

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

亀卦川幸浩¹・大橋唯太²・重田祥範³・井原智彦⁴・田川稔⁵・井上達也⁶

¹博(工) 明星大学准教授 理工学部環境システム学科 (〒191-8506 東京都日野市程久保2-1-1)

E-mail: kikegawa@es.meisei-u.ac.jp

²博(理) 岡山理科大学准教授 総合情報学部生物地球システム学科 (〒700-0005 岡山市理大町1-1)

E-mail: ohashi@big.ous.ac.jp

³修(総合情報) 岡山大学大学院自然科学研究科 (〒700-8530 岡山市津島中1-1)

E-mail: dns19111@cc.okayama-u.ac.jp

⁴博(工) 産業技術総合研究所研究員 安全科学研究部門 (〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1)

E-mail: ihara-t@aist.go.jp

⁵修(工) 株式会社シーイーシー (〒150-0022 東京都渋谷区恵比寿南1-5-5)

⁶学(工) 株式会社エヌシーエス (〒254-0042 神奈川県平塚市明石町2-20)

夏季の東京・大阪の街区域で計測した気象要素と電力需要量の実態データにもとづき、都市エネルギー需要と熱環境の相互連関性に関わる研究を実施した。その結果、“都心オフィス街-住宅街”の対照的2街区での測定気温差は、両都市とも、平日に比べ休日に減少し、その減少幅は休日オフィス街での人工排熱減少量に概ね比例することが判明した。この2街区気温差の減少は、東京の気象数値実験でも概ね再現され、オフィス街区気温に対する排熱の影響感度(最大1℃強/約100W/m²)が把握された。更にこの影響感度に、街区測定気温にもとづく従来より高精度の電力需要気温感応度を乗じ、熱環境フィードバックによる電力需要押し上げ効果を推定した。その結果、東京の都心オフィス街区では、休日から平日への排熱増に起因したフィードバックにより、14~16時の電力需要が2~2.5%押し上げられていると試算された。

Key Words : urban thermal environment, heat island, electricity consumption, anthropogenic heat, numerical simulation

1. はじめに

都市域に偏在するエネルギー需要は、人工排熱やCO₂排出を誘発し、地域・地球規模の気候変動と因果関係を有する。一方、気候変動下におかれる都市域では、気温変化に代表される熱環境変質の影響が空調用途を中心としたエネルギー需要へフィードバックされる。アジアを中心に世界的に都市化が進行する今世紀において¹⁾、都市のエネルギー需要と気候・熱環境の間に存在する以上の双方向の関係性を明らかにすることは、都市と地球の気候変動がもたらす社会影響やその緩和策を論ずる観点からも、重要な研究課題の一つと位置づけられる²⁾。

上述のフィードバック機構は、都市ヒートアイランド現象に関連する悪循環問題として、即ち夏季の都市高温化に伴う冷房需要増がもたらす排熱増とその帰結としての更なる高温化に関わる懸念として、指摘され久しい。

この問題は、都市の気温が建築の冷房需要エネルギーと空調排熱を変化させ、更に空調排熱を含む人工排熱が都市気温を変化させるという二つの物理過程より成る。前者については、気温と都市や街区スケールのエネルギー需要の相関性を実測資料にもとづき解析し、電力や都市ガス需要の気温感応度などとして定量化した研究例^{3) 4)}が存在する。これらの既往研究は、気象変化に対する冷房や暖房エネルギー需要の都市・街区における実態の応答感度を示唆する意義深いものであるが、解析に用いられる気象資料に関連した問題点を抱えている。即ち、通例として使用される気象台やAMeIDASの露場での測定気温が、解析対象とする都市内の地域や街区空間を代表するとは限らないという問題である。先行研究⁵⁾が示すように、都市内の気温分布はミクロスケール(建物~街区スケール)の非均一性を有し、例えば東京の気象台露場での測定気温が距離数100m程度の近隣の街区路上で

の平均気温と1°C程度も乖離する現象も実測されている⁹⁾。このような都市熱環境の非均一性に加え、エネルギー需要の気象への応答が当該地域を構成する建物の特性とその地域内部の気象状態に左右されることを勘案すれば、気象データについても露場（オープンスペースの芝地上）ではなく、現実の街区空間（都市キャノピー内）で取得された実測値を用いるべきである。

一方、エネルギー需要の変化が排熱変動として都市気温にフィードバックされる二つ目の物理過程については、実測と数値シミュレーションによる研究例が存在する。もともと、現実の都市気温は地表面からの熱輸送や風による熱移流等の効果も複雑に受けるため、人工排熱のみの影響を分離して実測することは極めて困難である。この為、実測にもとづく研究例は多くはないが、代表例として、長期間の気象台測定気温にもとづき東京都心の平日と休日の統計的な気温差を解析したFujibe⁹⁾の研究を挙げることができる。同研究では、エネルギー消費と共に排熱量が減少すると考えられる日曜日の日中の都心気温が平日に比べ0.2~0.3°C低下することが示されている。しかしながら、排熱量を左右する都心のエネルギー消費量は実測されておらず、気温についても現実の街区気温ではなく露場気温が用いられていた。これに対し、近年ではメソスケール気象モデル等の数値モデルを駆使し、排熱が都市気温に与える影響を解析した多くの研究例^{9) 10)}が存在する。それらの中には、メソスケールモデルに街区熱環境を表現する都市キャノピーモデル、更には冷房排熱によるフィードバック効果を考慮するため建築の空調エネルギーモデルまでを完全に結合させたマルチスケールモデルによる研究例も含まれる^{11) 12)}。しかしながら、用いられるモデルや計算条件が異なる場合、排熱に対する都市気温の応答感度にも違いが見られ、かつ、この応答感度について実証的な検証もなされ来っていないのが実情である。

以上の既往研究の問題点を踏まえ、本論文は以下の新規性を有する研究課題の成果を取りまとめたものである。

- (a) 夏季の東京・大阪を対象に、エネルギー消費の水準・時間変動の点で対照性を有するオフィス街区・住宅街区にて同期計測された気象要素と電力消費量にもとづき、排熱が両都市の地上気温にもたらす影響について実態把握を試みる。
- (b) (a)の排熱による気温影響について、計算機シミュレーションによる再現計算を実施し、気象数値モデルの都市熱環境解析への適用性を検証する。
- (c) 既往研究における露場気温とは異なり、現実の街区空間で実測された地上気温を用いて、当該地域における電力需要の気温感応度の実態値を算出し、既往研究の感応度との精度の差異を明らかにする。

- (d) (a)の実測された排熱による気温影響（昇温効果）に(c)の電力需要の気温感応度を加味し、排熱の都市熱環境へのフィードバックに伴う電力需要の押し上げ効果を試算する。

