

ヒートアイランドと温暖化： ヒートアイランド対策と暑さ対策は違うのか？

日下博幸（筑波大学・計算科学研究センター）

1. はじめに

ヒートアイランドと温暖化、どちらも人間活動による昇温現象ですが、そのメカニズムは異なります。また、都市の長期的な気温上昇に対するヒートアイランドの効果と温暖化の寄与率は、過去と将来では異なると考えられています。さらには、ヒートアイランドの緩和策と人が感じる暑さの緩和策（暑さ適応策）には共通するものもあれば、相反するものもあります。

本講義では、これらの話題を中心に、ヒートアイランド研究の黎明期における歴史的な研究成果を振り返りながら、現在注目されているヒートアイランドと温暖化、暑さ対策に関する誤解と真実についてお話しします。さらには、日本と世界で行われている研究の最新の成果について紹介します。

2. ヒートアイランド現象の発見

ヒートアイランドとは、都市が存在することで、都市の気温がその郊外の気温よりも高くなる現象です(図1)。英語では、Urban Heat Island (UHI)と言います。そして、都市と郊外の気温差はヒートアイランド強度 (Urban Heat Island Intensity, Urban Heat Island Magnitude) と呼ばれています。ヒートアイランド強度は、都市の気温の高さだけでなく、郊外の気温の低さにも依存することを覚えておいてください。都市の気温がその郊外よりも高いという事実は、ルーク・ハワード (Luke Howard, 1772-1864) によって発見され、1833 年に出版された彼の著書「The climate of London deduced from the meteorological observations, made in the metropolis, and at various places around it」の第3版にこの事実が記載されたことで知られるようになったと言われています (IAUC, 2007)。この歴史的な著書は、2007 年に国際都市気候学会 (International Association for Urban Climate, IAUC) によって編集され、ネットにアップされているので、興味がある方は是非読んでみてください。

実は、ヒートアイランドの発見者は別にいる可能性があります。吉野 (2007) によると、ルイ・コッ

ト (Louis Cotte, 1740-1815) が 18 世紀にパリの高温現象を調査してたとのことです。コットの本はフランス語で書かれているため、私は読めません。なぜルイ・コットをヒートアイランドの発見者であると主張しないのか、いつの日か IAUC に所属しているフランス人都市気候学者に聞いてみたいと思います。いずれにせよ、この時代、都市の高温現象をヒートアイランドとは呼んでいなかったことだけは確かなようです。1920 年代に、Wilhelm Schmidt が自動車を用いた移動観測によってヒートアイランドを観測したことを皮切りに、世界各地で同様の方法でヒートアイランドが観測されるようになりました。東京でも 1939 年に同様の観測が行われています (図2)。

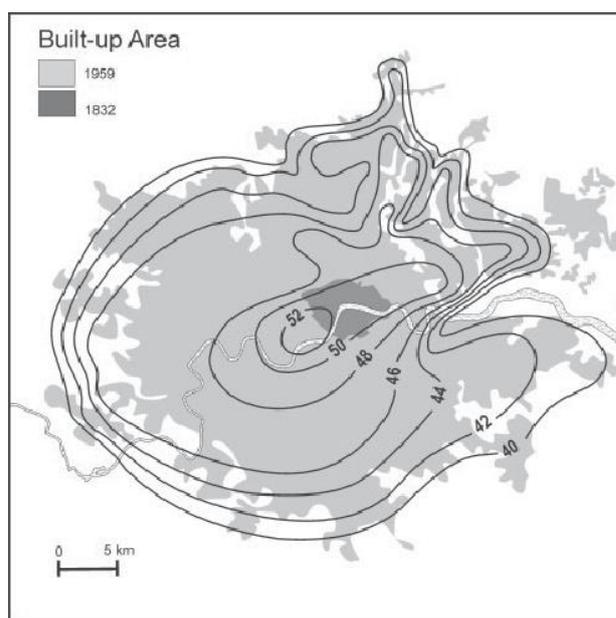


図1 1959年5月14日に観測されたロンドン周辺の日最低気温。Chandler (1965)の図55をトレースしたもの (IAUC, 2007)。ヒートアイランドを描いた図として最も有名な図の一つ。

その後、都市周辺の等温線の形状が島の等高線に似ていることから、この現象は、ヒートアイランド (熱の島) 現象と呼ばれるようになりました。ただ、いつ誰が命名したのかは正確には分かっていません。

