

平成 16 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(概要)

- 環境省環境管理局大気生活環境室 -

ヒートアイランド現象による都市の気温上昇は、熱中症の増加などの人の健康、生態系の変化、大気汚染濃度の上昇、集中豪雨の発生、エネルギー消費の増加など多くの対象に
関与していると考えられます(表1参照)。

一方で、政府のヒートアイランド対策大綱が策定され、具体的なヒートアイランド対策
がスタートしつつあります。しかし、その対策の効果を最大限に引き出すためには、高温
化の原因とその影響の関係を定量的に把握しておく必要があります。また、長期に施策を
実施しなければならないヒートアイランド対策にとって、特に重要なのがその効果を定量的
に把握しつつ推進することです。

そこで、これまでに定性的に整理した影響項目の中から、本年度は都市の気温上昇が及
ぼす『熱中症の発生』と『エネルギー消費』への影響を取り上げ、定量的評価を試みまし
た。また、あわせて高温による『睡眠障害』と『植物の成長』に及ぼす影響について最新
の知見を整理しました。

ヒートアイランド現象による環境影響を定量的に評価するためには、ヒートアイランド
現象の強さを空間的、時間的に定量化することが必要となります。しかし、東京や大阪な
どの大都市において、同時に進行している地球規模の温暖化を切り離して都市化による気
温上昇の分布を正確に定量化することは、現状では容易ではありません。

そのため、本年度は地球温暖化による影響も含めた都市の気温上昇が、熱中症の発生とエ
ネルギー消費に及ぼす影響について、その感度をできるだけ詳細に把握しつつ影響の大き
さを調べました。

表1 ヒートアイランド現象による環境影響と本年度検討対象範囲(黄色部分)

出典)平成15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から抜粋・作成

| 対象 | 影響 |
|-------|--------------------|
| 人の健康 | 熱中症の増加 |
| | 循環器系疾患の増加 |
| | 冷房空間との往来による疲労感の増大 |
| | 睡眠障害 |
| | ウィルス感染の可能性の増大 |
| 生態系 | 生物相の変化 |
| | 植物の成長阻害 |
| 大気汚染 | NOx等の大気汚染濃度の上昇(冬季) |
| | 光化学オキシダント濃度の上昇(夏季) |
| 気象 | 集中豪雨発生への関与 |
| エネルギー | 夏季消費量の増大と冬季消費量の減少 |

また、都市の風と気温の実態把握についても、基礎的解析を行いました。

【1. 熱中症の発生に及ぼす影響】

STEP 1: 熱中症に関連する指標の特徴を整理した

STEP 2: 暑熱指標と熱中症との関係を整理し、影響評価に適切と思われる指標を選定した

STEP 3: ここ20年間の気温上昇が熱中症の発生に及ぼした影響を定量的に求めた

1) 熱中症指標の整理

熱中症はその多くが夏季の暑熱環境下で発生しています。暑熱環境と熱中症の発生との関連を見るためには実際のデータにもとづく解析が必要となります。暑熱環境の指標は複数あり、例えば熱中症との関連が数多く検討されている「日最高気温」、熱ストレスの評価に適しているとされる「WBGT¹⁾」、高温にさらされる時間を考慮した「高温時間数」などです。

図1に日最高気温とWBGTの関係、日最高気温と高温時間数の関係を示しますが、一定の関係性はみられるもののばらつきがあり、指標ごとに特性が違います。熱中症の発生に至るまでの暑熱影響をより適切に捉えることのできる指標を選択することが必要と考えられます。

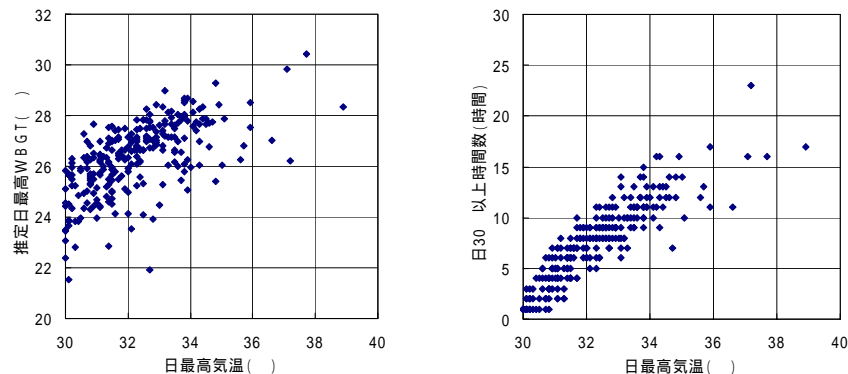


図1 日最高気温とWBGT(左図)及び日最高気温と30 以上時間数の関係

- 1 データは2000～2004年のアメダス東京の日最高気温30 以上を抽出した
- 2 WBGTは推定式²⁾による値を用いた

熱中症の発生を捉える指標は、救急車で搬送された患者のうち熱中症と診断された人数を用いました。しかし、一般に救急車による搬送数が近年増加しているといわれ、熱中症による救急搬送数の増加にも気温の上昇による影響と純粋な搬送数の増加の2つの要因が含まれていることが分かりました。したがって、熱中症の発生を捉える指標として搬送数を用いる場合には、搬送数の純増が解析結果に偏りを生じさせないよ

