

都市のヒートアイランド現象と猛暑

つね 常 松 展 充[†]

東京都心では高温化が著しく、過去 100 年間に年平均気温が 3.3℃上昇し、最高気温 35℃以上となる猛暑の日が増加する傾向にある。こうした状況のもと、都内では熱中症患者数の増加が顕著であり、2010～2015 年の統計では区部だけで毎年 2 千を超える人が熱中症で救急搬送されている。また、昼間に住居で高齢者が熱中症を発症するケースが多い。このため、高齢化率の高い木造住宅密集地域等において暑熱対策を充実させることが急務となっている。

都市高温化は地表面状態に強く依存することから、緑化や遮熱・保水性舗装化により蓄熱を緩和して地表面から大気へ輸送される熱量を減らす対策が実施されてきた。一方、たとえば区部のオフィス・商業施設街を対象とした暑熱対策では、日除けやドライミストの設置等、コストが比較的安く即効性の高い対策が積極的に導入されるようになってきている。

キーワード：ヒートアイランド現象、猛暑、熱中症、暑熱対策、東京

1. はじめに

毎年夏になると猛暑に関する記事が紙面を賑わせているように、今日では夏の暑さが人々の生活や健康に深刻な影響を及ぼすようになってきている。

この原因の一つは地球規模での気温上昇である。地球の年平均気温は、最近 2～3 年において、統計開始（1891 年）以降の最高値を更新し続けており、また、陸域における地表付近の気温でみると、100 年あたり約 0.9℃の割合で上昇している¹⁾。このような地球規模での気温上昇は、主に産業革命以降に二酸化炭素をはじめとする人為起源の温室効果ガスが大気中で増加したことに伴う「地球温暖化」（以下「温暖化」と呼ぶ）によるものと考えられている。

一方、東京など大都市部では、温暖化に加え、土地被覆（地表面状態）や人工排熱が原因となり都市部の気温が郊外に比べて高くなる、いわゆる「都市のヒートアイランド現象」（以下「ヒートアイランド」と呼ぶ）による気温上昇が顕著である。たとえば、東京都心（以下「都心」と呼ぶ）の年平均気温は、ヒートアイランドと温暖化の影響により過去 100 年あたり 3.3℃上昇したのに対し、都市化によるヒートアイランドの影響が小さい国内の 15 地点で平均した年平均気温は、100 年あたり 1.5℃の上昇にとどまっている²⁾。

これらのことから、都心では、ヒートアイランドによる気温上昇が、温暖化によるそれを上回っているものとみられる。

ところで、表 1 に示すように、季節別にみると、都心における気温の上昇が最も大きいのは冬季（12～2 月）について平均した日最低気温であり、100 年あたり 6.0℃である。これに対し、夏季（6～8 月）について平均した日最低気温の上昇は 100 年あたり 2.9℃にとどまっている。また、日最高気温にいたっては 1.2℃の上昇であり、全ての季節における日最高・最低気温の上昇割合の中で最も小さい値となっている²⁾。それにも関わらず、夏の暑さが人々の生活や健康に対して無視することのできない影響を及ぼすようになっているのが現状であり、たとえ夏季の気温上昇が平均で 1℃程度であるとしても社会へのインパクト

表 1 過去 100 年あたりの季節別の日最高・最低気温上昇幅(℃)
(気象庁資料²⁾をもとに作成)

季 節	日最高気温	日最低気温
 春	1.9	4.6
 夏	1.2	2.9
 秋	1.7	4.4
 冬	1.9	6.0

[†] (公財) 東京都環境公社東京都環境科学研究所：〒136-0075 東京都江東区新砂 1-7-5
E-mail: tsunematsu-n@tokyokankyo.jp

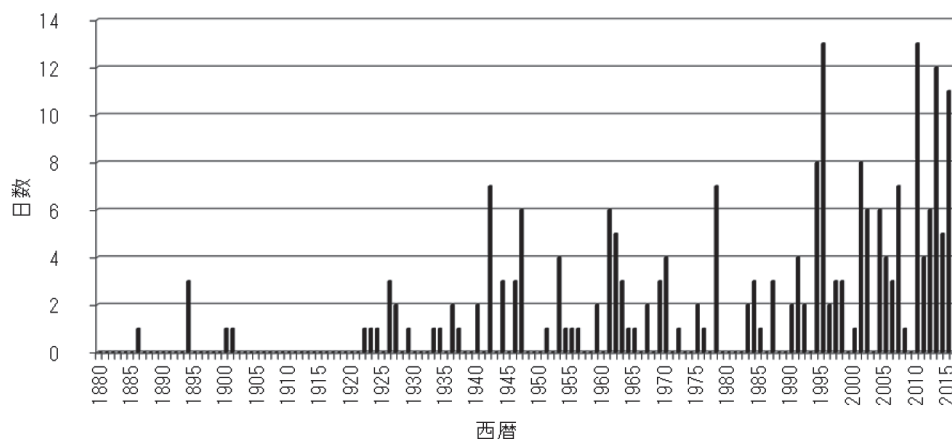
トは非常に大きいといえる。

実際、図 1 に示すように、都心における猛暑日 (a) 及び熱帯夜 (c) の日数は、過去 100 年余りの間に明らかに増加しており、また、真夏日 (b) の日数も緩やかな増加傾向にある。さらに、気候の将来予測によると、現状以上の温暖化対策をとらなかった場合、東京など東日本の太平洋側では、21 世紀末における年間の真夏日日数が、1984 ~ 2004 年平均値である約 50