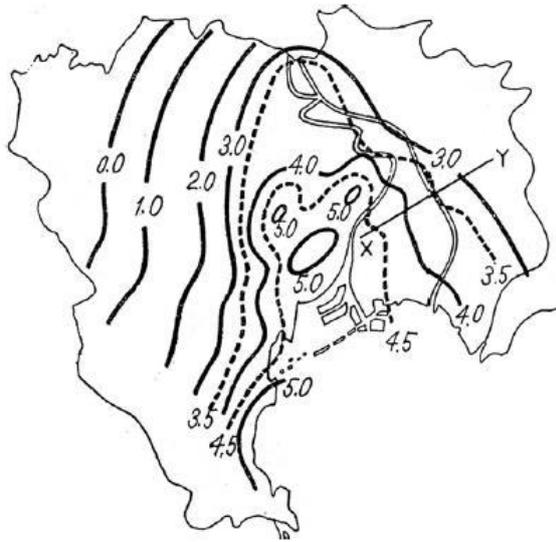


Fig. 2 - Temperature distribution (°C) in Tokyo City (Fukui and Wada, 1941). The observation was started at 2330 local time on 6 March 1939.

図2 1939年3月6日23時30分に観測された東京のヒートアイランド。(福井・和田 1941より)

私が読んだ歴史的に有名な論文の中で、最初にヒートアイランドという言葉が出てきたのは Duckworth and Sandberg (1954)です。日本における気候学の開拓者で世界的な都市気候学者でもあった福井・矢沢 (1957) によるレビュー論文では、Duckworth and Sandberg(1954)を引用しつつも、ヒートアイランドという言葉を使っていません。これらの事実から、ヒートアイランドという言葉は、1954年もしくはそれより前に使われていたが、1957年時点ではまだ広く受け入れられていなかったと思われる。当時の事情に詳しい先生に聞いてみたいところです。

少し脱線しますが、ヒートアイランドの発見者とも言われているルーク・ハワードは、積雲、層雲、巻雲などの命名者、雲形の分類方法の提案者としても知られています。むしろ、雲の研究者という印象の方が強いでしょう。ハワードは気象学史に残る研究者ですが、本業は薬剤師兼製薬会社経営者で、気象の研究は趣味で行っていたようです。すごいですね。

3. ヒートアイランドのメカニズム

ヒートアイランドの水平規模は、都市規模と同程

度です。鉛直規模は、夜間の場合、都市規模が大きくなほど大きく、接地層の厚さ程度（ざっくり言うと100mくらい）です（図3）。

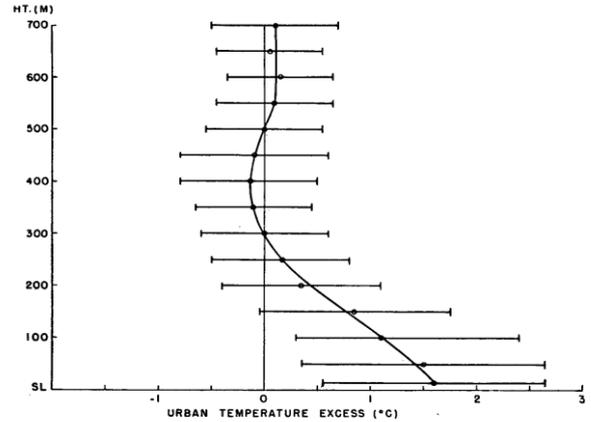


Fig. 7. Height variation of the magnitude of the urban heat island of New York City during the hours near sunrise. Range of plus and minus one standard deviation is also shown.

図3 ニューヨークで観測されたヒートアイランド強度（都市と郊外の気温差）の鉛直分布. ヒートアイランドを初めて3次元的にとらえた有名な観測。(Bornstein, 1968より)

日中の鉛直規模も理論的には都市規模に依存し、大気境界層の厚さ程度（ざっくり言うと1kmくらい）となります。

ヒートアイランドは、地球温暖化に比べて、水平規模はもちろんのこと、鉛直規模もずいぶん小さいことが分かります。この違いは、ヒートアイランドと温暖化の主要なメカニズムの違いに起因しています。温暖化のメカニズムは、基本的に地球大気の長波放射収支で説明できます。温室効果ガスの増加により長波放射に対して大気がより不透明になると、正味の長波放射量が増大し、気温は対流圏全体で上昇します。

ヒートアイランドのメカニズムは、基本的に地表面熱収支式（式1）で説明できます。

$$R_n = H + LE + G \quad (1)$$

都市にビルができることで、アルベドが減少し、地表面が受け取る正味の短波放射量はやや増加します。また、緑地や水面が減るので、正味放射量のうち潜熱として大気に輸送される分 (LE) は少なくなります。一方で、顕熱として大気に輸送される分 (H) や、建物・地中に蓄えられる分 (G) は増加します。