本研究では、以上の一連の検討を通じ、夏季の都市域のエネルギー需要と気温に代表される熱環境の相互連関性の実態解明に寄与することを目的とした。

2. 夏季電力消費と街区気象の実測

(1) 実測手法

著者らは、2007年夏季、東京・大阪において地上気象要素の多点連続計測を実施した^{13) 14)}。観測地域は、両都市ともに、主として中高層の事務所ビルより構成される街区（以降、オフィス街区）と低層の住宅建築により構成される街区（以降、住宅街区）であり、計4つの街区である（図-1）。各街区は500m~1km四方の領域であり、自動車・建物排熱等によるミクロスケールの熱環境の非均一性も考慮し、各街区空間を代表する平均的な気温・湿度等を捉えるべく、各域内に10~19箇所の計測地点を設定した。観測対象街区の形状条件を表-1に示す。東京・大阪ともに、オフィス街区と住宅街区は、建物高度や密度の点で対照的な街区構造を有することが分かる。

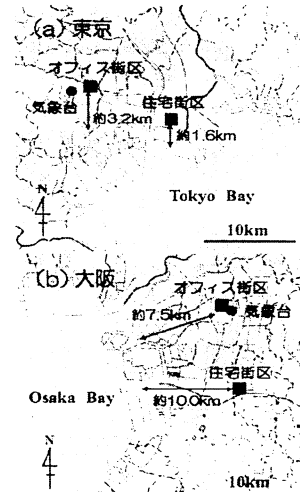


図-1 観測対象街区（上段：東京，下段：大阪）

表-1 対象街区と解析期間

街区	建物 高度 (m)	天空率 (%)	グロス 建蔽率(%)	グロス 容積率(%)	解析期間(2007年8月)	
東京	オフィス街区	28.2	0.26	0.42	2.99	平日:1,6,7,8,9,10,16,20,21日
	住宅街区	10.8	0.65	0.26	0.70	休日:5,11,12,19,25,26日
大阪	オフィス街区	23.9	0.27	0.48	3.27	平日:1,6,7,8,9,10日
	住宅街区	8.9	0.75	0.23	0.58	休日:4,5,11,12日

以上の街区内の各計測地点には、街路樹や街灯を利用

し、地上約2~3mの高度に2台のサーミスタ温度計 (RTR-52; T&D 社製) を内蔵した自作乾湿計 (図-2) を設置した。2本のサーミスタ部分は放射シールドに格納し、日射加熱の影響を減ずると共に、強制通風または自然通風の状態で、30秒ないし1分のサンプリング間隔にて乾球温度と湿球温度を同時に連続計測した。湿球温度は、2本のサーミスタの内、片側の先端部分をガーゼで覆い連続給水しつつ測定した。各乾湿計の器差補正は、アスマン通風乾湿計 (SK-RHG; 佐藤計量機器製作所; 気象庁検定付き) を基準器とし、10分平均の測定温度にもとづき実施した。補正後の乾球・湿球温度 (10分平均値) は、ほぼ全ての計測地点の自作乾湿計について通風方式の違いによらず、 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 以内の精度が確認された。この補正值 (10分平均値) にもとづく気温と比湿を本研究の解析に用いた。加えて、大阪のオフィス街区と東京の2街区では、建物屋上を利用し、各街区に1台の総合気象観測システム (Vantage ProII, DAVIS社製) を設置し、風向・風速、降水量、全天日射量についても測定した。

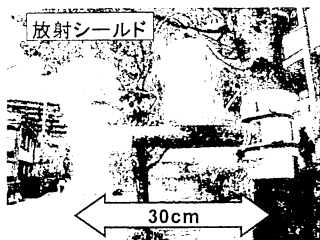


図-2 観測に用いた自作乾湿計

以上の気象計測を、東京は2007年7月29日~8月26日、大阪は2007年8月1日~16日に実施した。合わせて、観測期間内の電力消費量については、電力会社より各街区に合致する配電エリアの時刻別の電力需要量の実績データの提供を受け、解析に用いた。なお、本研究では、都市の気象・熱環境とエネルギー需要・排熱の関連性に着目する為、ヒートアイランド現象に代表される都市熱環境の特徴が顕在化しやすい好天静穏日を対象に、観測データの解析を実施した。具体的には、東京・大阪の両管区気象台での測定をもとに、観測期間より台風接近等に伴う強風日を除外し、日平均風速4m/s未満、日照時間が概ね7時間以上の好天静穏条件の日を解析対象とした (表-1)。また、8月13日(月)~15日(水)の期間は、東京・大阪ともにオフィス街区の電力需要が通常の平日より著しく減少し特殊日と見なされた為、この盆にあたる期間についても解析対象より除外した。

(2) 実測結果

東京・大阪の各街区内で多点計測された高度2~3mの地上気温について、その街区毎の平均値を街区平均気

温と見なし、更にそれらの解析対象日 (表-1) における時刻別平均をとった結果を図-3に示す。この図は、各街区平均気温の好天静穏日における平均的な日変化を表わす。図中には、各オフィス街区より1~1.5kmの距離に位置する東京・大阪の両管区気象台 (図-1) における露場気温の日変化も示してある。東京・大阪ともに、気象台の露場気温は、比較的近隣に位置するオフィス街区内の実際の地上気温とは異なり、気象台気温が必ずしも都心の気温を代表していないことが分かる。東京では、昼夜を通してオフィス街区の気温が気象台よりも高く、その差は最大 1.4°C に達し (17時)、人工排熱やビル貯熱等の都市キャンパシーの熱的影響が示唆された。これに対し、東京湾に近い住宅街区の気温は、午前の一部の時間帯 (8~10時) を除き、オフィス街区より明らかに低温であり、18時で最大 2.5°C の温度差が見られた。これは、住宅街区では排熱が小さい上に、海風による移流冷却の影響があるためと考えられた。一方、大阪では、海岸より約10kmの内陸に位置し、東京ほど海風の影響を受けない住宅街区にて、オフィス街区と比べ昼間に高温 (13時に $+0.7^{\circ}\text{C}$)、夜間に低温 (5時に -1.3°C) となる日振幅大の気温変化が認められた。これは、オフィス街区と比べ、木造建築を含むため街区の熱容量が相対的に小さく、かつ低層であるが故に昼間の日向領域も多い住宅地区の街区構造に因ると推察された。また、大阪気象台の露場気温は、程近い都心のオフィス街区よりは、以上の郊外の住宅街区の気温に近い日変化を示すことも確認された。

以上、気温に代表される都市熱環境とエネルギー需要・排熱との関連性を検討する上では、街区スケールの熱環境の地域性に鑑み、実際の街区内での測定にもとづく実態気温を用いることの必要性が再確認された。