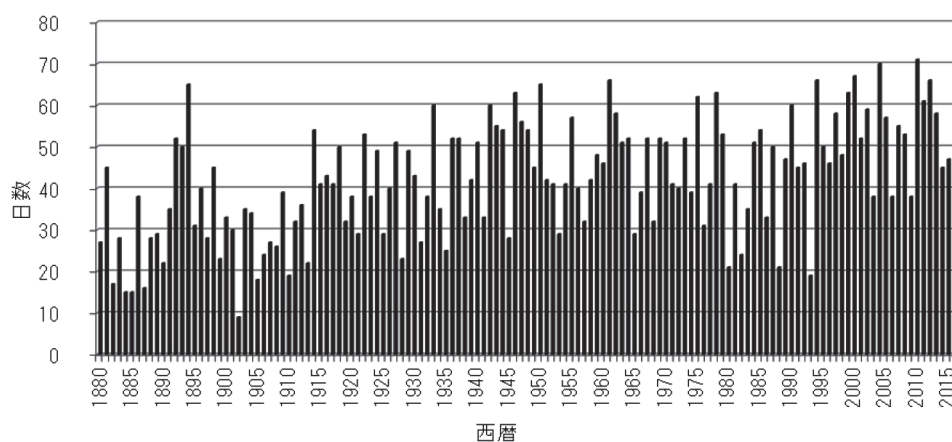
日から倍増することが示されている⁴⁾。

このように、ヒートアイランドや温暖化に伴う高温化の進行により、国内でも気温が非常に高くなることが著しく増えており、それによる健康等の被害は今や重大な気象災害の一つであると言っても過言ではないだろう。猛暑による人間生活への影響を軽減する暑熱対策を拡充させることが、今日の環境施策における喫緊の課題である。

(a) 猛暑日：日最高気温 35℃ 以上



(b) 真夏日：日最高気温 30℃ 以上



(c) 熱帯夜：日最低気温 25℃ 以上

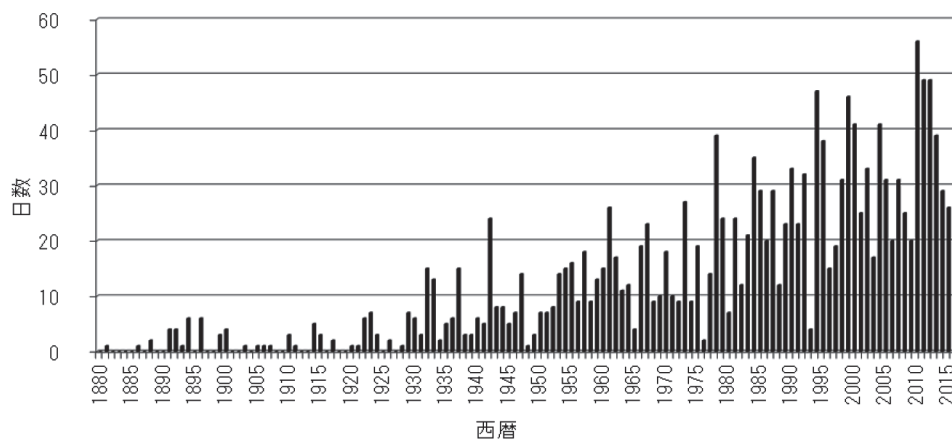


図 1 猛暑日・真夏日・熱帯夜日数の年変化 (期間：1880 ~ 2016 年；気象庁資料³⁾より作成)

本稿では、都心を含む東京 23 区、すなわち東京都区部（以下「都区部」と呼ぶ）を対象として、都市ヒートアイランドの原因と実態、また、それによる健康被害への影響という点から熱中症発症の動向、さらには、健康被害を軽減するための暑熱対策について、猛暑との関係に触れながら述べる。

2. ヒートアイランドの原因と実態

ヒートアイランドとは、前述のように、都市部の気温が郊外と比較して相対的に高くなる現象のことであり、その強度は地表面の状態に大きく依存する。これは、地表面における熱の収支（熱の出入り）が地表面状態の違いによって変化するためである。

一般に、日射（太陽放射）及び大気放射^{*1}によって地表面が受けた熱エネルギーは、日射の反射と地表面の赤外放射^{*2}により上空へ再帰されるとともに、顕熱^{*3}、潜熱^{*4}、地中への伝導熱に分配される。この関係を示したのが次式である⁵⁾：

$$(1 - \alpha) S + \varepsilon L = H + \ell E + G + \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

ここで、 α は地表面の日射反射率（アルベド）、 S は日射量 (W/m^2)、 ε は放射率^{*5}、 L は大気放射量 (W/m^2)、 H は顕熱 (W/m^2)、 ℓE は潜熱 (W/m^2)、

*1 大気放射：大気が地表面等へ向けて電磁波を放つこと

*2 赤外放射：約 $0.78 \mu\text{m} \sim 1000 \mu\text{m}$ の波長の電磁波の放射

*3 顕熱：気体等の温度を上げるのに費やされる熱

*4 潜熱：相変化（液体から気体への変化等）に伴い費やされる熱

*5 放射率：ある物体が実際に出す赤外放射の量と表面温度に応じた最大限の赤外放射量との比

G は地中への伝導熱 (W/m^2)、 σ はシュテファン・ボルツマン定数 ($5.6704 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)、 T は地表面の絶対温度 (K) で、 εT^4 は地表面から大気へ向かう最大限の赤外放射量 (W/m^2) に相当する。なお、顕熱は、日射及び大気放射により地表面付近に蓄えられた熱のうち、気温差により上空へ輸送される熱である「対流顕熱」と、自動車や空調設備等、人間活動に伴うエネルギー消費により排出される熱である「人工顕熱」（一般的には人工排熱と呼ばれている）に分けることができる。また、潜熱は、主に植物の蒸散や土壌・水面等からの水分の蒸発による「蒸発潜熱」と、人間活動に伴う水分の蒸発による「人工潜熱」に分けることができる。