都市化は、さらに、人間活動を通じて顕熱・潜熱（主に顕熱）を余分に排出します。いわゆる人工排熱の増加です。温室効果ガスは長波放射収支の変化を通じて気温を上昇させますが、地表面からの顕熱輸送や人工排熱は大気を直接暖めることで気温を上昇させます。したがって、顕熱輸送量・人工排熱量が増大すると、気温は上昇し、ヒートアイランドが形成されます。日中にビルに蓄えられる熱が増えることもまた、夜間の気温低下の緩和を通じて、夜間のヒートアイランドの形成に貢献します。

図4は、緑地の減少と人工排熱の増加が都市気温に与える影響を3次元気象モデルを用いて世界に先駆けて調査した数値実験の結果です。緑地の減少は日中、人工排熱は夜間のヒートアイランドに対して大きな影響を与えていることが分かります。ただし、都市キャノピーモデルを搭載していなかったため、建物の3次元構造による蓄熱効果や放射冷却緩和効果などは十分に考慮されていませんでした。

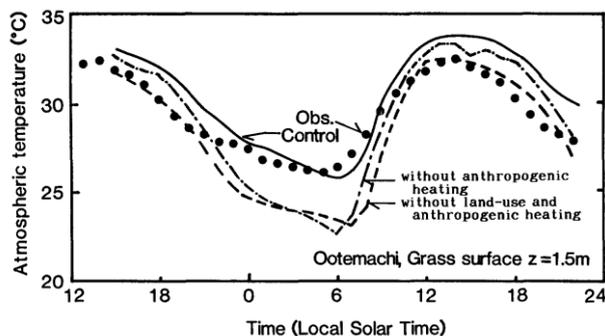


図4 都市気温の日変化. 黒丸が観測、実線がモデルによる計算値. 一点鎖線が人工排熱を無くした場合のモデル結果. 破線が人工排熱と土地利用変化の両方を無くした場合のモデル結果. (Kimura and Takahashi 1991 より)

2000年代になると、都市キャノピーモデルが開発され、建物効果を調査する実験が行われるようになりました。その結果、夜間のヒートアイランドに対して、建物による蓄熱効果、放射冷却緩和効果、人工排熱は同程度に重要であること、それぞれが卓越する時間帯が異なることが明らかとなりました(図5)。さらには、日没後と日の出前のどちらの時間帯でヒートアイランド強度が最大になるのか?なぜ都市によって時間帯が異なるのか?という長年議論されてきた問題にも答えることができました。

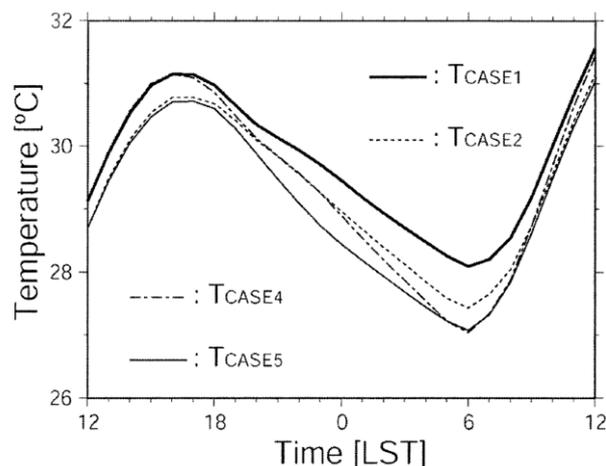


図5 数値モデルによって計算された都市気温. 太実線は基準実験の結果. 点線は人工排熱なし実験、一点鎖線は人工排熱と建物による蓄熱なし実験、細実線は人工排熱と建物による放射冷却緩和効果なし実験の結果. (Kusaka and Kimura, 2004 より)

これまで述べてきた都市の効果、すなわち都市の気温上昇に対する顕熱輸送量・人工排熱量・蓄熱量の増加効果は地面付近に限定されます。なぜならば、都市から大気に輸送・排出される顕熱は、日中、サーマルや乱流拡散によって混合層内全体に広がるものの、積乱雲なしでは1日スケールで自由大気まで輸送される量はそれほど多くないからです。また、夜間は接地逆転層がふたのような役割を果たすため、気温低下に対する緩和効果は接地層内に限定されます。

以上のように、温暖化は放射収支の変化を通じて、地球規模で対流圏全体の気温を上昇させ、ヒートアイランドは熱収支の変化を通じて都市規模で大気境界層内の気温を上昇させます。両者は、気温上昇という現象面では似ていますが、そのメカニズムも空間規模も大きく異なるのです。