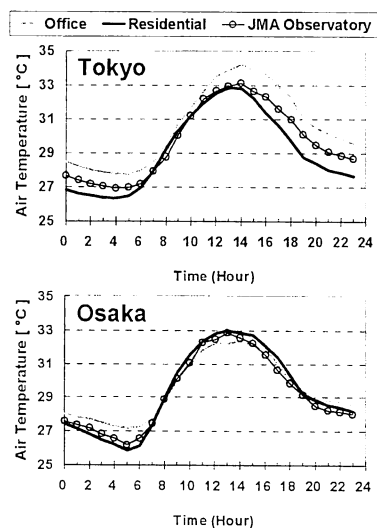


図-3 計測された街区平均気温 (全解析日の時刻別平均) (JMA Observatoryは東京・大阪官区気象台の測定値を指す)

3. 人工排熱による気温影響の推定

(1) 人工排熱量の推定

次に、気象観測と同期して取得された電力需要量の実績データにもとづき、各街区における人工排熱量の実態水準を推定した結果について述べる。推定に際しては、街区内での電力消費の他、自動車走行に由来する人工排熱量も加味した。前者については、1kWh = 3.6MJの換算で、街区内の総電力需要の時刻別実績値の全量が人工排熱に転ずるものとした。一方、自動車排熱の推計は、全国道路交通情勢調査¹⁹⁾などの交通量データに車種毎の燃料消費係数や燃料種毎の発熱量原単位を勘案し、各街区内での時刻別の自動車燃料消費量の発熱量換算値として推計する既往研究^{例えば10)}と同様の手法に依った。以上の方法で解析対象日(表-1)における時刻別の電力消費由来の人工排熱量を求め、さらに上述の統計資料ベースの自動車排熱量(平日・休日別の時刻別推計値)を加算した値を各街区での排熱量と見なした。その算定結果を、各街区について、平日・休日別の時刻別平均の値として図-4に示す。なお、図中の排熱量は、街区の単位土地面積あたりでみた全熱ベースの値を指す。また、全排熱量に占める自動車排熱の割合(日平均値)は、東京・大阪の両オフィス街区で20~30%、両住宅街区で20~40%の範囲にあった。一方、亀卦川¹⁷⁾によれば夏季東京の事務所ビルの全エネルギー消費に占める電力の平均割合は約80%、住宅については70%程度と推定されている。よって、本研究では街区内での都市ガス消費等の他の消費エネルギー由来の排熱量は無視しているものの、以上の電力と自動車由来の排熱を考慮することで、各街区の実際全排熱量の80%前後を説明可能と推定された。

以上、若干の過小評価値ではあるが、推計された人

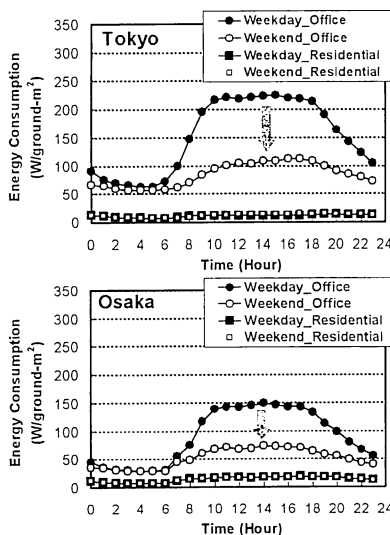


図-4 対象街区区域における人工排熱量(全熱)の推定結果(時刻別平均値)

工排熱量(図-4)は、オフィス街区と住宅街区の間で予想通り対照的な変化を示した。東京・大阪ともに、住宅街区の排熱は10~20W/m²と小さく、平日・休日間で差異は認められず、日振幅も小さい。一方、オフィス街区における排熱量は平日昼間に東京では220W/m²、大阪では150W/m²にも達するものの休日には半減している。なお、オフィス街区での休日における排熱の減少は、その殆どが電力消費の減少に由来しており、事務所建築の一般的な使用状況を勘案すれば、都市ガス等の他の消費エネルギーを考慮した場合でも、同様に休日における排熱の半減が見込まれるものと推察された。

(2) 実測街区気温に見られる排熱影響の推定

東京・大阪で実測された街区平均気温の街区間での差異(図-3)は、海風等の風況や日射量等の気象条件に加え、天空率や人工排熱量等の街区構造に関連した熱環境因子の違いによりもたらされたものと推察される。後者の街区スケールの熱環境因子の中で、オフィス街区の人工排熱量は、住宅街区と異なり、平日と休日で大きな変化を示した(図-4)。天空率や地物熱容量等の他の熱環境因子は平日・休日に変化せず、更に好天静穏日のみ解析対象としたことで街区上空の風況や日射量等の気象条件にも平日と休日とで大きな差異はないと考えられる。従って、オフィス街区と住宅街区の街区平均気温の差に平日・休日間で系統的な差異が認められた場合、その差異は主として人工排熱量の影響によるものと推察できる。以上の観点から、東京・大阪について、街区平均気温のオフィス街区と住宅街区の間での差異を平日・休日に分け解析した結果を図-5に示す。

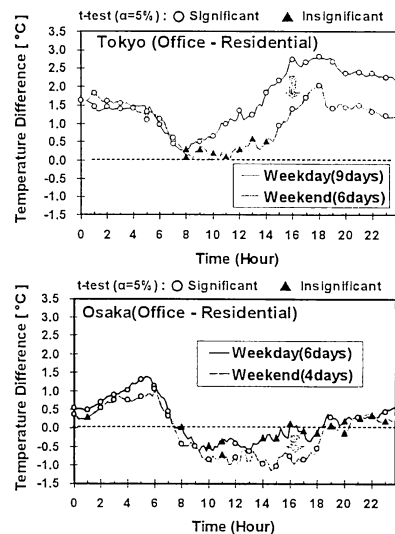


図-5 街区平均地上気温の2街区間での差(オフィス街-住宅街)(平日・休日別の時刻別平均気温差の検定は有意水準5%のt検定にもとづく)

東京・大阪ともに、「オフィス街区－住宅街区」の街区気温差は、統計的に有意でない時間帯も一部含まれたものの、昼間を中心に平日に比べ休日には明らかに減少する傾向を示した(図-5)。この街区気温差の減少幅は、東京では最大1.3℃(16時)、大阪では0.9℃(16時)に達した。以上の変化が、東京では全熱ベースで少なくとも約100W/m²、大阪では70W/m²程度の平日と比較した休日オフィス街での排熱半減(図-4)による影響を表わすと仮定すれば、排熱変化に比例した気温変化が実測されたことになる。なお、東京の都心オフィス街区において示唆された以上の気温影響(最大1.3℃)は、前述したFujibe⁹⁾の日曜日昼間の平日に比べた東京都心気温(気象台気温)の低下幅(0.2~0.3℃)を大きく上回った。これは、気象台の露場気温に比べれば、街区内気温の方がより排熱の影響を受けやすいこと、加えて気象台周辺と本研究のオフィス街区における排熱水準が場所・年代が異なるため一致していないことに因ると推察された。また、著者らの先行研究¹⁰⁾では、大阪について休日における街区気温差の減少(図-5下段図)を既に指摘していたが、本研究と異なり、東京は解析対象としていない。これに対し、本研究では東京・大阪の2街区間気温差を街区内排熱量(図-4)と対比させたことで、両都市のオフィス街区において、排熱変化と結果的に比例関係を呈する気温変化が見出された。