図2は、都区部における夏季晴天日の熱収支を、現況の土地利用、すなわち都市化された地表面のケースと、土地利用を全て自然状態（地表面が自然の土壌や樹木で覆われた状態）に戻したケースで推計した結果である⁶⁾。この図をみると、大気から地表面へ向かう下向きの放射（日射・大気からの赤外放射）及び地表面から大気へ向かう上向きの赤外放射（両者を併せて以下「熱放射」と呼ぶ）の量は、日射反射・顕熱・潜熱・地中伝導熱の量と比較して、現況土地利用ケース・自然状態ケースともに明らかに大きい。また、都市化による増加が最も大きいのは赤外放射量、次いで対流顕熱となっており、両者は地表面状態の変化に伴って大きく変化することを意味する。そして、特に先に述べた対流顕熱・人工顕熱は地上付近の気温に大きく影響し、猛暑日や熱帯夜日数の増加の要因となる。

図1をみると、都心における猛暑日日数・真夏日日数・熱帯夜日数のうち、最も増加傾向が明瞭なのは熱

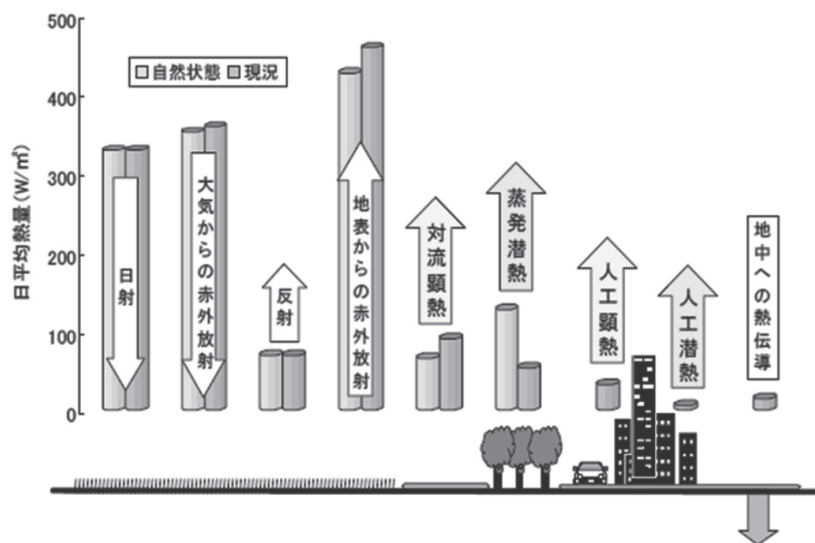


図2 都区部における現況土地利用と自然状態のケースの夏季晴天日の熱収支⁶⁾（各要素の左右の棒グラフはそれぞれ自然状態と現況の日平均熱量）

帯夜日数であり、ここ最近 10 年間における日数は、高度経済成長期初期である 1950 年代における日数の 3 倍近くに達している (c)。このことは、都市化の影響で夜間の気温が下がりにくくなったことを強く示唆している。つまり、中高層ビルが空を覆うことで夜間における地表面の放射冷却^{*6}が妨げられるようになったこと、また、地表面の状態が土壌等と比較して熱容量の大きいコンクリートやアスファルトに変わったことで地表面における蓄熱量が増加し対流顕熱が増えたことなどにより、夜間の気温が下がりにくくなったものと考えられる。

なお、図 1 (c) をみると 2015 年以降に熱帯夜日数が急激に減少しているが、これは、都心における気象庁観測所が大手町から北の丸公園に移動した影響が大きい⁷⁾。図 3 に示すように、都区部における大気汚染常時監視測定局^{*7} (以下「常監局」と呼ぶ) のうち、長期間に渡り継続して気象観測を行っている 16 地点の観測データの平均値でみると、2015 年以降に熱帯夜日数の急激な減少は認められない。

図 4 は、猛暑の日が多かった 2013 年夏について、東京都内における熱帯夜日数の地理的分布を、常監局の観測データを用いて示したものである。これを見ると、熱帯夜日数は、都心付近においては 40 日を超えている一方で、都市化の進行の程度が小さい郊外の多摩西部においては 10 日に満たず、両者の差は 4 倍以上ある。まさに都心付近を中心としてヒートアイランド (=「熱の島」) が形成されている様子をこの図は示している。

* 6 放射冷却: 地表面から大気へ向かう赤外放射により地表面等の温度が下がること

* 7 大気汚染常時監視測定局: 大気汚染防止対策確立のため国・地方公共団体が全国各地に設置して大気汚染や気象の状況を常時監視している測定局

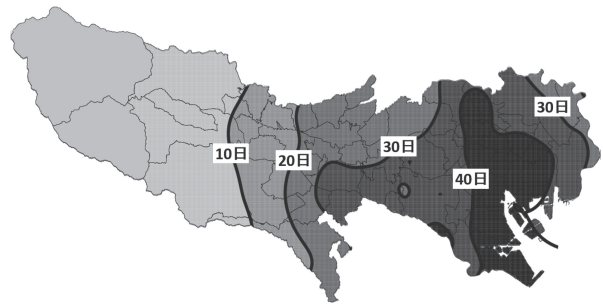


図 4 都内における熱帯夜日数の分布 (集計期間: 2013 年 7 月 1 日～9 月 30 日; 大気汚染常時監視測定局一般局データを使用して作成)