ここまで、ヒートアイランドのメカニズムを地表面熱収支の変化という視点で説明してきました。実は、ヒートアイランドには、もう一つ重要なメカニズム「乱流の強化による接地逆転層の破壊」があります。このメカニズムは、基本的に夜間によく当てはまります。晴天日の夜間、郊外では放射冷却により接地逆転層が発達し、地上付近の気温は時間とともに低下していきます。都市の場合、風が建物にあたることで力学的に乱流（機械乱流）が生成され、

その結果、接地逆転層が破壊あるいは弱められ、都市キャノピー層内の地上気温は郊外の気温よりも高くなるというわけです (図 6c)。

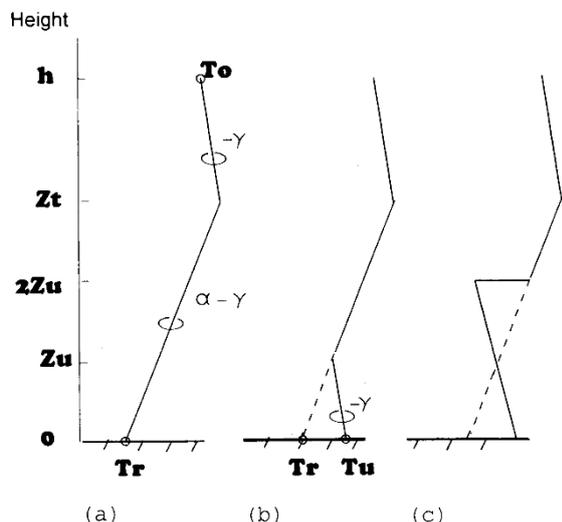


図 6 (a) 夜間気温の鉛直分布の模式図. (b) ヒートアイランドの形成に対する都市表面からの加熱効果と (c) 機械乱流による上空からの加熱効果の模式図. T_r と T_u はそれぞれ郊外と都市の気温. (榎原, 2001 より)

この機械乱流による加熱効果は、長らくの間、賛否両論ありました。しかし、現在では、広く受け入れられています。図 7 は、都市キャノピーモデルを用いて機械乱流による加熱効果を評価した研究成果の一つです。図を見ると、地上から高度 70m くらいまでは都市の方が温位が高いヒートアイランド現象が再現されていること、高度 70~170m では郊外の方が気温が高いクロスオーバー現象が再現されていることが分かります。そして、さらなる解析により、地上付近では暖かい都市表面から顕熱が大気へ輸送され、ヒートアイランド上端では上空から顕熱が輸送されている様子が分かりました (図省略)。夜間の大気は安定なので、上空の高温位が乱流拡散によって都市キャノピー層内に取り込まれていると解釈されています。

では、都市表面からの加熱と上空からの加熱のどちらが夜間のヒートアイランドの主要因でしょうか？もし、機械乱流の効果だけでヒートアイランドが形成されているのであれば、図 6c のようにクロスオーバー層の太実線と点線で囲まれた面積はヒート

アイランド層の面積と同程度になるはずですが。しかし、図 3 をはじめとする様々な観測でも図 7 をはじめとする数値実験でもヒートアイランド層の面積の方が大きいことから、都市表面からの加熱と上空からの加熱の両方が寄与していると言えるでしょう。どちらが主要因かは、都市街区内の建物の高さや材質、人工排熱量などに依存すると考えられます。

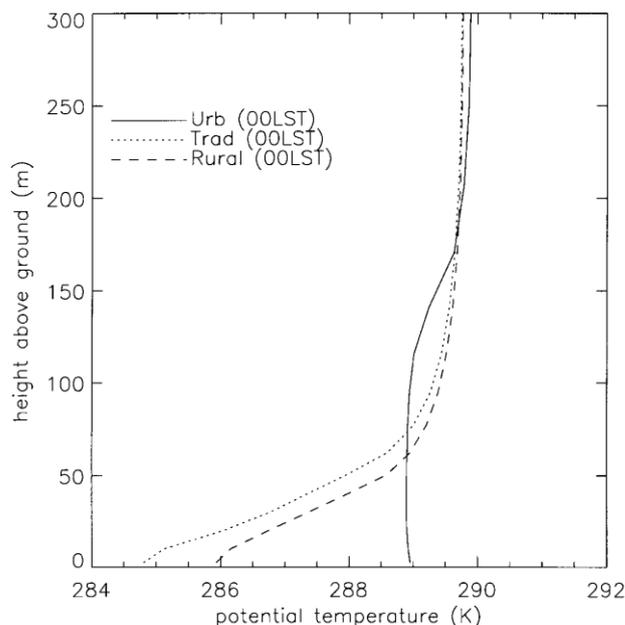


図 7 地上から高度 300m までの温位の鉛直分布. 太実線と破線はそれぞれ都市と郊外の値. 点線は従来モデルの値. (Martilli et al., 2002 より)