1) WBGT (Wet Bulb Globe Temperature; 湿球黒球温度)とは、人体の熱収支に影響の大きい湿度、輻射熱、気温の3つを取り入れた指標で、乾球温度、湿球温度、黒球温度の値を使って計算される。

屋内もしくは屋外で太陽照射のない場合： $WBGT=0.7tnw+0.3tg$

屋外で太陽照射のある場合： $WBGT=0.7tnw+0.2tg+0.1ta$

(tnw: 自然湿球温度、tg: 黒球温度、ta: 乾球温度)

WBGTは、ISOならびにJISで定められた規格であり、労働環境において作業者が受ける暑熱環境による熱ストレスの評価を簡便に行うことができ、速やかな判断を可能にする指標である。

2) 村山貢司、登内道彦(2004)熱中症予防のためのWBGTの簡易推定式、日本気象学会2004年秋季大会発表資料

う注意する必要があります。そのため、今回の解析では短期間の搬送数データのみを扱うこととしました。

2) 熱中症の発生と暑熱指標の関係

日最高気温、日最高 WBGT (推定値) 及び高温時間数を暑熱指標として、各地域の1日の平均的な熱中症搬送数との関連を調べました。

図2に東京、名古屋、大阪の各地域でそれぞれの関係を整理した結果を示します。日最高気温との関係では、30 程度から増加が始まり、35 を超える付近から急増するというこれまでの研究事例と同様な結果が得られました。また、日最高 WBGT では、日最高気温と比べるとバラつきが少なく、安定した関係が見られます。しかし、WBGT の計算に必要な湿球・黒球温度は実測値が少なく、その推定には複雑な計算が必要なことなどから、今後複数の地点で実測されることが望まれます。