ところで、地表面の温度が気温よりも高くなるほど対流顕熱の量が増加するという関係がある。このため、他地域からの空気移流の影響が小さい限りは、地表面温度が高くなるほど、その場所の気温は上がりやすくなる。そして、(1) 式の右辺最終項より、地表面から射出される赤外放射量を計測することで地表面温度を見積もることができる。したがって、都市表面からの赤外放射量を計測すれば、ヒートアイランドの実態を詳細に把握することが可能である。

図 5 は、太陽高度・方位角がほぼ同じであった 2013 年 8 月 19 日・2014 年 8 月 19 日・2015 年 8 月 19 日に、都区部を対象として実施した航空機計測の結果で、真昼 (12 時台) の上向き赤外放射量を正規化 (標準化) し、合成したものである^{8), 9)}。なお、いずれの日も晴天であり気象条件は類似していた。また、計測高度は約 600 m で、計測データの空間解像度は約 2 m である。この図の北半分に着目すると、たとえば、新宿駅の北西側に当たる [A] という標記で示した地域においては相対的に赤外放射量が多く、その東南東側の [B]・[C]・[D] で示した地域では概ね相対的に放射量が少なくなっている。

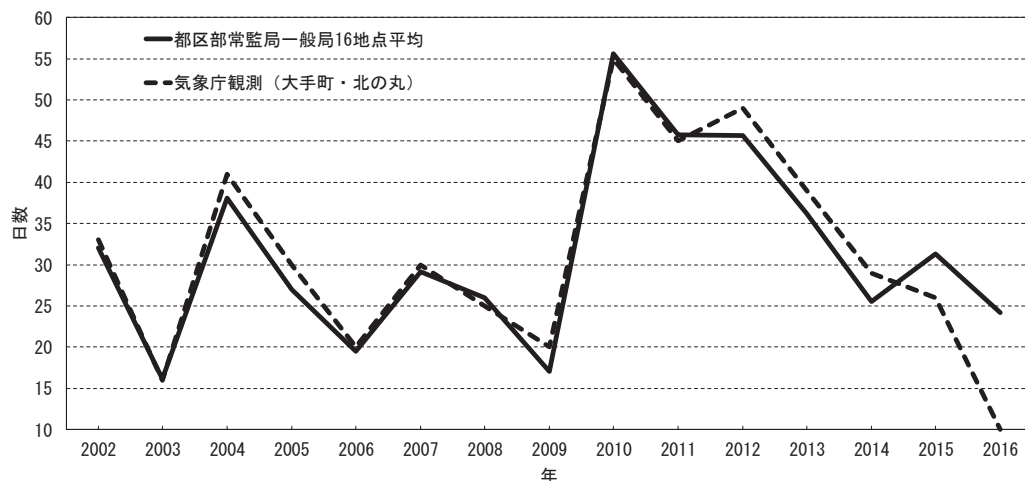


図 3 気象庁大手町・北の丸公園観測所と都区部大気汚染常時監視測定局一般局 16 地点平均の熱帯夜日数の年変化 (集計期間: 2002 ～ 2016 年, 各年 7 月 1 日～9 月 30 日)

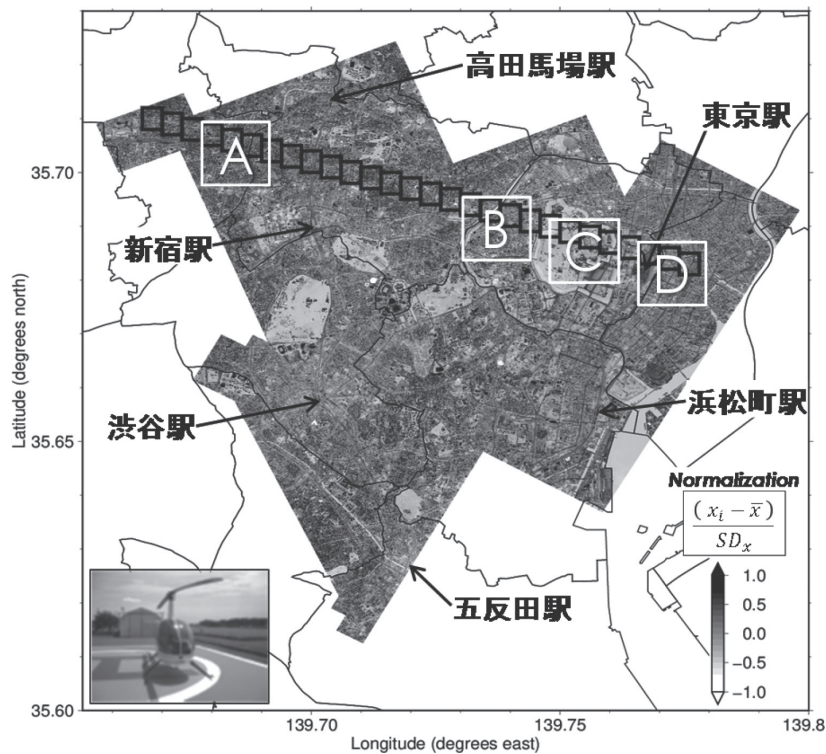


図5 都区部における夏季晴天日12時台の上向き赤外放射量分布（2013～2015年のいずれも8月19日に航空機計測した放射量を正規化し合成）⁸⁾、西北西－東南東方向に並んだ28個の太線枠とそのライン上の[A]・[B]・[C]・[D]の標記は図6に対応