4. 近年のヒートアイランド研究

1920 年代に始まったヒートアイランドの移動観測は、1960~1980 年代になると世界各地で行われ、ヒートアイランドの実態が明らかになりました。また、さまざまな要因が提唱されました。1990~2000 年代になると 3 次元気象モデルが活用されはじめ、それまで提唱されてきたヒートアイランドのメカニズムの仮説を数値実験によって検証する研究が行われるようになりました。2010 年代になると、領域気候モデルや全球気候モデルに都市キャノピーモデルが搭載され (例えば, McCarthy et al. 2010, Chen et al. 2011, Oleson et al. 2011, Hamdi et al. 2014)、都市が降水に与える影響や (例えば, Kusaka et al. 2014, 2019, Doan et al. 2021, 2022)、都市気候の将来予測研究 (例えば, Adachi et al. 2012, Kusaka et al. 2012, 2016, Hamdi et al. 2014,

Georgescu et al. 2014, Doan et al. 2018, 2022) が行われるようになりました。同時に、野外実験や領域気候モデル・数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) モデルを用いたヒートアイランドの緩和策の研究も活発に行われるようになりました (例えば, Tsoka et al. 2018, Krayenhoff et al. 2021)。現在、ENVI-met という都市街区内の放射環境・暑熱環境や人が感じる熱ストレスの評価を目的とした CFD モデルが世界中で広く利用されています (Bruse and Fleer 1998, Krayenhoff et al. 2021)。私たちの研究室でも、ENVI-met のような都市街区気象モデル”City-LES”を開発してきました (図 8)。観測データとの比較から、City-LES の精度は ENVI-Met よりもよさそうだと、この感触をつかんでいます。本日は時間がなくて、これについては、また機会があればお話ししたいと思います。

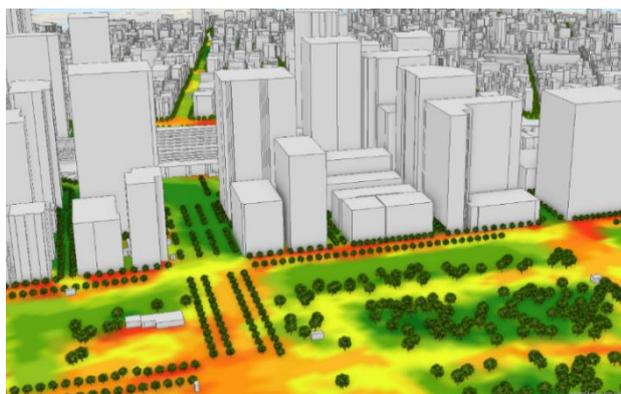


図 8 City-LES で再現された東京駅周辺の気温.

5. ヒートアイランドに関するよくある誤解

これまで、ヒートアイランドの実態と基本メカニズムについて、その歴史を紐解きながらお話ししました。ここからは、ヒートアイランドに関するよくある誤解についてお話ししたいと思います。次の 6 つは、私がよく耳にするヒートアイランドについての誤解です。みなさんも、耳にしたことがあるのではないのでしょうか？なぜ、これらが間違っているのか、みなさん答えられるのでしょうか？

- ① ヒートアイランドは大都市に現れる。
- ② ヒートアイランドは夏の日中に現れる。
- ③ 夏の日中、都市が暑いのはヒートアイランドのせいだ。
- ④ 湾岸の高層ビル群が海風をブロックすること

で、都心の暑さがより増している。

- ⑤ 埼玉県が暑いのは、東京の熱が海風に乗って内陸まで到達しているからだ。埼玉県の暑さは、東京のヒートアイランドのせいである。
- ⑥ 過去 100 年間の東京の気温上昇は地球温暖化のせいである。

①は、観測事実から否定できます。

風の弱い晴天日の夜間であれば、人口 1 万人程度の小さな町でもヒートアイランドは明瞭に現れます (図 9)。それどころか、もっと小さな集落でもヒートアイランドが現れることも確認されています。観測事実なので、否定できません。私たちも、これを支持する観測結果を何度も得ています。筑波大学の授業の一環として、毎年冬になるとキャンパス内の気温を観測してきました。晴れた日の夜に観測すると、建物が多い地区 (講義棟、学生宿舎) では周囲より明らかに気温が高く観測されました (図 10)。

②ヒートアイランドは寒候期の夜間に明瞭になります。ヒートアイランドの出現季節と時刻について、一点気を付けてほしいことがあります。最近、人工衛星によって観測された地表面温度データを用いて、ヒートアイランドが解析されるようになりました。地表面温度で見た場合、日射が強い夏の昼にヒートアイランド (都市と郊外の地表面温度差) が強く現れます。論文によっては、気温と地表面温度を混同して議論しているものもあるので要注意です。

