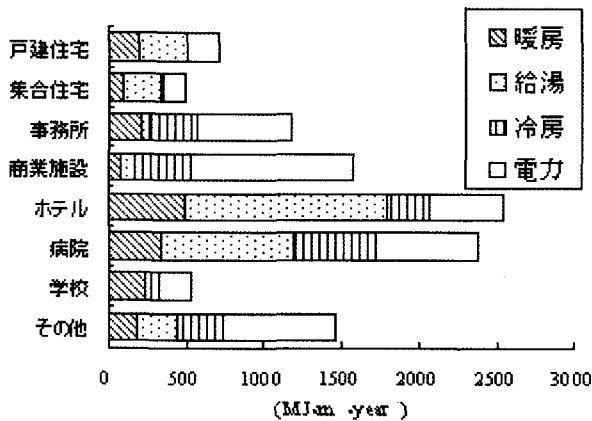


図-1 建物用途別、エネルギー使用用途別
エネルギー消費量原単位

量を推計した。この解析は8月のエネルギー消費ピーク時のみであり、ヒートポンプ効果を排熱量に付加しているため人工的なエネルギー消費活動以上の熱が発生してしまうことになる。そのためメソ気象モデルの地表面境界条件として必ずしも熱収支を満たすとは限らない。しかし、潜熱排出型の冷房機器の導入割合を1505件の空調システムデータベースを基に詳細に検討されており、この手法を本稿でも用いる。

河原ら⁶⁾は自動車及び人体からの潜熱排出を考慮し、東京都における水蒸気動態について解析を行った。その結果、人工潜熱は水蒸気動態へ及ぼす影響が小さいと推測した。しかしここでは、首都圏において主要な人工潜熱源と考えられる建物の冷房からの排出は考慮されていない。

上記を踏まえて本研究のポイントは次に集約される。

- (1) 詳細なGISデータとエネルギー統計値と共に詳細な潜熱排出型冷房機器の割合を導入し、関東地方の時々刻々の人工顕熱・潜熱年間データベースを構築する。ここではエネルギー消費ベースで人工排熱を検討するため、ヒートポンプ効果については議論しない。
- (2) 作成されたデータベースを数値シミュレーションの地表面境界条件として付加し、感度分析を行う。また、従来簡略化されてきた人工潜熱が都市水蒸気動態へ及ぼす影響について検討する。

2. 人工顕熱・潜熱の時空間分布の定量化

(1) 東京都における人工顕熱・潜熱の算出

東京都における人工排熱・水蒸気は以下のような手順で推計した。

a) 建物用途別・エネルギー使用用途別の年間エネルギー消費量の算出

年間のエネルギー消費量算出にあたっては、建物用途別の延床面積に単位面積あたりの建物用途別・エネルギー使用用途別のエネルギー消費量原単位(図-1、文献⁷⁾

表-1 東京都都市計画地理情報システムと本研究における建物用途の対応

東京都データ区分	本研究での区分
独立住宅	戸建住宅
集合住宅	集合住宅
官公庁施設	
事務所建築物	事務所
専用工業	
住居併用工場	事務所50% 戸建住宅50%
教育文化施設	学校
厚生医療施設	病院
専用商業施設	商業施設
住商併用建物	商業施設50% 戸建住宅50%
宿泊施設	ホテル
スポーツ・興行施設	その他

表-2 冷房機器による排熱特性 (単位:%)

	顕熱割合	潜熱割合
直置き吸収式冷温水器	11.3	88.7
地域供給熱源	11.3	88.7
HPパッケージ	100.0	0.0

を参考に定めた)を掛け合わせる方法を用いた。建物用途分類・エネルギー使用用途分類の定義にもよるが、一ノ瀬らが算出した原単位に比べ、病院において30%減少、ホテルにおいて15%減少、学校において50%減少している。また、建物用途別の延床面積は東京都都市計画地理情報システムの平成8・9年度建物用途データを用い建物用途別延床面積の360分の1度(東西方向250m・南北方向308m)メッシュデータを作成した。東京都都市計画地理情報システムにおける建物用途分類とエネルギー消費量原単位における建物用途分類には若干の違いがあるためその対応を表-1に示す。