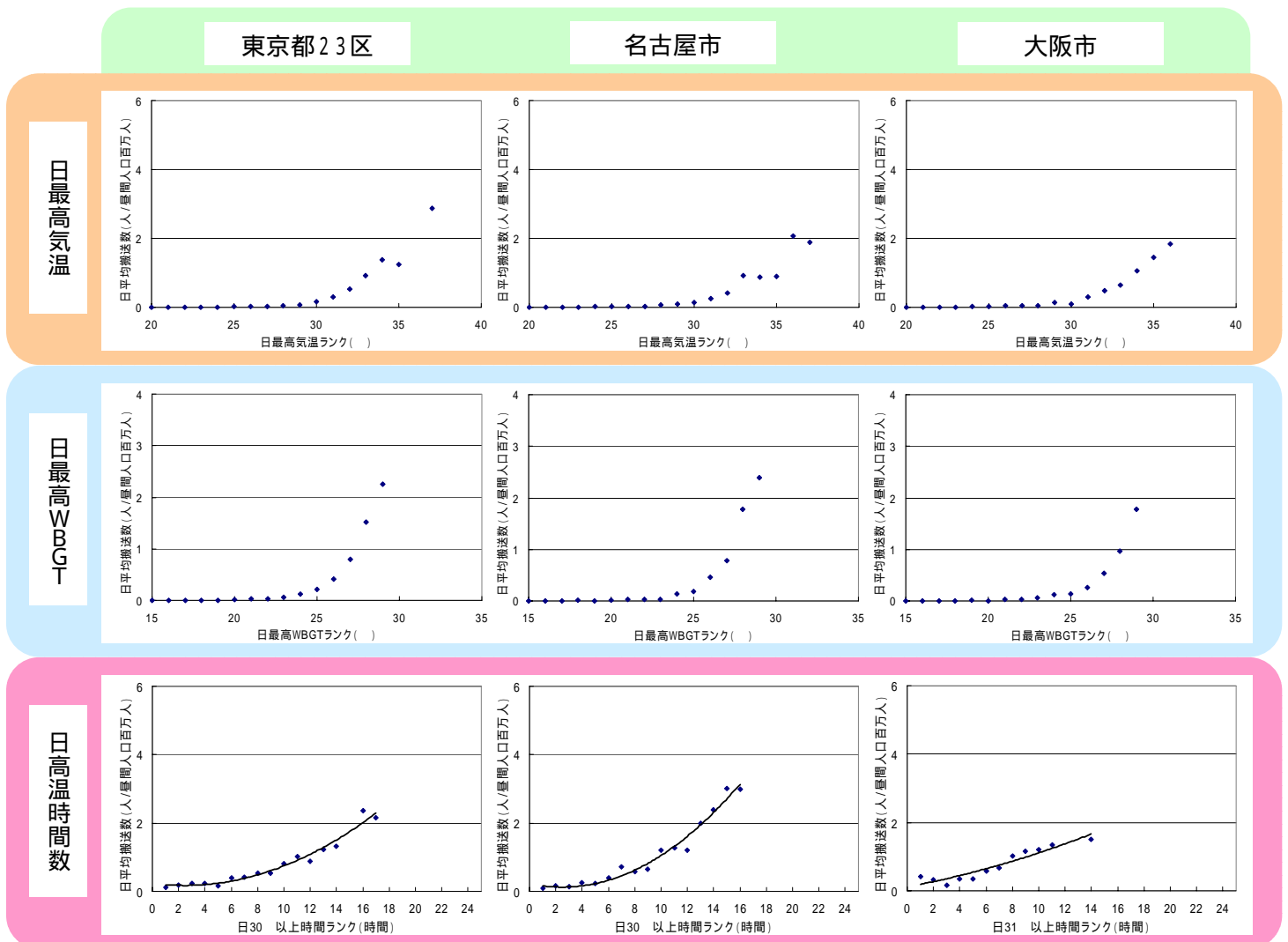


図2 各暑熱関連指標と熱中症搬送数との関係

- 1 熱中症救急搬送数は、各自治体の消防庁、消防局提供資料にもとづく。
- 2 気象データは、東京都23区は東京気象台、名古屋市は名古屋気象台、大阪市は大阪気象台のデータを使用した。
- 3 WBGT は推定値を用いた。

次に日高温時間数ですが、最高気温との関係で得られた熱中症の発生が増加し始める気温を考慮し、東京、名古屋では30を基準とした30以上時間数、大阪では31を基準とした31以上時間数を用いました。この基準となる気温のことをここでは「熱中症増加気温」と呼ぶことにしますが、地域ごとの違いについてはもう少し対象地域を増やしてその要因などを検討する必要があります。日高温時間数と熱中症搬送数との関係はWBGT同様、ばらつきが少ないことが分かりました。

そのため、以下の理由から今回の調査では暑熱指標として日高温時間数を用いました。

日最高気温はばらつきが大きい

WBGTは推定値であり、推定に必要な気象データを入手できる地域に限られる日高温時間数は、日最高気温や日最高WBGTに比べ、その増加（上昇）割合が大きく、その関連を捉えやすい。（例えば、東京のここ20年間の平均日最高気温は1上昇したが、年30以上時間数は2倍以上に増加している）

3) 熱中症の発生に及ぼす影響の定量的検討

日高温時間数を用いて、7地域におけるここ20年間の気温上昇による熱中症発生の増加割合を試算しました。

ただし、今回は人の高温曝露と熱中症の発生に関する臨床的な検討は行っていません。そのため、ここで得られた推定値は参考程度の値と考えるのが妥当と考えます。

表2 1980年～2000年の熱中症搬送数の増加率の推定【参考】

| | 熱中症 増加気温 | 高温（熱中症増加気温以上） 時間数（時間） | | | 推定搬送数（人） | | |
|-------|-------------|--------------------------|---------------|------------|---------------|---------------|------------|
| | | 1980～ 1984 | 2000～ 2004 | 増加率 （％） | 1980～ 1984 | 2000～ 2004 | 増加率 （％） |
| | | 東京都区部 | 30 | 965 | 1,921 | 199% | 719 |
| 東京都市部 | 29 | 1,217 | 2,234 | 184% | 405 | 918 | 227% |
| 川崎市 | 28 | 1,484 | 2,656 | 179% | 203 | 402 | 198% |
| 横浜市 | 28 | 1,484 | 2,656 | 179% | 439 | 876 | 200% |
| 名古屋市 | 30 | 1,252 | 2,217 | 177% | 257 | 521 | 203% |
| 大阪市 | 31 | 1,248 | 2,018 | 162% | 512 | 829 | 162% |
| 広島市 | 28 | 1,969 | 2,978 | 151% | 248 | 361 | 145% |

搬送数は、各地域の熱中症増加気温が1時間以上出現した日の熱中症搬送数を推計し、これを集計した。

【2. エネルギー消費に及ぼす影響】

- STEP1: 民生、運輸、産業の各部門における気温影響の有無について、地域ごとに平均的な影響を評価した。また、地域ごとの気温影響の違いを調べた（マクロ評価）
- STEP2: マクロ評価で影響の見られた民生家庭部門と業務部門について、ヒートアイランド現象が顕著となる都市域に焦点をあて、詳細な影響評価を行った（マイクロ評価）
- STEP3: 夏季のエネルギー消費量の増大によるピーク電力への影響について考察した