図6は、図5において[A]・[B]・[C]・[D]とともに標示している28個の各黒太線枠内でそれぞれ平均した正規化赤外放射量をグラフ化したものである。この図をみると、真昼の赤外放射量は、西側の地域[A]において最も多く、東側の地域[B]・[D]では相対的に少ないことが明瞭に示されている。また、緑地やお堀が広がる地域[C]では放射量が最も少ない。東京都の建物用途データによると、[A]で示した地域では戸建住宅の割合が最も多く、集合住宅と併せると、その地域内における全建物用途のおよそ7割を占めている。この地域では住宅が密集して存在しており、東京都により「木造

住宅密集地域」^{*8}（以下「木密」と呼ぶ）に指定されている。一方、地域[D]付近では、オフィスビルや商業施設の割合が多く、全建物用途のおよそ7割を占めている。

このように、夏季晴天日における昼間の上向き赤外放射量は、木密で多く、オフィスビル・商業施設の多い地域で少ない傾向があるといえる。木密で昼間の上

*8 木造住宅密集地域：木造建築物棟数率（木造建築物棟数／全建築物棟数）70％以上、老朽木造建築物棟数率（昭和45年以前木造建築物棟数／全建築物棟数）30％以上の条件に該当する地域

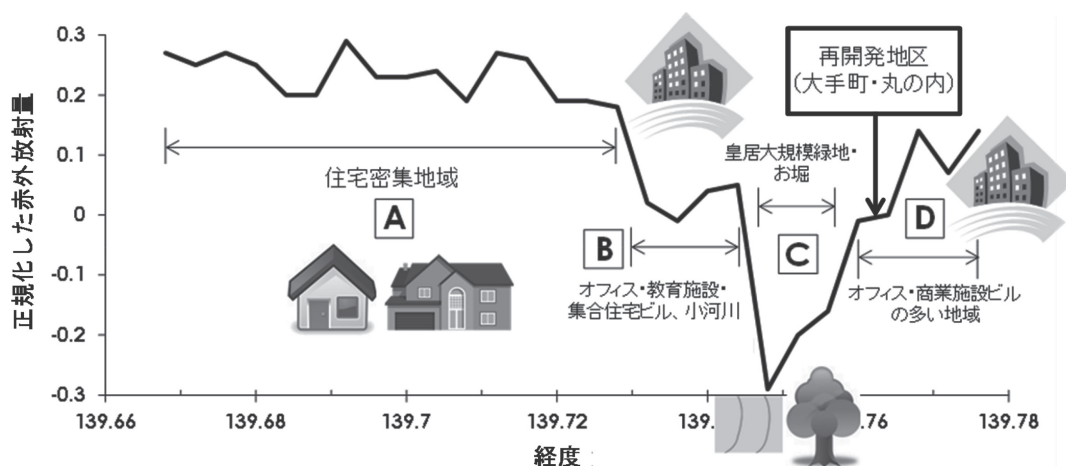


図6 図5の西北西－東南東方向に並んだ28個の各太線枠内でそれぞれ平均した正規化赤外放射量^{8),9)}

向き赤外放射量が多い（地表面温度が高い）傾向にあることの要因は、密集している住宅地では熱がこもりやすいことや、暖まりやすく冷めやすい、すなわち、熱容量が小さい木造の建築物が多いこと、さらには、その影響により昼間において住宅の主に屋根面からの放射が多いことに起因すると考えられる。たとえば、近年の住宅に多いスレート屋根は、熱容量が他の材質と比べて小さく、また、黒色系ものが多いため日射を吸収しやすく、高温になりやすい。

以上のことから、特に都区部の本密では、昼間にヒートアイランド強度が大きくなり、暑熱環境が悪化する傾向があるため、とりわけ猛暑発生時には熱中症の発症に対して充分な注意を要する。

3. 都区部における熱中症の発生状況

図7は、都区部における各年の熱中症救急搬送患者数（以下「熱中症搬送者数」と呼ぶ）の累積値を

2000～2015年の各年について示したものである¹⁰⁾。これをみると、熱中症搬送者数は、2010年以降に急激に増加しており、2015年までの6年間では毎年2000人を超えていることがわかる。また、図8に示すように、日最高気温が30℃を超える（真夏日になる）あたりから熱中症搬送者数が指数関数的に増え、搬送者数が1日に150人を超える大規模な熱中症発症の事例は、全て最高気温35℃以上の日、すなわち猛暑日に記録されている。この図において、 R^2 値は約0.765であり、相関係数は0.85より大きく、熱中症搬送者数と日最高気温との間には強い正の相関が認められる。

図9は、都区部における2010～2015年の熱中症搬送者数の発生場所別の割合を示したものである。この図をみると、各年とも「住居」における搬送者数が最も多く、全発生場所の約4割を占めている。次に、図10は、図9の「住居」について、時間別・年齢別