b) エネルギー消費量毎時値の算出

建物用途ごとの暖房・給湯・冷房・電力に消費されるエネルギーの毎時値は式(1)により求めた。

$$E_{m,h,i} = E|_{year,i} \times \frac{r_{m,i}}{d_m} \times r_{h,i} \quad (1)$$

ここに $E_{m,h,i}$:使用用途別のエネルギー消費量毎時値、 $E|_{year,i}$:使用用途別年間エネルギー消費量、 $r_{m,i}$:使用用途別月別エネルギー消費割合、 $r_{h,i}$:使用用途別時刻別エネルギー消費割合、 d_m :月別稼働日数を表す。これらの値は文献値⁷⁾を用いた。

c) 人工顕熱・潜熱への換算

エネルギー消費量を人工顕熱・潜熱に換算するにあたって、建物内部で消費されるエネルギーは、一度建物内部に集約され、冷房室外機を介して大気へ放出されると仮定した。ある建物で消費される時刻別消費エネルギーは式(2)のように簡単に表される。

$$Q_{m,h,bld} = E_{m,h,a} + E_{m,h,h} + E_{m,h,e} + E_{m,h,w} \cdot (1 - \alpha) \quad (2)$$

ここに $Q_{m,h,bld}$:ある建物で消費される時刻別消費エネ

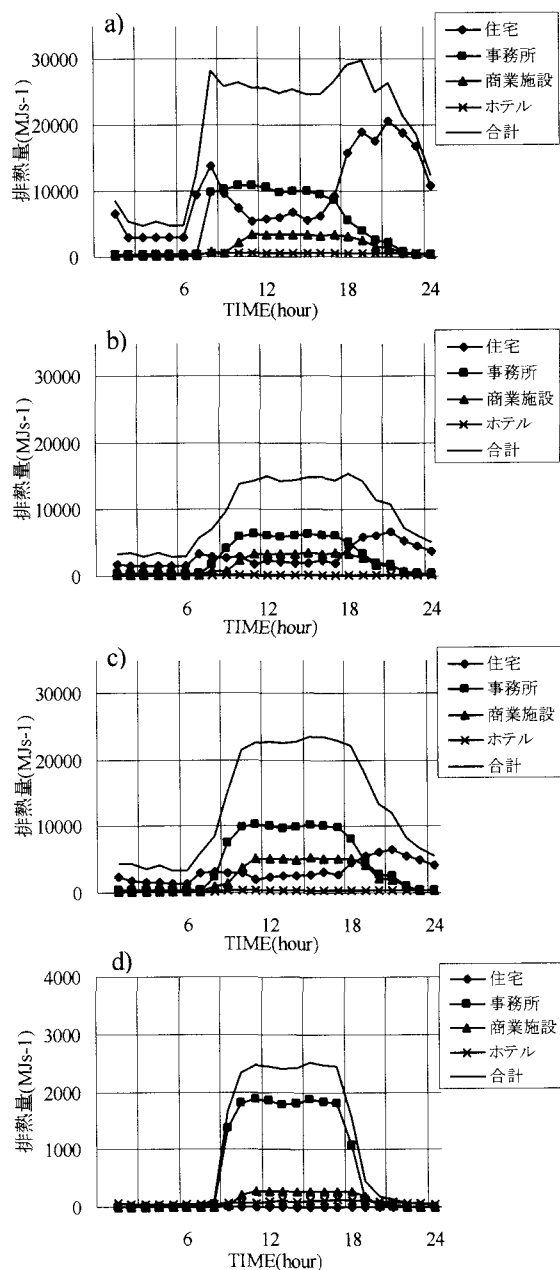


図-2 建物用途別の人工排熱日変化

a) 8月顕熱 b) 5月顕熱
c) 8月顕熱 d) 8月顕熱

ルギー, $E_{m,h,a}$, $E_{m,h,h}$, $E_{m,h,e}$, $E_{m,h,w}$: それぞれ冷房・暖房・電力・給湯の時刻別消費エネルギー, α : 給湯機器効率である。給湯に伴うエネルギー消費のうち給湯機器の効率分(50%, 文献³⁾)は温排水として下水へ流出し, 残りが大気へと放出されると仮定した。