以上の街区間気温差の解析は、街区上空の風況や日射量等の気象条件が、平日と休日で大きく相違しないことを前提としたものであった。この点を確認するため、東京の両街区内の建物屋上で測定された風速と日射量を平日・休日別に比較した結果をそれぞれ図-6と図-7に示す。まず、風速について見ると、平日・休日に共通する傾向として、海岸に近い住宅街区の風速がオフィス街区をやや上回ることが分かる(図-6)。この傾向は、全体的にやや弱風となる休日の昼間により顕著である。休日におけるオフィス街区での排熱減少に因ると仮定された住宅街区との気温差減少(図-5上段図)の傾向は、以上の住宅街区と比較したオフィス街区での弱風条件下でより強化された可能性がある。即ち、排熱減少の気温降下にもたらず感度が弱風により増大した可能性がある。なお、風向については、両街区とも昼間を中心に南寄りの風が卓越し、街区間、および平日・休日間で顕著な差異は認められなかった。一方、日射量については、平日・休日に共通する傾向として、住宅街区と比べオフィス街区における全日射量がやや小さいことが分かる(図-7)。仮に、この傾向が休日のみ顕著になるのであれば、休日における2街区間の気温差の減少(図-5上段図)は、オフィス街区における排熱減少に加え、日射加熱の減少の影響に因ることになるが、実際には反対に平日でのオフ

イス街区における日射減少の傾向の方がやや顕著となっている(図-7)。従って、東京での2街区間気温差の休日における減少は、全日射量の違いだけでは説明ができないことは明らかである。

大阪では、住宅街区にて風速・日射量の測定を行っていない為、上述のような解析・考察が出来なかった。しかし、東京における風速・日射量と2街区間気温差の以上の関係は、休日の気温差減少がこれらの気象条件について認められた街区間や平日と休日の間での若干の相違のみによって説明できるものではなく、オフィス街区での排熱減少を物理的要因とした可能性とも矛盾しないものであった。

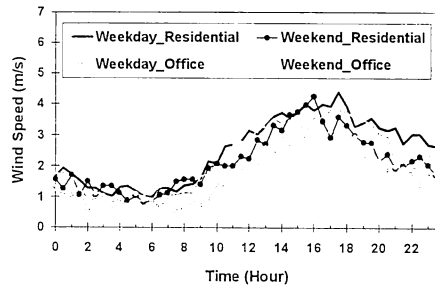


図-6 東京のオフィス街・住宅街における風速の比較(平日・休日別の30分間隔の特別平均)

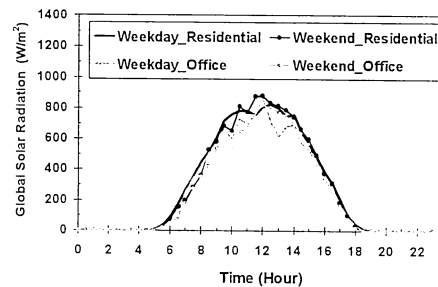


図-7 東京のオフィス街・住宅街における全日射量の比較(平日・休日別の30分間隔の特別平均)

(3) 排熱の気温影響に関する数値シミュレーション

実測街区気温の解析を通じ東京・大阪の都心オフィス街区にて示唆された休日の排熱半減を原因とする可能性がある気温影響(図-5)について、数値気象モデルによる再現検証を試みた。気象モデルとしては、ヒートアイランド現象に代表される数10kmスケールの都市気候を表現可能なメソスケール気象モデルとして、WRF(Weather Research & Forecasting Model)-ARW Ver3.0.1.1¹⁸⁾を用いた。加えて、実測対象とした街区スケールの熱環境に対する建物貯熱等の都市キャノピーの効果を考慮すべく、WRFの地表面・接地境界層サブモデルの一つである単層都市キャノピーモデル(UCM: Urban Canopy Model)¹⁹⁾を採用した。ここで、WRFとは米国NCARなど

によって開発・公開されている非静力学・完全圧縮流体を対象とした3次元地域気象モデルである。一方、UCMとは都市キャンピー大気層を単層近似し、建物の空力抵抗や日影効果、ストリートキャニオン内の放射収支なども考慮できる簡易型の都市キャンピーモデルである。

本研究では、休日の排熱減少に関連し、統計的により有意な“オフィス街区-住宅街区”の気温差の減少(図-5)が確認された東京に対し、以上のWRFとUCM(以降WRF/UCM)を適用した。その計算領域を図-8に示す。領域は、東京23区を中心とした3重ネスティングに依り設定し、双方向のネスティング計算を行った。計算格子の水平間隔は9km, 3km, 1kmと内側領域に向かって解像度が向上するよう設定した。東京23区を含む一番内側の1km格子間隔の領域のみに対し、都市キャンピーの効果を考慮すべくUCMを適用した。この他、市街地以外の格子や、外側領域の格子に対しては、WRFに組み込まれた通常の粗度平板型の地表面・接境界層モデルを適用した。

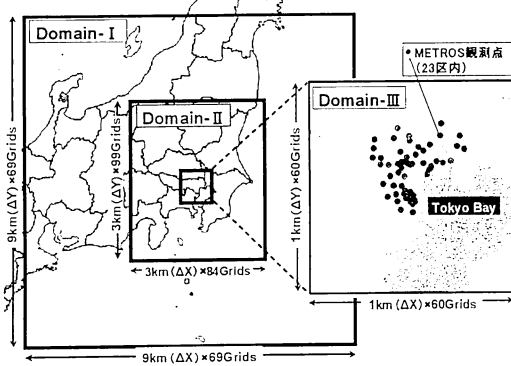


図-8 WRF/UCMの計算領域

他の条件として、計算期間は東京での実測期間(2007年7月29日～8月26日)に合わせ、実測データと同様に好天静穏日(表-1)のみの計算結果を解析に用いた。また、WRF駆動に際しては、米国地質調査所の全球地形・土地利用データを入力し、初期・境界条件としては気象庁メソ客観解析値(大気側)とNCEP客観解析値(土壌側)を採用した。ここで、米国地質調査所の土地利用データでは、市街地が“Urban and Built-up Land”の単一カテゴリに区分され、地表面パラメータの設定も全市街地共通の非現実的設定となる問題点があった。そこで、本研究では、H13年度東京都土地利用現況調査にもとづく建物ポリゴンGIS情報を援用し、23区域を独自に3種類の土地利用に細分化する改良を施した。具体的には、同ポリゴン情報を利用し、23区域の各格子内の支配的な建物用途と建築構造を解析し、各格子を事務所・商業街区(Office & Commercial)、木造戸建住宅街区