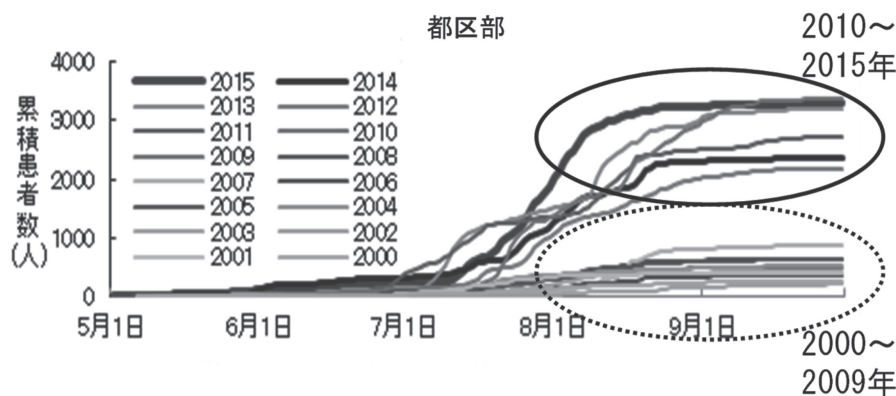


図7 都区部における熱中症救急搬送患者累積数（人）の年変化（集計期間：各年5月1日～9月30日；国立環境研究所資料¹⁰⁾に加筆）

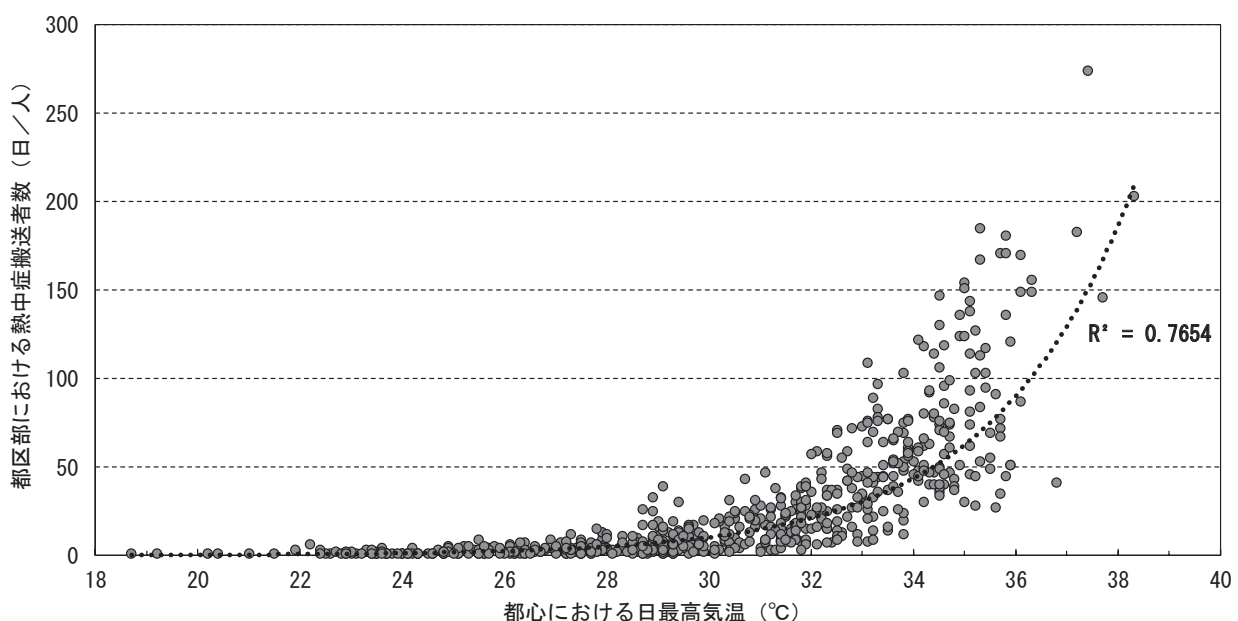


図8 都区部における熱中症搬送者数（人）と日最高気温（℃）の関係（集計期間：2010～2015年各年6月1日～9月30日；気象庁データ及び東京消防庁提供データを使用して）

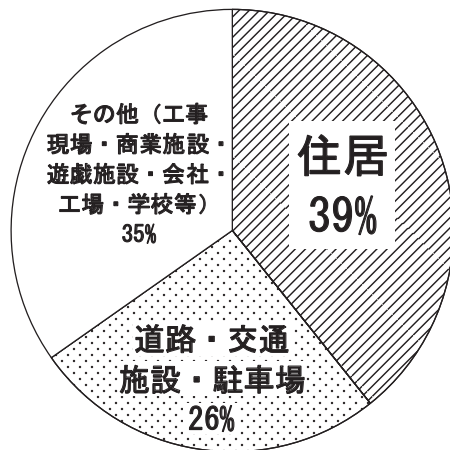


図9 都区部における熱中症搬送者数（人）の場所別割合（集計期間：2010～2015年；東京消防庁提供データを使用して作成）

に熱中症搬送者数を示したものであるが、晴天日において気温がピークを迎える時間帯である13～14時台に搬送者数が最も多く、それに次いで夕方（17～18時台）に搬送者数が多くなる傾向がある。また、どの時間も65歳以上の高齢者の熱中症搬送者数が最も多い。

なお、東京都監察医務院によると、2010～2015年の夏に、都区部において500人以上が熱中症により死亡したと判断される。

このように、熱中症発症は夏季における無視することのできない健康被害問題となっているが、こうした状況には、ヒートアイランドの顕在化や温暖化の進行に加え、近年の急速な高齢化が少なからず影響していると考えられる。東京都の推計によると、都区部外周部における高齢化率（65歳以上人口を総人口で除した

値）は、2050年には最も高い所で45%を超える¹¹⁾。都区部外周部には木密が広がっており、特にこの地域では高温化と高齢化の同時進行の影響を強く受けっているとみられ、家屋における熱中症発症数が今後さらに増えることが予想される。このため、そう遠くない時期に、木密を熱中症危険地域とみなし、暑熱対策を早急に検討・実施する必要性に迫られるであろう。