今回の解析で得られた結果の概要は、図3のようにまとめることができます。「+」は、気温が上昇することによりエネルギー消費が増加することを表し、「-」は逆に減少することを意味します。

エネルギー消費部門ごとにその影響の違いを見たところ、運輸と産業部門では影響が見られませんでした。また、民生部門については全般的に夏季はプラス、冬季はマイナスの影響がありましたが、通年で評価すると冬季の影響が強い家庭は全体でマイナス、夏季の影響が強い業務はプラスの影響となります。しかし、大阪を例に都市域に焦点を絞って評価すると、都市域でも都心部は夏季のプラス影響が強くなっていることが分かりました。そのため、通年で民生部門全体を見ると、郊外ではあまり影響がありませんが、都心部ではエネルギー消費量が増大する可能性があります。

ただし、これは全ての地域が仮に通年で1 上昇した場合の評価結果です。地球温暖化やヒートアイランド現象による実際の気温上昇の地域的な分布や時間的な強度の違いを考慮した場合には、結果は異なるものと考えられます。

| 地域ごとに平均的な影響を評価 (マクロ評価) | | 民生部門 | | 運輸部門 | 産業部門 |
|---------------------------|----|------|----|--------|------|
| | | 家庭 | 業務 | | |
| | 夏季 | + | + | + (軽微) | 影響なし |
| | 冬季 | - | - | - (軽微) | 影響なし |
| 通年 | - | + | ±0 | 影響なし | |

↓

| 都市域を対象として詳細な影響を評価 (マイクロ評価) | | 家庭 | | 業務 | | 民生部門計 | |
|-------------------------------|--------|--------|----|-----|----|-------|----|
| | | 都心部 | 郊外 | 都心部 | 郊外 | 都心部 | 郊外 |
| | 夏季 | + | + | + | + | + | + |
| | 冬季 | - | - | - | - | - | - |
| 通年 | + (軽微) | - (軽微) | + | + | + | ±0 | |

図3 エネルギー消費に及ぼす影響評価の概要

1) マクロ評価

ここでは関東地域、関西地域など、日本を9地域程度に分け、既存の統計資料などを用いてエネルギー消費に及ぼす気温の影響を大まかに調べました。

その結果、運輸部門、産業部門では気温上昇によるエネルギー消費への影響はほとんど見られませんでした。図4に民生部門における気温の影響を調べた結果を示します。民生部門では、家庭、業務（オフィスビル等）の両方で影響が見られ、夏季の気温上昇によりエネルギー消費が増加、冬季の気温低下でも増加するV字型の気温影響があることが分かりました。また、家庭と業務ではエネルギー消費が最も少なくなる気温が1～2異なるようです。通年で評価すると家庭は気温上昇により北海道・東北で3～4%、その他の地域で1～2%エネルギー消費は減少しますが、業務は1～2%増加することが分かりました（表3）。