(Residential(Wooden detached dwelling))、耐火造集合住宅街区(Residential(Fire-proof apartments))の3種類に細分類化した(図-9)。この細分類を踏まえ、UCM用の壁体層厚や壁材熱物性等の建築構造に関わる入力パラメータを格子別に設定した。また、平均建物高度、建物間間隔等の街区形状に関わる入力条件も、従来の土地利用区分毎の入力から、建物ポリゴン情報の解析にもとづき格子単位で入力できるようUCM自体に改良を加えた。これにより、街区の被覆物性や街区形状の都市内分布をより現実的に考慮できるようUCMが改変された。

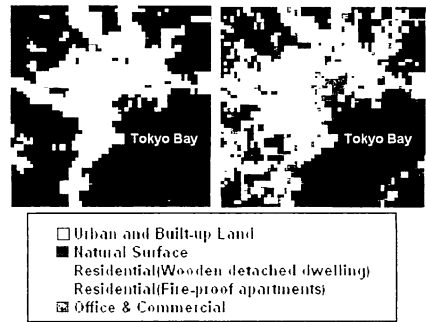


図-9 市街地格子における土地・建物用途の設定(左図: 改良前, 右図: 改良後)

加えて、都市域の人工排熱については、各種のエネルギー統計資料等にもとづき関東圏の1km格子別・月別・時刻別の排熱量推計を行った先行研究²⁰⁾における排熱データ(全熱値)を採用した。同データより8月の排熱量を格子別・時刻別に入力し、かつ入力後の排熱が気温の計算過程に反映されるようUCMを改変した。なお、以上の先行研究²⁰⁾の排熱データは、1996年時点での推計値であった為、計算対象年次(2007年)の排熱量とは乖離している可能性が考えられた。そこで、本研究で実際の電力需要量を考慮し街区排熱が推計された東京のオフィス街区と住宅街区(図-1)での排熱量(図-4)と先行研究²⁰⁾の当該格子における排熱量を比較した。その結果を図-10に示す。両者は、オフィス街区の夜間の時間帯を除き、概ね一致していた。

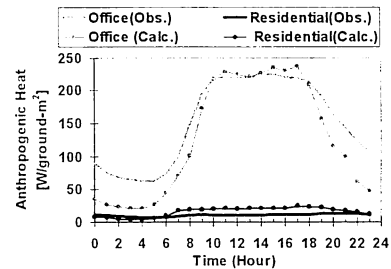


図-10 シミュレーションで考慮された排熱量(先行研究²⁰⁾における推計値; Calc.)と実測ベース排熱量(図-4上段図中の値; Obs.)の比較(東京のオフィス街と住宅街; 平日条件; 全熱での比較)

本研究でのWRF/UCMによるシミュレーションは、このオフィス街区と住宅街区の気温差に対する排熱影響（図-5）の再現を主目的とすることから、図-10の比較にもとづき、先行研究²⁰⁾の排熱データを用いることを概ね妥当と判断した。

以上の条件設定の他、雲微物理、日射・天空長波放射計算スキーム等のWRF上の他の物理過程に関するオプションは、Duchia²¹⁾を参考に設定した。そして、表-2に示す計4つのケースを対象にシミュレーションを実行した。ケース中、Case0は前述した改良後（細分類後）の土地利用データ（図-9右図）を用い、1km格子領域（図-8）に対しUCMと先行研究²⁰⁾の排熱データを格子別に適用する現況ケースの計算である。これに対し、Case1では、市街地を単一カテゴリーで扱う改良前の土地利用データ（図-9左図）を用い、UCMも排熱データも適用せず、都市域を単純なコンクリート平板と見なす仮想計算を行った。なお、Case0では、先行研究²⁰⁾の排熱データが平日・休日の分解能を持たない為、全計算期間に渡って時刻別・格子別には一定となる排熱を入力し続ける計算を行った。これに対し、東京の2街区間で実測された休日の排熱減少に伴う気温差減少を模擬すべく、Case2とCase3を追加した。両ケースは、Case2にて事務所・商業街区の排熱を全減し、Case3で同街区の排熱を半減させることを除き、Case0と同条件の計算である。

表-2 シミュレーションにおけるケース設定

ケース名	土地利用	UCM	人工排熱
Case0 (現況)	改良設定 (USGS+東京都土地利用現況)	On	On
Case1 (平板都市)	初期設定 (USGS)	Off	Off
Case2 (排熱全減)	改良設定 (USGS+東京都土地利用現況)	On	事務所・商業街区 でOff
Case3 (排熱半減)	改良設定 (USGS+東京都土地利用現況)	On	事務所・商業街区 で半減

以上のシミュレーション結果のうち、Case0とCase1の地上2m気温を実測気温と比較した結果を図-11に示す。実測気温としては、東京都環境科学研究所が小学校の百葉箱を利用し23区内の約100地点に展開している高密度気象観測網であるMETROS（図-8）の測定気温を用いた。この測定気温について、好天日が連続した2007年8月5日～12日の時刻別の23区内平均気温を求め、Case0とCase1の計算気温についてもMETROS観測点を含む全格子の同期間における時刻別平均を算出し比較した。WRFは、Case0とCase1の両ケースで、昼間の実測気温の期間内変化を概ね再現した。一方、WRFは夜間の実測気温を過小評価する傾向があり、特に平板都市ケース（Case1）において顕著であった。これに対し、UCMにより夜間放射冷却の緩和等の都市キャノピーの熱的影響を考慮し、更に人工排熱が入力された現況ケース（Case0）では、

日没（18時頃）以降の気温冷却率が減少し、夜間の気温表現が実測により近づいた。東京の都市気温上昇については、昼間は低緑被率の市街地表面の乾燥・高温化を伴う広域土地利用の影響、夜間は人工排熱とビル貯熱等の都市キャノピーの熱的影響が大きいたことが指摘されている²²⁾。以上のシミュレーションでも、平板都市であっても人工被覆の土地利用を想定したCase1で昼間気温が概ね再現され、更に排熱と都市キャノピーの影響を考慮したCase0で夜間気温の再現性が向上し、合理的な結果が得られた。加えて、WRF/UCMは東京のオフィス街区と住宅街区での実測気温についても、METROS気温を比較対象とした場合（図-11）と同程度の再現性を示した（結果図略）。以上、定量的にも地上気温の日変化を概ね再現できていることから、WRF/UCMの都市気温予測への適用性を確認することが出来た。