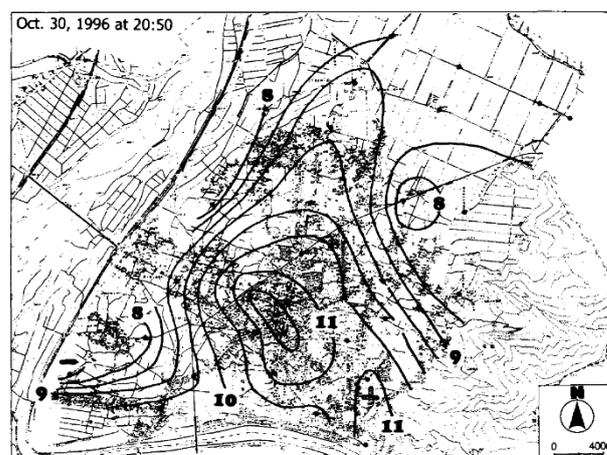


図 9 1996 年 10 月 30 日 20 時 50 分に人口 1 万 2 千人の長野県小布施で観測されたヒートアイランド. 等値線と数値は地上気温. (榊原, 1999 より).

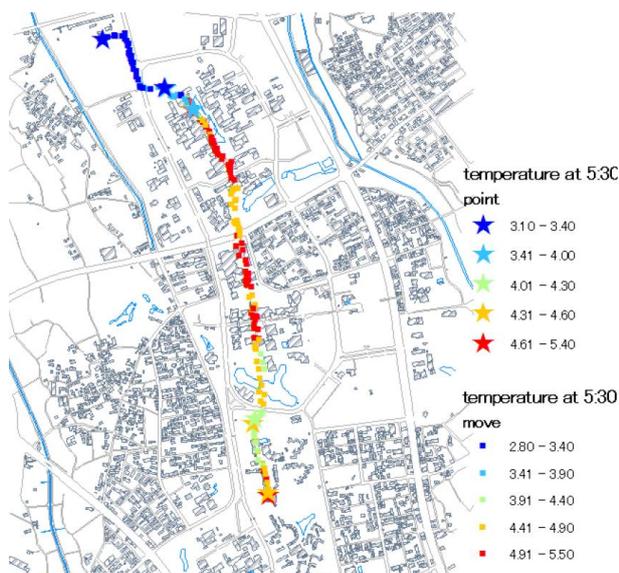


図10 筑波大学キャンパス内で観測された冬の早朝の気温分布. 南北3kmの道上の気温分布.

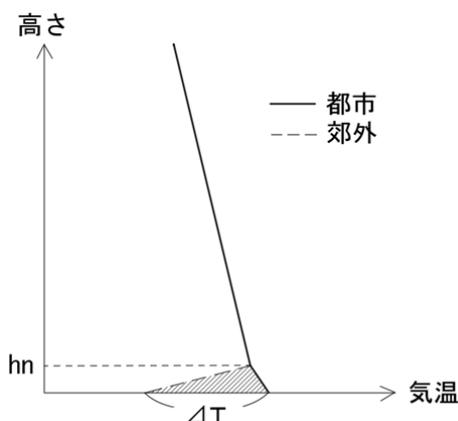
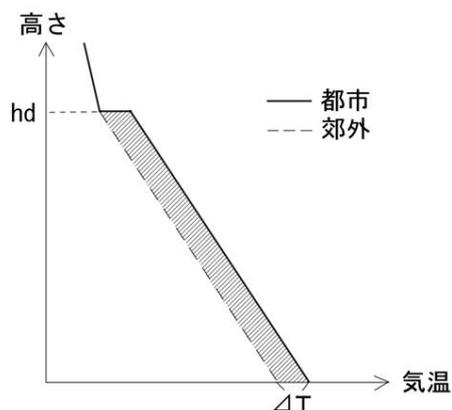


図11 日中と夜間の気温鉛直分布の模式図. 実線は都市、破線は郊外. 斜線部分は都市表面からの熱の輸送. 実際は都市の方が混合層高度 h_d は高いがここでは簡単化のため同じとしている.