特に業務の夏季の気温感応度は大きく、業務建物が集中している都心では夏季の影響が顕著になることが懸念されます。

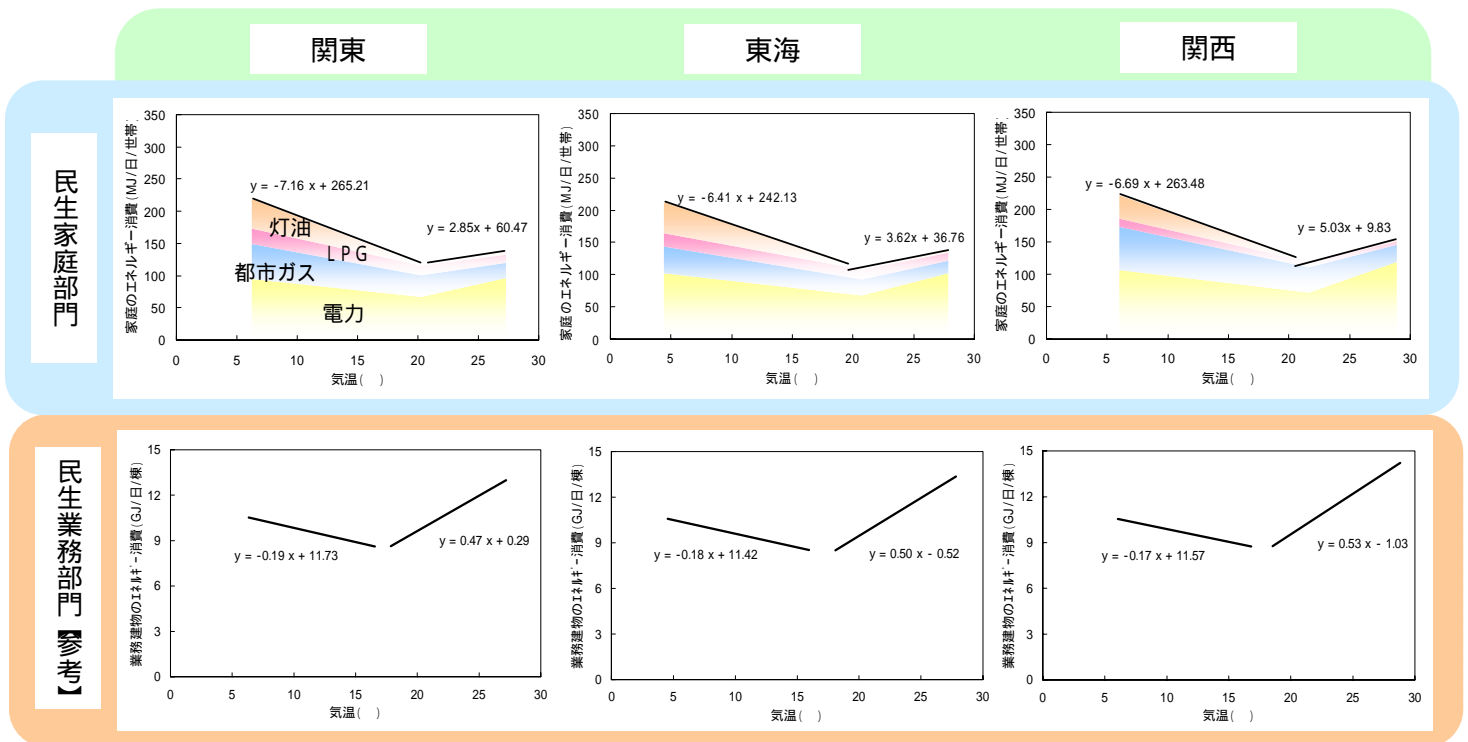


図4 民生部門における気温影響のマクロ評価結果

- 1 電力、都市ガス、L P G、灯油に関する各種統計資料をもとにエネルギー消費量の月平均値を算出、各地域の月平均気温との関係を示した。
- 2 電力は1次エネルギー換算値で示した。
- 3 民生（業務）部門については、統計的な整合性に欠けるため参考として示した。

表3 民生部門における気温影響のマクロ評価結果（通年評価）

| | 民生（家庭）部門 | 民生（業務）部門【参考】 （関東・東海・関西・九州） |
|------|------------------------------|-------------------------------|
| 通年影響 | 北海道・東北 3%～4% その他の地域 1%～2% | 1%～2% |

- 1 1 の気温上昇によるエネルギー消費量の増減割合を示した。はエネルギー消費量の減少を示す。
- 2 民生（業務）部門については、統計的な整合性に欠けるため参考として示した。

2) ミクロ評価

マクロ評価では、民生部門で気温の影響があることが分かりました。そこで、今度はヒートアイランド現象の顕著な都市部、ここでは例として大阪府をとりあげ、住宅や業務建物に供給、消費されるエネルギーの実績値を用いて詳細な気温影響を調べました。

電力消費³⁾

電力供給区単位の時刻別電力供給量データを用いて、大阪市内の業務建物、大阪市内の住宅（都心住宅）及び豊中市内の住宅（郊外住宅）の3種類の夏季と冬季の時刻別気温感応度（気温が1℃上昇した場合の電力消費量の変化）を求めました（図5）。業務建物と郊外住宅を比較すると、朝方や夜は住宅の感応度が高いのに対し、昼間は業務建物が高くなっています。これは一般的なエネルギー消費行動によく合致していると考えます。ここでの特徴は、夏季の都心住宅の気温感応パターンです。郊外住宅で見られるような日中の落ち込みが都心住宅では確認されず、起床時から就寝前まで一日を通して気温感応度が高い値を示していました。

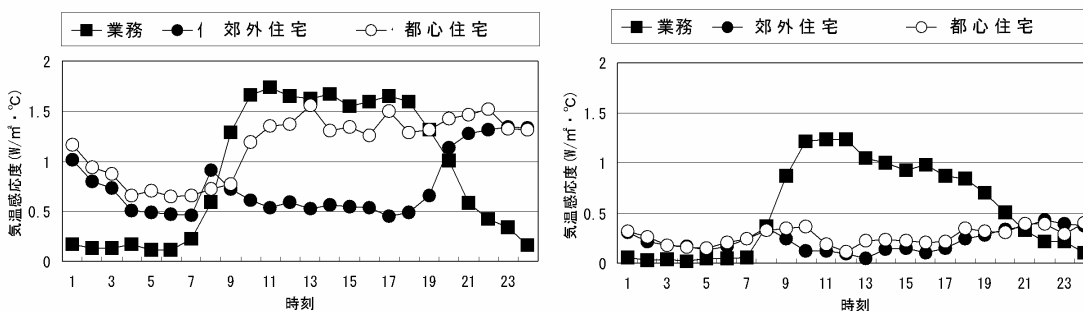


図5 床面積あたりの気温感応度(左:夏季、右:冬季)