そこで消費されたエネルギーが冷房室外機を通して大気へ放出されると考えるならば, 冷房室外機の性能, 性質が非常に重要な要素となる。冷房室外機の放熱方式は顕熱排熱型と潜熱排熱型に大別される。前者は一般住宅などのルームエアコンなど, 後者は大規模オフィスビルなどの空調システムに代表されるような水の蒸発潜熱により熱を放出するシステムである。そのような潜熱排熱型冷房機器の導入割合を求めるために, 本研究では足永

ら⁵⁾の手法を踏襲する。建物の延床面積規模により冷房機器別の導入割合を整理し, 建物用途(事務所・商業施設・ホテル)・延床面積ごとにそれぞれ3種類に分類した(詳細は文献⁵⁾を参照されたい)。表-2にそれぞれの冷房機器の排熱特性を示す。地域供給熱源の冷却方式はすべて直置き吸収式冷温水器と仮定し, 戸建住宅および集合住宅からの排熱はすべて顕熱とした。また, 建物内部の冷房稼働率を冷房最大需要に対する時々刻々の冷房需要の割合により算出した。

(2) 東京都合計の人工排熱量の季節・時間変化

図-2は東京都における時系列の人工排熱量(2月・5月・8月)を表している。8月は冷房機器の使用により潜熱放出があるため(図-2d)に併記した。住宅の排熱量は戸建住宅および集合住宅の合計値である。

東京都における顕熱排熱量は, 年間を通して日中では事務所から, 夜間は住宅からの排熱が支配的である。これは日中と夜間の人口分布の違いが原因である。

2月(図-2a)の住宅からの排熱には, 朝と夜間に明瞭なダブルピークが見られる。特に夜間のピーク時には, 約20000MJ・s⁻¹であり, 8月(図-2c)の事務所建物からの最大人工顕熱量を大きく上回っている。一ノ瀬ら³⁾の東京23区の排熱量データでは, 午前9時ごろに総排熱量のピークがある。本研究では, 集合住宅やニュータウンの多い多摩地区を考慮しているため, 住宅からの夜間の人工排熱の影響を大きく受ける結果となった。

住宅における日排熱ピーク値は, 5月・8月(図-2b・c)と夏季になるにつれ減少する傾向が見られる。これは, 表-1からわかるように, 住宅でのエネルギー消費原単位に占める給湯・暖房の割合が高いことに起因する。この原因として次のような事が推測される。住民は気温の上がる日中に外出し, 住宅における冷房負荷は高まらない。一方, 冬季は気温の低下する夜間に在宅するため暖房・給湯負荷が高まる。それゆえ冬季の住宅からの排熱量は, 夏季に比べ格段に増加すると考えられる。

その他の業務系建物用途では, 夏季にピークがあり中間期(5月)に最も少なくなる傾向はあるものの日変化パターン自体に大きな変化は見られなかった。事務所・商業施設では消費するエネルギー量の中で電力需要が最も高い。OA機器など電力の使用は季節に依存しないためである。

図-2c・dより, 8月の人工潜熱は同時刻に排出される顕熱量の10%程度であることがわかる。東京23区では約15%である。足永ら⁵⁾によれば, 東京23区における全排熱に対する潜熱の割合は25%程度である。これは足永ら⁵⁾が給湯に伴う排熱のうち46%を潜熱としたためであると考えられる。燃焼排ガスの組成に基づいた仮定であるが, 燃焼排ガスに含まれる潜熱は排出後すぐに凝結するため, 46%が潜熱になるというのは明らかに過大評価で

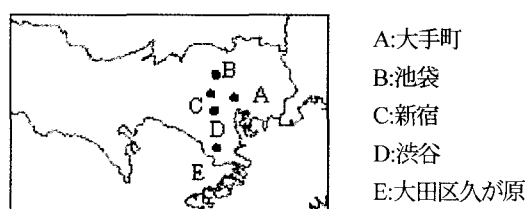


図-3 主要地域の位置関係

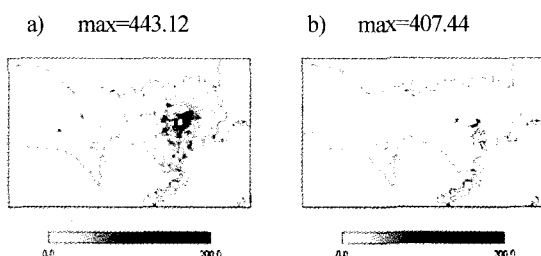


図-4 東京都における8月代表日14:00の人工排熱分布
[a)顕熱, b)潜熱] (単位 $W \cdot m^{-2}$)