③夏の日中に都心に行くと暑く感じます。

しかし、これは必ずしも気温が高いせいではありません。気温が高く、湿度が高く、日差しが強く、風が弱い時に人は暑く感じます。人が感じる暑さに関係する気温、湿度、放射、風速の4つの気象要素は、温熱四要素と呼ばれています。環境省や気象庁が出している暑さ指数というのは、湿球黒球温度 (Wet-Bulb Globe Temperature, WBGT) のことで、温熱四要素を考慮した指数となっています。具体的には、野外のWBGTは式(2)で計算されます。

$$WBGT = 0.1T_a + 0.7T_w + 0.2T_g \quad (2)$$

式(2)の T_a , T_w , T_g はそれぞれ乾球温度 (気温)、湿球温度、黒球温度を意味します。黒球温度とは、黒球と呼ばれる黒色に塗装された銅製の球の中の温度です (図12)。風の影響はWBGTに入っていないように見えますが、同じ放射でも風が強いと黒球温度が下がるため、一応間接的には入っています。ただし、国際的に広く利用されている Universal Thermal Climate Index (UTCI) に比べると風の効果をきちんと考慮されていないという批判もあります。

夏の日中に都市の街区内で暑く感じるのは、放射と風の影響、つまり、黒球温度が高いためだと考えられています。夏の日中、道路面温度は50度にも達します。建物壁面も樹木などより高温になります。この熱い道路・壁面からの長波放射や、ビル壁・道路で反射された日射が人体に到達します。また、都市街区内は風も弱くなります。



図12 黒球温度観測の様子

④これも正しくはありません。

海風はビル高さよりも厚いので、ビルを吹き越えられます。また、ビル間を通り抜けることもできます。

もし仮に湾岸に高層ビルが壁のように建ち並んでいたとしても、それが風に与える影響（風速低減）の範囲は、ビル高さの5~10倍くらいです。それより風下では、海風を感じる事ができるでしょう。

⑤埼玉は東京よりも内陸にあります。

一般的に、海風が埼玉に到達する時刻は東京よりも数時間遅く、そのため埼玉ではしばしば最高気温起時の後に海風が到達します。海風さん、埼玉に来るのが遅すぎですよ、という訳です。また、たとえ海風が最高気温起時前に到達したとしても、その冷却効果は東京ほど大きくはありません。東京では冷涼だった海風が埼玉に到達するころには、都市表面からの加熱により少し暖められているのです。東京の暖かい空気があたかも汚染物質のように運ばれているというイメージと現実とは異なるのです。

⑥それもありますがヒートアイランドも

近藤純正先生は、大変丁寧な解析により、1898-2021年の100年あたりの年平均気温上昇に対する温暖化の効果を約0.89℃と算出しています（近藤純正ホームページより）。東京の気温上昇率はこの期間で1.9℃程度なので、ヒートアイランドの方が影響はやや大きいと言えそうです。ただし、今後50年で見た場合は、都市化の影響はそれほど大きくなりません。温暖化の影響の方が大きくなると予測されています（例えば、Adachi et al. 2012, Kusaka et al. 2012, 2016）。

6. ヒートアイランド対策と暑さ対策の違い

これまで、ヒートアイランドの話をしてきました。ここからは、その対策の話をしてみたいと思います。ヒートアイランド対策として有名なものは、次の5つです。

- ・緑化の促進（屋上・壁面緑化、公園の開発）
- ・人工排熱の軽減（省エネ）
- ・アルベドの増加（クールルーフ、遮熱性舗装）
- ・風の道の確保（再開発時に海風の通り道を作る）
- ・打ち水の奨励

このうち、打ち水については時間的にも空間的にも非常に限定的で、最大の効果は風鈴効果（気分として涼しく感じる）と考える研究者も多いことも述べておきたいと思います。それ以外の対策は、ヒートアイランドの要因・メカニズムを考えると、納得で

きます。しかしながら、いかなる対策を施しても、大きな都市を全体的に冷やすことは難しいです。

そこで、最近では、ヒートアイランド緩和策よりも、人が感じる熱ストレスの緩和策を重視するようになってきました。後者は、温暖化に対する適応策にも通じます。ヒートアイランド緩和策と熱ストレス緩和策は、どう違うのでしょうか？ヒートアイランドの緩和策を実行すれば、基本的に気温を下げる事ができるはずなので、人の熱ストレスも緩和されるはずと考えてもよさそうです。しかし、なかにはそうとも言えないものもあります。例えば、屋上緑化やクールルーフを施しても、地上を歩いている人の熱環境はそれほど改善されません。遮熱性舗装の場合は、道路や歩道の表面温度を下げることはできますが、アルベドが増加するため、人体に到達する放射量はむしろ増加してしまい、熱ストレスはむしろ高くなってしまいます（例えば、西岡ほか 2006, 赤川ほか 2008, 長野ほか 2020）。道路からの長波放射量は減少しますが、短波放射量がそれ以上に増えるからです（図省略、当日紹介します）。