ガス消費⁴⁾

住宅地域に設置された高圧ガバナーにおける時刻別ガス送出量を用いて、住宅における時刻別気温感応度を求めました。住宅における平日・休日別の時刻別気温感応度を図6に示します。

朝方や夜のガス消費が多い時間帯の気温感応度が高くなっていることが分かります。また、休日は平日に比べ午前中は感応度が高い状態が続いています。これは平日と休日の生活パターンが異なることを示しているものと考えられます。

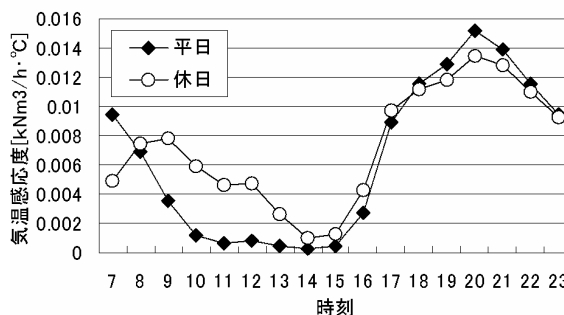


図6 住宅のガス消費に関する気温感応度

業務建物におけるガス消費の気温感応度は、個別建物（熱源方式としてガス方式の

3) 鳴海大典、下田吉之、水野稔(2005): 気温変化が地域の電力消費に及ぼす影響、エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、No.21
 4) 二浦尾友佳子、坂口勝俊、鳴海大典、下田吉之、水野稔(2005): 大阪市域の住宅におけるエネルギー消費の気温影響、空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集

みを採用する建物)におけるガス消費実績値(特別)を用いて夏季、冬季別の気温感応度を求めました。その結果、ほぼ電力消費の気温感応度と同様な動きを示しました。

灯油消費

マクロ評価では家庭部門における灯油消費の気温影響として平均的な値を求めましたが、ここでは戸建住宅と集合住宅のそれぞれで算出しました。

大阪の住宅における灯油の用途はほぼ暖房ですが、戸建に比べ集合住宅における気温影響が小さいようです。断熱性能や暖房に灯油を用いる割合の違いなどが結果に表れていると考えられます。

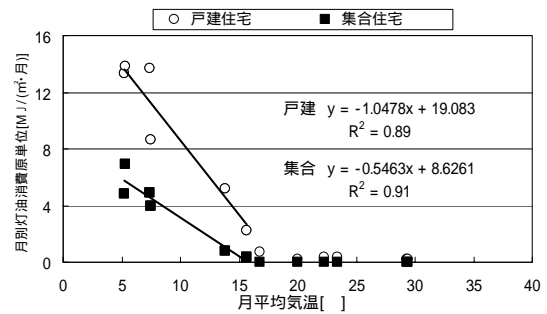


図7 住宅の灯油消費に関する気温影響
出典) 関西地区建物エネルギー消費実態調査報告書(1997)空気調査衛生工学会関西支部から作成

民生部門全体のエネルギー消費への気温影響

電力、ガス、灯油の各エネルギー消費を合計し、大阪府全域の気温が1 上昇した場合の民生部門のエネルギー消費量の気温影響を求めました。その際、評価対象地域として、業務建物が集中する「淀屋橋地区」、「大阪市」、郊外として「大阪市を除く大阪府」そして「大阪府全域」の4地域を設定しました。

結果は、住宅・業務建物ともに夏季はプラス、冬季はマイナスの気温影響がありますが、その影響の程度は都心部に向かうほど大きくなることが分かりました。合計で夏季は5～7%、冬季は3～6%の変動があります。また、通年の評価を見ると、郊外地域では夏季と冬季が相殺されて影響がほとんど見られませんでした。都心部では2.5%増加することが分かりました。

表4 住宅におけるエネルギー消費の変動度(上段:夏季、中段:冬季、下段:通年)