ある。

(3) 夏季人工排熱量空間分布

図-4は8月の代表日における14:00のa)人工顕熱・b)人工潜熱の空間分布である。人工顕熱は主要業務地域(大手町・池袋・新宿・渋谷、図-3参照)を中心として $200W \cdot m^{-2}$ を超える大きな排熱量があり、最大では $443W \cdot m^{-2}$ であった。郊外の地域も数十 $W \cdot m^{-2}$ 程度の排熱が見られる。一方、潜熱の分布は非常に狭い範囲にある。これは延床面積の大きなオフィスビルが都心に集中しているためである。潜熱の最大値を記録した大手町・新宿周辺では、 $400W \cdot m^{-2}$ を超えているメッシュもあり、人工顕熱の最大値と同程度である。図-2dにおいて、人工潜熱量は顕熱量の10%程度と解釈されたが、都心に限定して見ると、人工潜熱量は人工顕熱量と同程度であり、都心部のヒートアイランド現象を解析する際、非常に重要な要素であることを示唆している。また、この結果は神田ら⁹⁾による銀座周辺オフィスビル屋上での熱収支観測より推計された人工潜熱量を支持する結果である。

一ノ瀬ら³⁾と比較すると、エネルギー消費の一部が人工潜熱に変換されたため、本研究で算出された都心部における人工顕熱は1～5割低い値となった。一方、環境省⁸⁾のデータと比較すると、都心において人工顕熱・潜熱ともに同等か2割弱程度低い値である。環境省⁸⁾のデータは熱負荷ベースで算出されているため、冷房の使用による室内の熱が屋外へ排出される効果を導入している。そのため、冷房需要の高い都心のオフィスビル街においてその差が顕著に表れたと考えられる。

(4) 人工排熱データベースの広域化

東京都・他県および自動車交通からの8月日総排熱量を図-5に示す。

都市の局地気象の解析には温位や水蒸気の履歴が非常

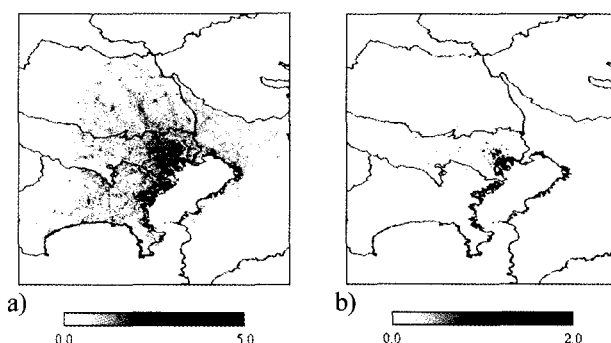


図-5 関東地方の8月の日総排熱量 a)顕熱 b)潜熱
(単位: $MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$)

に重要になるため、人工排熱データを周辺の地域へ拡張した。東京都以外の地域における人工排熱の推計及び自動車交通に伴う人工排熱の推計には木内ら⁴⁾の手法を踏襲する。詳細な延床面積情報が得られない東京都以外の県では、細密数値情報及び国土数値情報における業務系土地利用分類(商業・業務用地・公共公益施設・建物用地)によってエネルギー消費活動の規模を推定した。人工排熱データベース用メッシュ内における業務系土地利用の存在割合に応じて、自治体レベルで整備されている年間の総エネルギー消費量を配分した。また、エネルギー消費量に対する人工潜熱の割合は、東京都における国土数値情報・細密数値情報の業務系土地利用分類のメッシュ内存在割合と、前節で算出された建物用途ごとの潜熱割合を比較して与えた。