4. 暑熱対策

人が感じる温度、すなわち体感温度に影響する要素は、気温、湿度（水蒸気量）、風速、熱放射の量、それに個人の代謝量や着衣量である¹²⁾。したがって、一般に猛暑というと極端に気温が高くなる現象のことをいうが、猛暑発生時における体感温度への影響を軽減するためには、気温低下につながる対策に加えて、湿度低下、風速増大、熱放射量減少をもたらす対策の実施が求められる。たとえば、屋内空間であれば、エアコンの使用による気温や湿度の低減、窓の開放による風通しの確保、家屋表面における材質の変更や断熱強化による熱放射量の低減といった暑熱対策があげられる。

屋外空間については、屋内のように仕切られた空間ではないため、気温と湿度そのものを人為的にコントロールすることは非常に困難である。また、「風の道」の創出等により風速をコントロールすることが可能であるが、それには高いコストを要するほか、結果として近辺に風速の小さい場所が生じてしまうトレードオフの関係が考えられる。一方、熱放射量は、日除け設置、樹木による緑陰形成、散水、遮熱性・保水性舗装化等によって明瞭に減少させることができるため、人

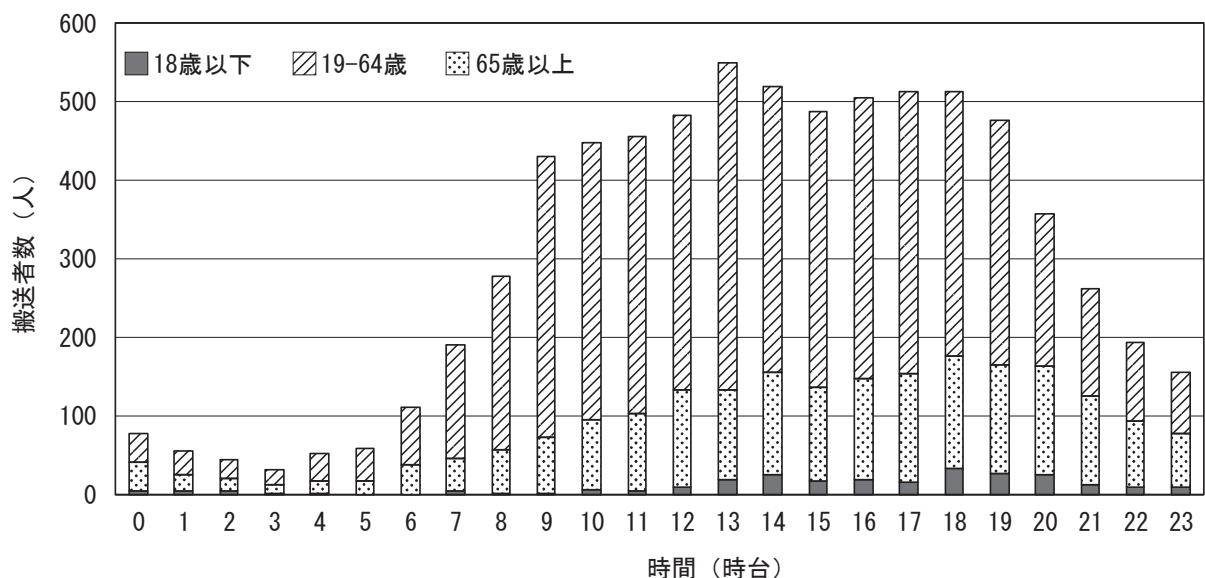


図10 都区部の住居における熱中症搬送者数（人）の発生時間別・年齢別割合（集計期間：2010～2015年；東京消防庁提供データを使用して作成）

為的にコントロールすることが比較的容易であり、かつ、どこかで放射が弱められた結果、その近隣の放射が強まるということは考え難く、トレードオフの関係が弱いという特性がある。このため、屋外空間においては、熱放射量を低減させる施策が有効であるといえる。

図6をみると、オフィスビル・商業施設の多い地域（エリアⅣ）の中でも、再開発地区（大手町・丸の内地区）では、赤外放射量が相対的に少ない。また、大手町・丸の内地区に限らず、都区部において近年大規模に再開発された場所では、昼間の赤外放射量の減少が目立つ⁸⁾。これは、都の建築物環境計画書制度や都市開発諸制度、それに、緑地創出に関する指針等により、特に再開発地区では公開空地の設定とそこへの緑地や水面の導入をはじめ、保水性・遮熱性被覆化等の推進がはかられてきたが、そうした行政の取り組みが、熱環境の改善に対して一定の効果をあげていることを示している。また、容積率緩和によるビル高層化に伴う日陰面積の増加も、熱放射量の低減の一因となっている。

ところで、表2に示すように、屋外におけるヒートアイランド対策は、大きく「緩和策」と「適応策」の二つに分類することができる¹²⁾。「ヒートアイランド緩和策」（以下「緩和策」と呼ぶ）とは、主に都市スケールにおける気温や地表面温度の上昇抑制を目的とした対策であるのに対し、「ヒートアイランド適応策」（以下「適応策」と呼ぶ）とは、局所スケールでの体感温度の低減や個人的熱ストレスの軽減を主な目的とした対策である。広い範囲で土地被覆の改変を行うことを目標とする緩和策については、膨大なコストを要するだけでなく、たとえば都心を中心とした約25 km²の領域内の全ての道路に遮熱性あるいは保水性舗装を施行することを想定した数値シミュレーション結果¹³⁾において、昼間の気温が平均的に0.2℃程度しか下がらないことが示されるなど、その限界も指摘されている。このため、コストが比較的安く即効性・実現性が高い適応策に対するニーズが高まっているとみられ、実際に行政の現場では、都区部のオフィ