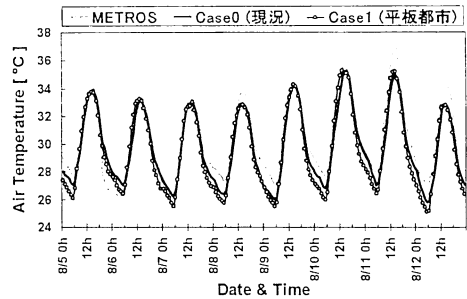


図-11 地上2m気温のシミュレーション結果とMETROS実測気温の比較（東京23区格子平均；2007年8月5日～12日）

次に、以上のシミュレーション結果より、実測対象としたオフィス街区の格子と住宅街区の格子の地上気温差を解析した。“オフィス街区 - 住宅街区”の格子気温差について、ケース毎に解析対象期間（表-1）における時刻別平均を取り、更にそれらについて“Case0-Cas2（事務所・商業街区の排熱全減）”，および“Case0-Cas3（事務所・商業街区の排熱半減）”のケース間差分をとった結果を図-12に示す。

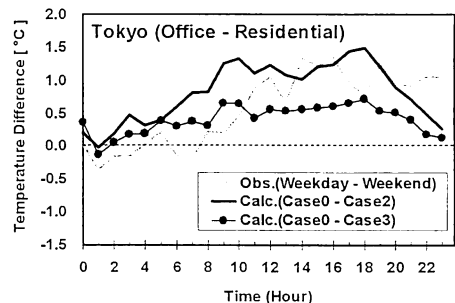


図-12 東京における街区間気温差(オフィス街-住宅街)のシミュレーション結果(Calc.)と実測値(Obs.)の比較

図-10に示した通り、Case0で考慮した排熱は平日の実測ベース排熱量に相当したことから、“Case0—Case3”の差分が、実測における平日から休日へのオフィス街区の排熱半減に対応したシミュレーション結果を表すことになる。但し、シミュレーションでは、解析対象日の全日を平日として計算した場合と休日として計算した場合の差分を取っている点が、現実と異なる。このような違いがあるものの、“Case0—Case3”の差分気温を、実測の2街区気温差（図-5上段）において“平日—休日”の差分をとった値（図-12中のObs.）と比較すると、両者は大きく乖離していないことが分かる。シミュレーションによる前者は、実測の後者を昼間を中心に過少評価しているが、これはCase0の排熱と同水準の実測ベース排熱量の推計値（図-4）が実際の街区排熱量を20%程度は過少評価していたことに関係すると考えられた。この事を確認する為、排熱の全減に対応する“Case0—Case2”の差分気温とも比較すると、実測の差分気温（Obs.）は、平日から休日へオフィス街区の大きな排熱減少が見られた昼間の時間帯には、予想通り両シミュレーション（Case0—Case3, Case0—Case2）の差分気温の中間を推移した。以上、シミュレーションで設定したオフィス街区の排熱半減が、現実のオフィス街区での平日から休日への昼間の排熱減少量を過小評価している点も加味すれば、WRF/UCMは実測の2街区気温差に対し示唆されたオフィス街区の排熱減少の影響とほぼ同程度の排熱影響を昼間について模擬していることが確認された。

4. 街区内実測にもとづく電力需要気温感応度の定量化

(1) 感応度の算定手法

夏季都市域のエネルギー需要と熱環境の相互連関を構成する二つの物理過程のうち、前章では、エネルギー需要の変化が排熱変動を介し都市気温にもたらす影響過程について、実測と数値シミュレーションによる解析結果を示した。本章では、残りのもう一つの物理過程として、気温変化が都市域のエネルギー需要に及ぼす影響過程を、夏季電力需要の気温感応度にもとづき解析した結果を示す。

夏季電力需要の気温感応度の算定には、Ihara et al.³⁾による重回帰モデルを用いた。そのモデル式を以下に示す。

$$E = E_0 + \left(\frac{\Delta E}{\Delta T}\right)_s (T - T_s) + \left(\frac{\Delta E}{\Delta Q}\right)_s (Q - Q_s) \quad (1)$$

式中、 $E[\text{W/floor-m}^2]$ は建物単位延床面積あたりの夏季電力需要量、 $T[^\circ\text{C}]$ は気温、 $Q[\text{g/Kg}]$ は比湿、 $T_s[^\circ\text{C}]$ は分岐点気温、 $Q_s[\text{g/Kg}]$ は分岐点比湿、 $(\Delta E/\Delta T)_s[\text{W/floor-m}^2/^\circ\text{C}]$ は建

物単位延床面積あたりの夏季電力需要の気温感応度、 $(\Delta E/\Delta Q)_s[\text{W/floor-m}^2/(\text{g/Kg})]$ は同比湿感応度を表す。上式の右辺第2項は、夏季においてある都市地域の地上気温（ T ）が上昇し、域内での冷房機器使用により電力需要も増加し始める気温を T_s とすると、 $T \geq T_s$ の気温レンジで気温と電力需要の関係を正相関の線形近似で表現したものである。従って、 $(\Delta E/\Delta T)_s$ は、 $T \geq T_s$ の場合に気温が 1°C 上昇するに連れて建物単位延床面積あたりで見て域内の冷房電力需要が何W増加するのかわわしている。同様に右辺第3項は、域内の大気中水蒸気量（比湿）が増加するに連れて、冷房時の建物内除湿に伴い増加する電力需要について、その比湿との関係を線形近似したものである。また、残りの右辺第1項（ E_0 ）は、気象条件（気温・比湿）に左右されない、即ち空調用途以外のベースロードの電力需要に相当する。

図-13は、実測を行った東京の住宅街区での平日正午における街区内平均気温・比湿と電力需要量の関係を例示したものである。図中に見られるような気温・比湿と電力需要の間の正の相関関係は、他の時間帯、そして他の街区においても認められたことから、(1)式の線形重回帰モデルの本研究への適用は妥当と考えられた。

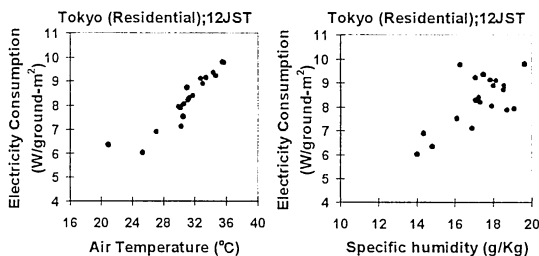


図-13 電力消費量と街区気象条件の関係（東京・住宅街での平日正午の例、2007年7月30日～8月24日の平日20日間）

(2) 感応度の算定結果

前節の重回帰モデルを、東京のオフィス街区と住宅街区の実測データに適用し、両街区の建物単位延床面積あたりでみた電力需要の気温感応度を算出した結果を図-14に示す。図中に示された感応度 $(\Delta E/\Delta T)_s$ は、オフィス街区の夜間（0時～6時）を除き、両街区にて、有意水準1%のF検定で重回帰式（(1)式）が有意と判定された、平日についての解析結果である。なお、この解析に際しては、(1)式中の E_0 、 T_s 、 Q_s を最小二乗法で同定する上で、気象データ（気温・比湿）についてなるべく広いレンジの測定値を用いる必要性があった為、好天静穏の解析対象日（表-1）だけでなく観測期間の全平日（但し、オフィス街区については2007/8/13～8/15のお盆除く）のデータを採用した。また、実測データの標本数が少ない東京の休日、大阪の平日・休日の電力需要気温感応度の解析結果については、多くの時間帯において重回帰式が