自動車交通に伴う排熱は時刻別車種別区間別の交通量と車種別車速別エネルギー消費量原単位⁹⁾を用いて推計した。交通量は、一般交通量調査の交通量データとセンサスベース現況OD表を用い、幹線道路と細街路に分けて推計される。推計手法は文献¹⁰⁾の方法を基本とした。自動車交通からの排熱は排ガスの組成を考慮すると、消費エネルギーの約7%が人工潜熱として放出される。しかし排ガス中の水蒸気の凝結を考慮し、自動車による排熱を全て顕熱と仮定した。

3. 数値シミュレーション

(1) 計算条件

数値シミュレーションには地域気象モデルRAMS (Regional Atmospheric Modeling System)を用いた。このメソスケール気象モデルはすでにさまざまな研究で用いられ(例えばKanda et al.¹¹⁾)、報告されているのでモデルの説明は割愛させていただく。

人工顕熱は式(3)のようにモデル熱収支に組み込んだ。

$$Rn + Q_H = H + IE + G \quad (3)$$

Rn : 正味放射量, Q_H : 人工顕熱, H : 顕熱, IE : 潜熱, G : 地中伝導熱(それぞれ単位は $W \cdot m^{-2}$)。一方、人工潜熱は水蒸気保存式の地表面境界条件としてタイム

表-3 各グリッドの計算条件

	水平格子数	水平解像度(km)	鉛直格子数	鉛直解像度(m)
GRID1	58×48	10	25	
GRID2	62×82	2.5	25	100-1000
GRID3	83×83	0.8	29	
GRID4	86×86	0.2	29	

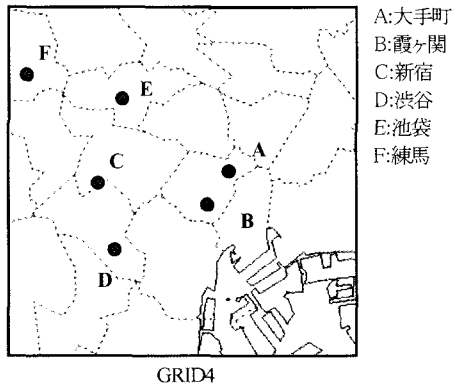
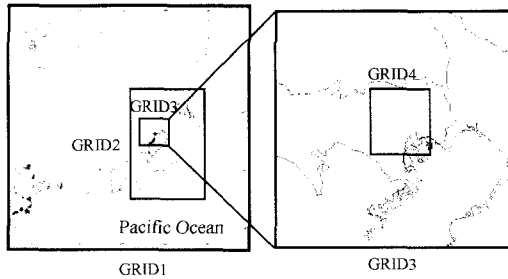


図-6 対象領域

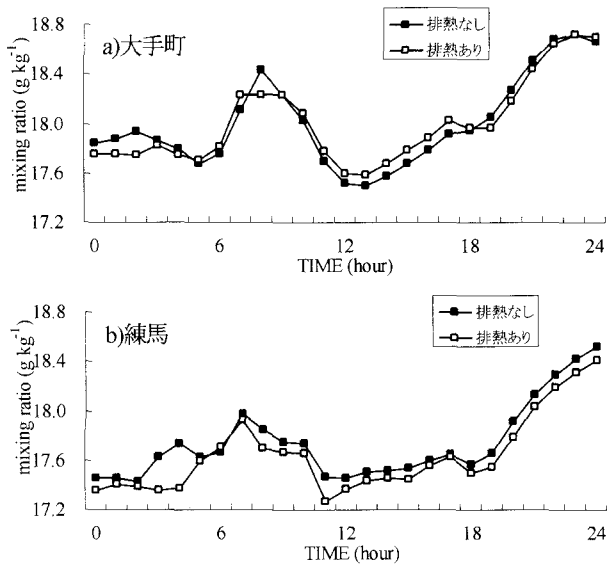


図-7 a)大手町・b)練馬における水蒸気混合比の日変化

ステップ毎に式(4)のように記されるソース項を付加した。

$$S_{\text{vapor}} = \frac{\partial}{\partial z} \frac{Q_{\text{LE}}}{l\rho} \quad (4)$$

Q_{LE} : 人工潜熱 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), l : 水の蒸発潜熱 ($= 2.5 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$), ρ : 空気密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

解析対象日は典型的な夏季南風晴天日として1999年8月2日を選定した。計算は1999年7月31日9:00より開始し、40時間後以降の計算結果を解析対象とした。各計算条件を表-3に、対象領域を図-6に示す。