| 検討対象範囲 | 電力変動度 | ガス変動度 | 灯油変動度 | 合計変動度 | 合計変動量 |
|-----------|-------|-------|--------|-------|-----------|
| 淀屋橋 | 11.5% | -8.2% | 0.0% | 8.7% | 0.080 TJ |
| 大阪市 | 10.6% | | | 7.9% | 1984 TJ |
| 大阪市を除く大阪府 | 7.2% | | | 4.9% | 2415 TJ |
| 全域 | 8.4% | | | 5.9% | 4398 TJ |
| 検討対象範囲 | 電力変動度 | ガス変動度 | 灯油変動度 | 合計変動度 | 合計変動量 |
| 淀屋橋 | -3.0% | -3.6% | -8.9% | -3.8% | -0.051 TJ |
| 大阪市 | -2.8% | | -9.3% | -3.5% | -1243 TJ |
| 大阪市を除く大阪府 | -2.5% | | -8.9% | -3.5% | -2574 TJ |
| 全域 | -2.6% | | -9.0% | -3.5% | -3818 TJ |
| 検討対象範囲 | 電力変動度 | ガス変動度 | 灯油変動度 | 合計変動度 | 合計変動量 |
| 淀屋橋 | 2.7% | -4.9% | -9.9% | 0.5% | 0.015 TJ |
| 大阪市 | 2.5% | | -10.8% | 0.4% | 352 TJ |
| 大阪市を除く大阪府 | 1.2% | | -9.9% | -0.7% | -1245 TJ |
| 全域 | 1.7% | | -10.1% | -0.4% | -965 TJ |

3) 夏季のピーク電力消費に関する検討

これまでの検討から、年間を通してエネルギー消費の気温上昇による影響を見ると、

夏季の増加と冬季の減少で相殺され、現状ではそれほど大きな影響とはならないと考えられます。しかし、夏季の気温上昇は特に電力供給のピーク部分を先鋭化させることに注意を払う必要があります。そのため、夏季のピーク電力供給の発生状況などを調べ、今後検討すべき課題の整理を行いました。

図8に最大電力量、図9に気温感応度の経年変化を示します。関西電力管内の最大電力発生量は、気温が上昇しているにもかかわらず平成7年以降横ばいの傾向を示しています。また、気温感応度はここ数年低下していることが分かります。これらの現象は、空調機器の効率が向上したことやガス空調機器への移行などの構造的要因が主なものと考えられています。

しかしながら、今後のさらなる気温上昇は、電力供給システムの安定性の一つの目安となる年間発電負荷率（年平均電力／ピーク電力）に悪影響を及ぼす可能性があります。

地域的な排熱量の観点が必要なヒートアイランド現象への影響、全体的なCO2排出量の観点が必要な地球温暖化への影響などの分析を踏まえた上で総合的に判断していくことが重要と考えられます。

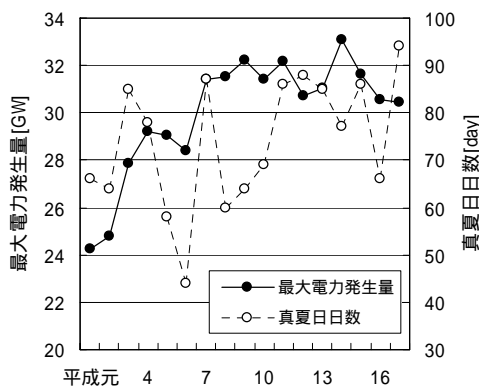


図8 最大電力発生量と年間真夏日日数の経年変化(関西電力管内)
出典) 電気事業連合会HPを参考に作成

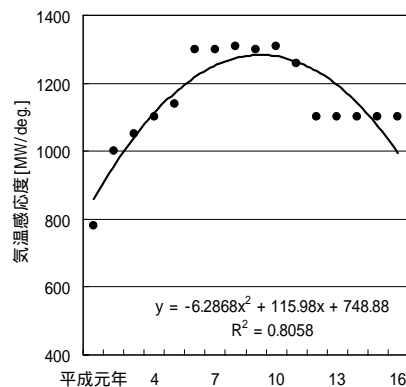


図9 最大電力の気温感応度の経年変化(関西電力管内)
出典) 関西電力HPを参考に作成

【3. 睡眠障害・植物成長阻害に及ぼす影響】

高温による睡眠障害及び植物成長阻害に関する文献を収集し、以下のような知見が得られました。

1) 睡眠障害に及ぼす影響

- ・ 入眠時に深部体温が低下する身体リズムのため、体温を適切に放散できない高い温度は快適な睡眠に適さない。
- ・ 個人的な差異が大きいことから、一概に最適な睡眠環境を規定することは難しいが、おおよそ28以上の室温になると不快な条件になると指摘されている。
- ・ 冷房使用時の冷えやだるさ、タイマー切れによる暑さでの途中覚醒など、クーラーを利用しても必ずしも快適な睡眠環境とはなっていないことが指摘されている。

2) 植物の成長阻害に及ぼす影響

- ・都市内の温度上昇による植物の開花日等の変化は、東京、横浜、大阪といった大都市だけでなく、熊谷などの中小都市でも確認されていた。
- ・キャベツ、レタス、ホウレンソウなどは高温に対して脆弱であり、高温下では野菜等の作物栽培に影響が生じるおそれがあることが確認された。
- ・秋季から冬季にかけての植物の休眠に対する影響については、これまでの調査は主に当該植物の生産に適した産地での事例であり、作物の休眠覚醒に有効な温度帯の幅が比較的広いいため、数度の気温上昇では休眠覚醒に対する影響が生じることはないことが示唆された。
- ・しかし、落葉広葉樹の南限に近い地域などで気温上昇が生じた場合には、休眠覚醒への影響が発生する可能性があることも指摘された。