ス・商業施設における暑熱対策として、適応策を積極的に導入するようになっている。

5. おわりに

これまで述べてきたように、都市における高温化とそれに伴う猛暑日や熱帯夜の増加は、温暖化による地球規模での気温上昇に加え、主に地表面状態の変化や人工排熱に起因するヒートアイランドによって引き起こされる。しかしながら、両者以外の要素も高温化や猛暑の増加に少なからず寄与している可能性がある。

その可能性の一つが、近年における日射量の増加である。気象庁高層気象台が長期に渡り首都圏内に位置するつくば市で行っている観測によると、日射量は1990年代半ば以降明らかな増加傾向にある¹⁴⁾。日射量が増加すると、それだけ地表面が受け取る熱エネルギーが増加し、気温上昇に拍車がかかると考えられる。そして、地表面に到達する日射量が増加したことの理由の一つに、高度経済成長に伴って深刻化した大気汚染が改善し、空気中の汚染物質による散乱・吸収が減少した可能性があげられる。

また、東京都内では、石油等の硫黄分を含む化石燃料が燃える際に大気中に放出される硫黄酸化物や、自動車等の高温燃焼に伴って放出される窒素酸化物の濃度は低下したものの、光化学オキシダント^{*9}の濃度はむしろ1990年代以降に緩やかな上昇傾向にある¹⁵⁾。オキシダントの主成分はオゾンであるが、オゾンは強力な温室効果ガスでもある¹⁶⁾。

なお、オキシダント生成には、揮発性の有機化合物が重要な役割を果たすが、近年の都市緑化を推進する施策によって都内の街路樹が大幅に増加した¹⁷⁾結果、大気中における植物起源の揮発性有機化合物濃度が上昇することで、光化学オキシダントの漸増の一因となっている可能性も考えられる。また、大陸からの汚染物質の飛来や、揮発性有機化合物濃度とのバランスからみた窒素酸化物濃度の低下、気温上昇等も、光化

*9 光化学オキシダント：自動車や工場から排出される窒素酸化物や揮発性有機化合物が、太陽の強い紫外線を受けて光化学反応を起こすことで生じる酸化性物質

表2 ヒートアイランドの緩和策と適応策（環境省資料¹²⁾をもとに作成）

	緩和策	適応策
目 的	都市スケールでの気温等の上昇抑制	局所スケールでの暑熱環境の改善
施 策	土地被覆の改変や人工排熱の削減	街路樹整備やドライミスト・日除け設置
長 所	都市高温化に対する根本的な対策	即効性・実現性の高い対策
短 所	コストの高い長期的な対策	都市高温化に対する対処療法的な対策

学オキシダント増加の要因である。

このように、ヒートアイランドと温暖化のみならず、様々な要素が複雑に影響し合いながら都市の高温化に関与しているものとみられる。このため、それら種々のメカニズムを明らかにするとともに、各要素間におけるトレードオフの関係も考慮しつつ、猛暑等、現在の都市大気環境問題の解決に向けて、様々な観点から調査研究に取り組んでいくことが、今よりも快適で持続可能な都市空間を創生するうえで不可欠である。

参 考 文 献

- 1) 気象庁：世界の年平均気温，(2017) http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html
- 2) 気象庁：ヒートアイランド監視報告 2016，(2017)
- 3) 東京管区気象台：東京における気象の記録，(2017) http://www.jma-net.go.jp/tokyo/sub_index/kiroku/kiroku/top.html
- 4) 環境省：日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測について（お知らせ），(2014)
- 5) 菅原広史・清水昭吾・成田健一・三上岳彦・萩原信介，自然教育園における日中の熱輸送—市街地との比較—，自然教育園報告，44，pp.9-13，(2013)
- 6) 環境省：平成 13 年度ヒートアイランド対策手法調査検討業務報告書，(2012)
- 7) 気象庁：「東京」の観測地点の移転について，(2014)
- 8) 常松展充・横山 仁・本條 毅・市橋 新・安藤晴夫・山形与志樹・村上大輔・執行宣彦，東京都区部における夏季晴天日真昼の上向き赤外放射量分布と土地利用の関係，東京都環境科学研究所年報 2016，pp.76-82，(2016)
- 9) Tsunematsu, N., H. Yokoyama, T. Honjo, A. Ichihashi, H. Ando, and N. Shigyo, Relationship between land use variations and spatiotemporal changes in amounts of thermal infrared energy emitted from urban surfaces in downtown Tokyo on hot summer days, Urban Climate, 17, pp.67-79, (2016)
- 10) 国立環境研究所：熱中症患者速報，(2015) <http://www.nies.go.jp/health/HeatStroke/spot/maps.html>
- 11) 東京都総務局：2050 年までの地域別将来人口推計結果（500m メッシュ），(2014) <http://www.soumu.metro.tokyo.jp/05gyousei/01jichiken500mesh.html>
- 12) 環境省：ヒートアイランド対策マニュアル，(2012)
- 13) 小作好明，遮熱性舗装の気温低減効果に関する数値シミュレーション解析，平成 22 年度東京都土木技術支援・人材育成センター年報，pp.59-70，(2010)
- 14) 気象庁高層気象台：日射観測，(2015) http://www.jma-net.go.jp/kousou/obs_third_div/rad/rad_sol.html
- 15) 石井康一郎・星 純也，東京都における光化学オキシダント関連の調査・研究結果，環境省平成 23 年度第 3 回光化学オキシダント調査検討会資料，(2011) https://www.env.go.jp/air/osen/pc_oxidant/conf/chosa/03.html
- 16) 酸性雨研究センター（現：アジア大気汚染研究センター）：増えつつける対流圏オゾンの脅威，(2005)
- 17) 東京都建設局：東京の街路樹，(2015) <http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/jigyo/park/ryokuka/hyoushi/index.html>