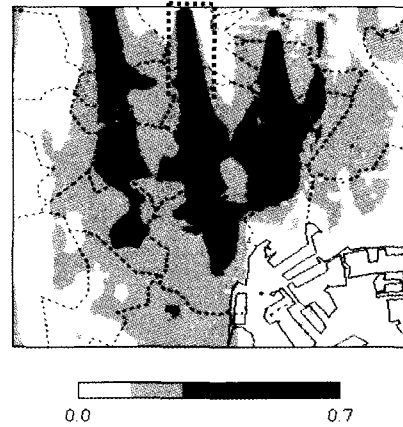


図-8 人工排熱を与えた場合の気温の変化 (単位:°C)

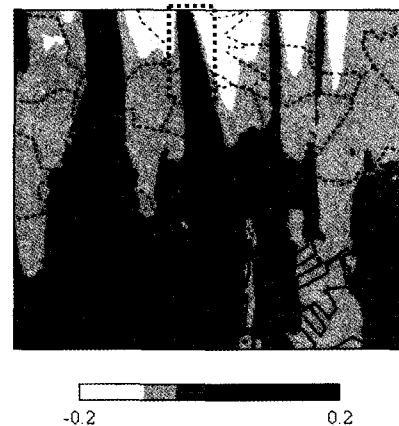


図-9 人工排熱を与えた場合の水蒸気混合比の変化 (単位:g vapor · kg⁻¹ air)

(2) 結果と議論

図-8は8月の正午における人工排熱が及ぼす気温への影響を示したものである。正值は人工排熱によって気温が上昇したことを示し、データの高度は地上10mである。

大手町・霞ヶ関・新宿を中心に約0.5°C気温が上昇している。計算条件にもよるが、Ichinose et al.¹²⁾による数値シミュレーションの結果と同程度の気温上昇である。

図-7はa)大手町・b)練馬における地上10mの水蒸気混合比($\text{g}_{\text{vapor}} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{air}}$)の日変化を、図-9は8月正午における人工排熱による水蒸気混合比(地上10m)の変化を示したものである。表示方法は気温と同様である。

日中の大手町など大規模業務地域において冷房使用により $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 増加している。一方、練馬では終日負の偏差となった。これは、気温の上昇に応じた混合層の発達の影響が大きいものと考えられる。大手町などでは、混合層の発達に伴う水蒸気混合比の低下以上に人工潜熱による水蒸気の供給がなされていると考えられる。

気温および水蒸気に共通して、大規模排熱地域の北側(図-9点線で示された部分)にライン状に人工排熱の影響が顕著な地域が見られる。この地域はちょうど海風の収束線と一致している。人工排熱の影響が顕著である。さらにこの地域は集中豪雨の頻度が高い地域でもあり、

集中豪雨の要因のひとつとしても考えられる。

人工的に排出された水蒸気が人工排熱に伴う局地的な水蒸気増加にどの程度寄与しているかを検討するために表4に示す様なケースを設定した。図-9の点線で囲まれた領域12×35メッシュを抽出し、水蒸気量の鉛直積分値である可降水量を比較検討した。

図-10はすべて横軸をBASE計算による可降水量を、縦軸はそれぞれの計算ケースによる可降水量を示す。

すべての計算条件でBASE計算より大きな値を示している。BASE計算より最も大きな偏差を示したのは潜熱比を考慮せずエネルギー消費量をそのまま人工顕熱としたRUN2であった。顕熱量が等しく、潜熱排出が「あり」・「なし」の違いのみであるRUN1とRUN3では有意の差があるとは言えない。また、顕熱量を低下させ、代わりに潜熱としたRUN4では最も低い上昇幅となった。このことから局地的な水蒸気の増加は人工顕熱の増大に伴い、境界層・海風が発達し海風の収束が強まったことが主要因である。首都圏における主要な人工潜熱源である建物の冷房からの排出を考慮したが、夏季晴天日において人工潜熱の影響は非常に小さいと推測される。