【4. 都市の風と気温の実態把握】

1) 都市の風に関する解析

東京タワーなど東京都 23 区内の常時監視局の 2004 年夏季の測定データを用い、建物高さなどの都市形態パラメータとの関連を解析することにより、都市内の任意の一定高さにおける風速推定方法を検討しました。これにより、図 10 に示すように都区部の一定高さにおける風速を 500m メッシュで推計し、東京都 23 区部の強風・弱風域を図化することができました。この成果は都区部の風による換気力の評価を行うための基礎資料として今後活用できると考えられます。

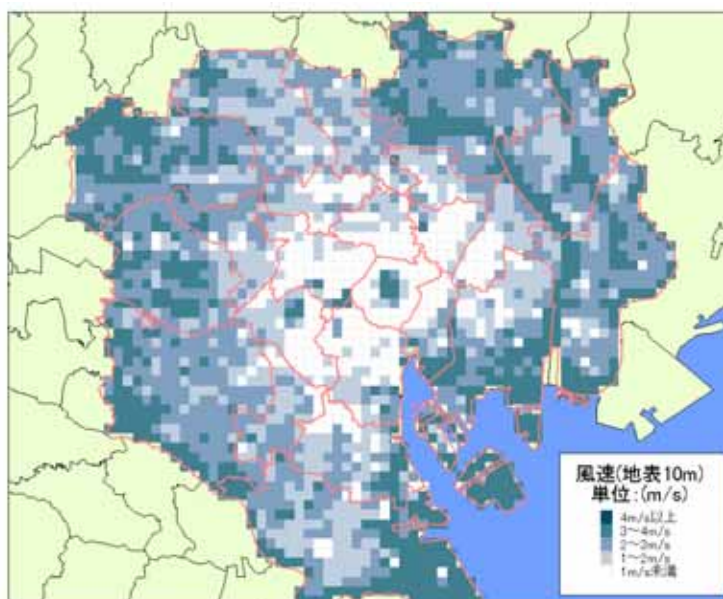


図 10 都市内の風速推定例（地表 10m）
（500mメッシュの建物パラメータを用いた推計結果）

2) 気温等の広域測定

ヒートアイランド現象の実態把握

のため、関東圏 7 地点、中部圏 4 地点、近畿圏 6 地点において温度等の測定を行いました。この測定により記録的猛暑となった 2004 年夏の都心（気象庁観測データ：大手町）と東京湾（本調査データ：海ほたる）の気温の状況を確認することができました。最高気温は都心より東京湾のほうが 4 程度低くなっていました。これは、東京湾においては海水の影響により日中の気温の上昇変化が緩和されたことによるものと推察されます。

気温等の広域測定は今後も引き続き実施し、さらにデータの蓄積を行うことでヒートアイランド現象の実態把握が進むものと考えます。

【5. 今後の課題】

熱中症の発生については、東京から広島までの7つの地域を対象に検討しました。その結果、気温上昇により熱中症の搬送数増加していることが示されましたが、東に行くほど増加率が大きくなる傾向がありました。逆にエネルギー消費に及ぼす影響については、西に行くほど気温感応度が高くなる傾向が見られ、対象ごとに影響の大きな地域が異なることが示唆されました。さらに植物の成長阻害に関する知見を整理したところ、植物の南限に近い地域などで影響が大きくなることが分かりました。これらの結果から、今回の調査で影響の重要な側面を捉えるための目安を示すことができたものと考えます。また、影響を詳細に把握するには、各都市に特化した実態調査などが必要になることも分かりました。

しかし、今回対象にしたのは熱中症の発生やエネルギー消費など影響項目の一部であり、検討が必要な項目はまだ多く残されています。また、今回の調査では対象とできなかった地域も含めて解析することにより、ヒートアイランド現象による環境影響に対する知見を深めていくことが必要です。

一方、ヒートアイランド現象の実態把握として都市における風速の推定を行いました。ただし、この推定については多様な都市構造条件における適用性の確認などが今後の課題となっております。また、都市圏において引き続き温度等の実測データを蓄積し、ヒートアイランド現象の実態把握を引き続き行っていくことも非常に重要な課題です。

これまで調査、検討を重ねてきたヒートアイランドの原因、現象及び影響に関する知見がある程度整理されてきたことから、今後は地域の熱特性なども含めた総合的な都市の熱環境評価などについて、基礎的な検討を始めることが求められます。