有意とはならなかった為、本論文への記載を割愛した。

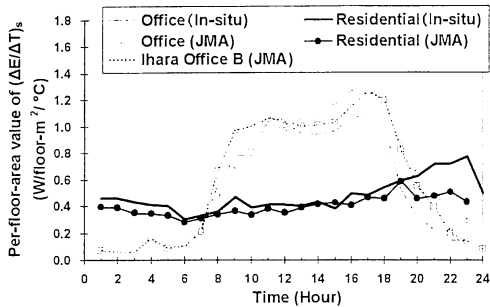


図-14 東京の事務所街(Office)・住宅街(Residential)における平日の電力需要気温感応度の比較

※気温・比湿について、“In-situ”は街区実測，“JMA”は気象台値を使用。
 ※Ihara Office B (JMA)は、Ihara et al.³⁾の事務所街(B)における解析結果。

図-14に示された東京の平日の $(\Delta E/\Delta T)_s$ は、気温・比湿について、各街区区内での多点計測にもとづく街区区平均値(“In-situ”)を用いた場合と、東京管区気象台(図-1)での露場測定値(“JMA”)を用いた場合の二つのケースでの解析結果である。また、図中にはIhara et al.³⁾が気象台データを用いる従来手法にて、本研究のオフィス街区の近接街区(同論文中の事務所街(B))を対象に(1)式の重回帰モデルにより算出した感応度も示してある。このIhara et al.³⁾の感応度と本研究のオフィス街区について気象台データを用いた場合の感応度(Office(JMA))を比較すると、両者は概ね一致しており、本研究での感応度解析の妥当性が確認できる。一方、本研究における“In-situ”と“JMA”の感応度を比較すると、オフィス街区・住宅街区ともに両ケースの感応度には違いが見られた。“In-situ”を基準とした場合、オフィス街区での“JMA”ケースの感応度は最大+150%(21時)、住宅街区の“JMA”ケースでは-44%(23時)も乖離している時間帯があった。以上の結果は、都市域における夏季電力需要の気温感応度を求めるに際し、気象データについて露場測定値で解析対象地域を代表させる既往研究^{3) 4)}の手法が、必ずしも適切ではないことを示唆した。本研究の実測において示された街区スケールの熱環境の非均一性(例えば図-3)も勘案すれば、電力需要気温感応度の実態把握の為に、最寄りの気象台やAMeDASの測定値ではなく、実際の街区空間(都市キャノピー内)で測定された気象データを用いることの必要性が確認された。

5. 夏季電力需要に対する熱環境フィードバック効果の推定

最後に、夏季都市域のエネルギー需要と熱環境の相互関連性の実態解明を目的とした本研究の取りまとめとして、この相互連関が夏季電力需要にもたらす影響につい

での推計結果を示す。

オフィス街区での平日から休日への大幅な人工排熱の減少に関連し、2街区気温差の明確な減少が認められた東京での実測データにもとづき以上の推計を行った。この東京での2街区気温差の平日から休日への減少(図-5上段)は、前述の通り、部分的にはオフィス街区での風速低下も関係したものと推察されたが、ここではこの気温差減少が全て休日オフィス街区での排熱減少に因る同街区気温の低下によりもたらされものと仮定する。この場合、この排熱影響は、反対に休日を基準とした平日での排熱増が東京のオフィス街区気温にもたらした昇温効果と読み替えることができる。この観点から実測の2街区気温差(図-5上段)において“平日-休日”の差分をとった時系列を、排熱による昇温効果を表わす時系列 $(\Delta T)_{ah}$ として図-15に示す。一方、同図中には、前節の平日オフィス街区の電力需要気温感応度について、街区区内での実測気象に基づく推計値(図-14のOffice(in-situ))を、時刻別の床面積あたり平均電力需要量 (Em) で正規化したパーセント感応度 $(\Delta E/\Delta T)_s/Em$ も示されている。この感応度は、1°Cの気温上昇に付きオフィス街区の電力需要が何%増加するかを表わす。以上の $(\Delta T)_{ah}$ に $(\Delta E/\Delta T)_s/Em$ を乗ずることで、休日から平日への排熱増→気温上昇→更なる夏季電力消費増、のフィードバックによる電力消費の押し上げ効果を推定できる。本研究で対象とした東京のオフィス街区では、以上のフィードバック効果でピーク需要時間帯にあたる14~16時の電力需要が2~2.5%押し上げられるものと推定された。

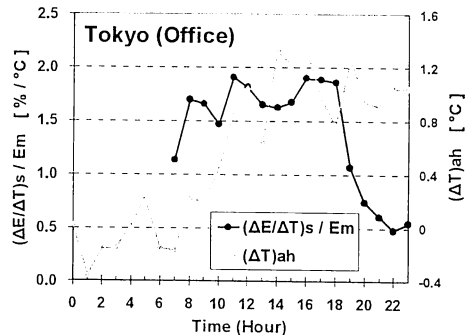


図-15 人工排熱による気温増分 $[(\Delta T)_{ah}]$ と正規化された電力需要気温感応度 $[(\Delta E/\Delta T)_s/Em]$ の関係(平日条件)

6. まとめ

本研究では、夏季の東京・大阪の街区域で同期計測された地上気象要素と電力需要量の実態データにもとづき、両都市域のエネルギー需要と気温に代表される熱環境の相互関連性について、街区スケールでの実態解明を目的とした研究を実施し、以下の知見を得た。

- ・東京・大阪ともに、排熱水準と街区構造の点で対照的なオフィス街区と住宅街区にて実測を行った結果、両都市内の2街区の街区内部平均気温には明らかな差異が認められ、またオフィス街区では平日に比し休日の人工排熱量が最大100W/m²程度減少する特徴的な傾向が認められた。
- ・両都市内の“オフィス街区－住宅街区”の2街区気温差は、平日に比べ休日に系統的に減少した。その減少幅は、東京・大阪ともに16時に1.3℃、0.9℃の最大値を示し、休日オフィス街区での排熱減少量（東京：約100 W/m²、大阪：約70 W/m²）にほぼ比例した。これにより、2街区気温差の減少は、休日オフィス街区での排熱減少に因るものと推察された。
- ・東京で実測された2街区気温差の減少は、休日オフィス街区での排熱減少を想定した気象モデルによる数値実験においても概ね再現可能であり、実測とシミュレーションを通じ都心オフィス街区の地上気温に対する排熱の影響感が把握された。
- ・以上の排熱による気温影響に加え、相互連関を構成するもう一つの物理過程である気温変化が都市エネルギー需要に及ぼす影響について、夏季電力需要の気温感応度にもとづく解析を行った。気象台等の露場気温を都市気温として代表させる従来手法と比べ、街区内部での測定気温にもとづく本研究ではより実態に近い電力需要気温感応度を定量化した。
- ・東京の都心オフィス街区で把握された地上気温に対する排熱の影響感度に夏季電力需要の気温感応度を乗ずる方法で、休日から平日への排熱増→気温上昇→更なる電力需要増、の熱環境フィードバックによる電力消費の押し上げ効果を推定した。その結果、この効果は、ピーク需要時間帯にあたる14～16時に東京の都心オフィス街区で2～2.5%と試算された。