4. 結論

本研究の結論は以下のとおりである。

- (1)東京都における潜熱割合を考慮した人工排熱の時空間分布を推計した。
 - a)住宅地では冬季の21時頃に年最大の排熱量となり、その排熱量は夏季の事務所建物からの排熱量を上回る。
 - b)人工潜熱量は都心部のみに着目すれば、人工顕熱と同程度である。
- (2)冷房からの人工潜熱を考慮した人工排熱データを用い、都市域における局地気象シミュレーションを行った。
 - a)大手町では人工排熱の影響を受け、0.5℃程度気温が上昇する。日中の水蒸気量も $0.1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 程度上昇する。一方練馬においては、水蒸気混合比は低下する。
 - b)人工排熱の影響により都心北部の海風収束帯において水蒸気量の増加が見られたが、人工潜熱の寄与はほとんどないことが示された。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究、科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業(代表:神田学)による財政的援助を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 神田学, 高柳百合子, 横山 仁, 森脇 亮: 銀座オフィスビル街における熱収支特性, 水文・水資源学会誌, 10, pp.329-336, 1997.
- 2) 藤部文昭: 東京都心における高温日の湿度の経年変化, 天気, 49, pp.473-476, 2002.

表-4 感度分析計算条件

Case	人工排熱の与え方
BASE	なし
RUN1	潜熱割合を考慮するが、人工顕熱のみを与える
RUN2	消費エネルギーをすべて人工顕熱とした
RUN3	潜熱割合を考慮した人工排熱(人工顕熱・潜熱)
RUN4	RUN3における人工顕熱の50%を人工潜熱に変換

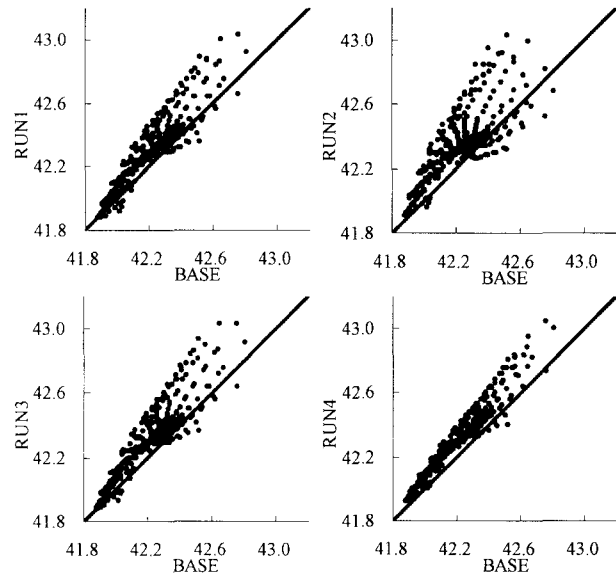


図-10 12:00におけるBASE計算と各計算条件の下での可降水量の比較 (両軸とも単位はmm)

- 3) ノノ瀬俊明, 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, pp.263-273, 1994.
- 4) 木内豪, 吉谷純一: 首都圏における将来の人工排熱量時空間分布の推計, 第30回環境システム研究論文発表会講演集, pp.205-210, 2002.
- 5) 足永靖信, 田中稔, 山本亨, 田口明美: 冷熱源機器の導入割合を考慮した空調システムおよび関連機器の地域排熱量に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 86, pp.77-85, 2002.
- 6) 河原能久, 池田典之, 柏木研一郎: 東京の晴天時における熱・水蒸気の動態解析, 環境システム研究, 25, pp.469-474, 1997.
- 7) 日本地域冷暖房協会: プロジェクト2010日本全国地域冷暖房導入可能性調査研究平成6年度報告書, 1995.
- 8) 環境省: 平成14年度ヒートアイランド現象による環境影響に関する調査検討業務報告書, 2003.
- 9) 環境庁: 未規制自動車からの排出実態調査報告書, 1995.
- 10) 環境庁: 窒素酸化物総量規制マニュアル[改訂版], 1993.
- 11) Kanda, M., Y. Inoue, I. Uno: Numerical Study on Cloud Lines over an Urban Street in Tokyo, Boundary-Layer Meteorology, 98, pp.251-273, 2001.
- 12) Ichinose, T., K. Shimodono, K. Hanaki: Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, Atmospheric Environment, 33, pp.3897-3909, 1999.

(2003. 9. 30受付)