著者らは、本研究で用いた数値気象モデルであるWRF/UCMを原型とし、更に人工排熱によるフィードバック効果を考慮するため独自の建築空調エネルギーモデルを連成させた統合モデルへの改良を進めている。今後は、本研究で得られた都市エネルギー需要と熱環境の相互連関性に関する知見にもとづく統合モデルの検証を行うと共に、都市総体の省エネ性や温室効果ガス削減への影響を加味した総合的なヒートアイランド対策評価への同モデルの適用に関わる研究を実施する予定である。

謝辞：本研究の実施にあたり、東京電力株式会社と関西電力株式会社には、電力需要データを提供頂いた。また、東京都環境科学研究所からはMETROS気温データの提供を受けた。ここに深く謝意を表す。

参考文献

- 1) United Nations Population Division : World Urbanization Prospects, The 2007 Revision, United Nations, 2008.
- 2) Subcommittee on Heat Island of Architectural Institute of Japan : Anthropogenic heat and urban heat islands, A feedback system, Newsletter on Urban Heat Island Countermeasures, Volume 5, 2008.
- 3) Ihara, T., Y.Genchi, T.Sato, K. Yamaguchi, Y. Endo : City-block-scale Sensitivity of Electricity Consumption to Air Temperature and Air Humidity in Business Districts of Tokyo, Japan, Energy, Vol.33, pp.1634-1645, Nov.2008.
- 4) 鳴海大典・二浦尾友佳子・下田吉之・水野稔 : 昇温が大府域のエネルギー消費に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集, 613, pp.71-78, 2007.
- 5) 大橋唯太・玄地裕・亀卦川幸浩 : 東京都心の街区内部気温の空間分布とその形成要因について, 環境情報科学論文集, 第17号, pp.59-64, 2003.
- 6) Ohashi Y., Y.Genchi, Y.Kikegawa, H.Kondo, H.Yoshikado, and Y.Hirano : Influence of air-conditioning waste heat on air temperature in Tokyo office areas during summer. Numerical experiments using an urban canopy model coupled with a building energy model, Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol.46, pp.66-81, 2007.
- 7) Fujibe, F., : Weekday-weekend Differences of Urban Climates Part I: Temporal Variation of Air Temperature and Other Meteorological Parameters in the Central Part of Tokyo., Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.65, No.6, pp.923-929, 1987.
- 8) Ichinose, T., K. Shimodono, and K. Hanaki : Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, Atmospheric Environment Vol.33, pp.3897-3903, 1999.
- 9) 鳴海大典・大谷文人・近藤明・下田吉之・水野稔 : 都市における人工廃熱が都市熱環境に及ぼす影響—都市熱環境評価モデルを用いたヒートアイランド現象の改善策に関する検討 その1—, 日本建築学会計画系論文集, 第562号, pp.97-104, 2002.
- 10) Kikegawa, Y., Y.Genchi, H. Kondo and K. Hanaki : Impacts of City-Block-Scale Countermeasures against Urban Heat-Island Phenomena upon a Building's Energy-Consumption for Air-Conditioning, Applied Energy, Vol.83, pp.649-668, 2006.
- 11) 原田雄介・村上周三・大岡龍三・原山和也・佐藤大樹・川本陽一 : 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, 日本建築学会環境系論文集, 第597号, pp.65-71, 2005.
- 12) 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, 第1巻, pp.53-57, 2006.
- 13) 重田祥範・大橋唯太・亀卦川幸浩・井原智彦 : 東京・大阪における街区気象と需要エネルギーの計測(1), 日本気象学会2008年度秋季大会講演予稿集, 第94号, pp.201, 2008.

- 14) 畔柳秀匡・大橋唯太・亀卦川幸浩・岡和孝・重田祥範・平野勇二郎・日下博幸・Fei CHEN : 街区構造と電力需要の違いが都市熱環境に及ぼす影響 - 大阪市街地を対象とした解析 -, 水工学論文集, Vol.53, pp.289-294, 2009.
- 15) 国土交通省道路局 : 全国道路交通情勢調査, 2001.
- 16) 省エネルギーセンター : 平成16年度ヒートアイランド現象緩和に対する省エネ等の効果に関する調査報告書, 2005.
- 17) 亀卦川幸浩 : 熱環境と空調エネルギー需要の相互作用を考慮した都市高温化対策の評価, 東京大学博士論文, 2001.
- 18) Skamarock, W. C. et al. : A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN-475+STR, 2008.
- 19) Kusaka, H. and F. Kimura : Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.82, pp.67-80, 2004.
- 20) 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, 環境影響予測部研究資料97-1, 1997.
- 21) Dudhia, J. : WRF Physics Options, http://www.dtccenter.org/events/wrf-nmm_tutorial06_summer/Presentations/NMM_Physics_Dudhia.pdf, 2006.
- 22) Kusaka, H. and F. Kimura : Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: Numerical experiment using mesoscale model coupled with urban canopy model, *Journal of Applied Meteorology*, vol.43, pp.1899-1910, 2004.

STUDY ON INTERACTIONAL RELATIONSHIP BETWEEN ELECTRICITY CONSUMPTION AND URBAN THERMAL ENVIRONMENT IN SUMMER TOKYO AND OSAKA

Yukihiro KIKEGAWA, Yukitaka OHASHI, Yoshinori SHIGETA, Tomohiko IHARA, Minoru TAGAWA and Tatsuya INOUE

Based on meteorological elements and electricity demands observed in summer Tokyo and Osaka, the interactional relationship between urban energy demand and thermal environment was investigated. As a result, observed differences in surface air temperatures between two contrastive urban areas, that is, downtown office buildings area and residential area, were found to be decreased from weekday to weekend in both cities. It was also indicated that those decreases were roughly proportional to decreases of anthropogenic heat in the office buildings areas on weekends. Those phenomena were qualitatively reproduced by numerical meteorological models in Tokyo, and the sensitivity of air temperature in the office buildings area to anthropogenic heat was estimated to be more than $1^{\circ}\text{C}/100\text{Wm}^{-2}$ in Tokyo. Additionally, based on that sensitivity and the dependence of the electric power consumption to the air temperature in the office buildings area, the impacts on electricity demands due to thermal environmental feedback effect were estimated to be +2 ~ 2.5% for 14:00 ~ 16:00 in the office buildings area in Tokyo, resulting from increases in anthropogenic heat there from weekend to weekday.