一方で、通勤・通学路などへの街路樹の設置や、人が集まる場所でのミスト散布などは、影響範囲は限定されるが、そこにいる人にとっては非常に効果的な熱ストレス緩和策になります。木陰のWBGTは日向に比べて約2℃低いという観測結果が得られています（図13）。これは、熱中症リスクを危険から嚴重警戒に、嚴重警戒から警戒にと、1ランク下げを意味します。ミストの場合、風速1m/s以下の弱風時には、WBGTを1℃程度下げることができますし、ミストノズルを連続して並べることで、もっと下げることも可能です。ただし、風が2m/s以上吹いている状況では、単一のミストの効果はほぼなくなるため、ミストが移流しても良いように連続して並べて噴霧する、横から噴霧するなどの工夫が必要となります。

これらの対策が施されていない場所に徒歩で行く場合には、個人ができる暑さ対策をすることも重要です。熱中症予防として推奨されている水を飲むことはもちろんのこと、日傘をさすことも効果があります。日傘の効果は、街路樹の木陰ほどではありませんが、WBGTを1℃程度下げることができます（図13）。

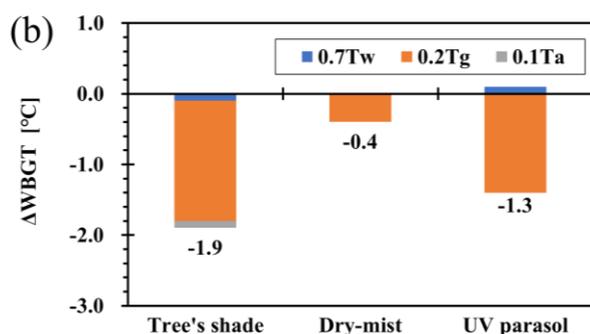


図 1 3 街路樹、ドライミスト、日傘による WBGT 低減効果. Tw, Tg, Ta はそれぞれ湿球温度、黒球温度、乾球温度を意味する. (Kusaka et al., 2022a より)

学校の校庭や人が集まる開けた場所の場合は、藤棚のような日除けも効果的です。藤棚は WBGT を 2℃程度下げることができます。学校の運動会や学園祭などでよく目にするテントの緩和効果が約 1℃なので、藤棚はテントより高い効果が期待できます (図 14)。テントの効果が低いのは、テントの方が日射をより多く透過させてしまい、さらには自身が暖かくなってしまふからです (図 15)。藤棚のような植物の手入れが難しい場合は、京都大学の酒井敏先生が考案したフラクタル日除け (Sakai et al. 2012) のような樹木を模した人工的な日除けを設置するのも良いでしょう。

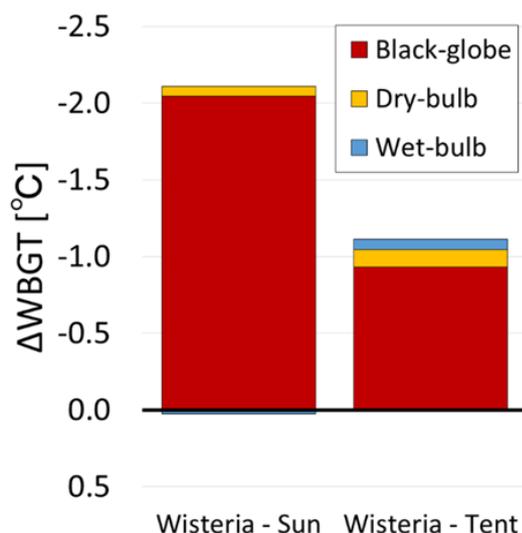


図 1 4 藤棚(Wisteria)とテントの WBGT 低減効果. (Kusaka et al., 2022b より)

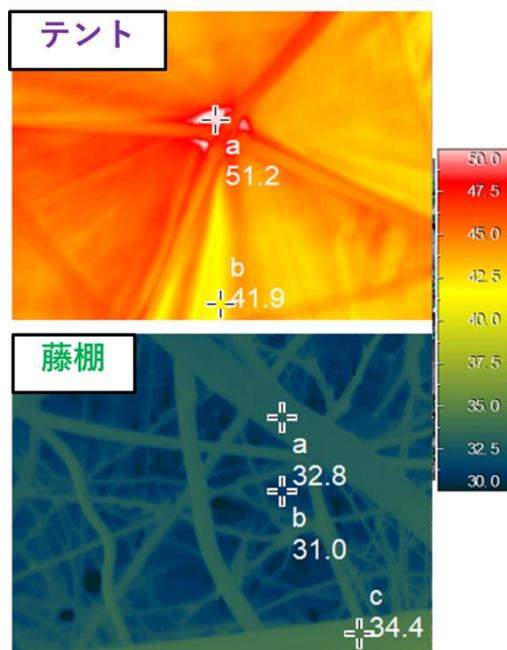


図 1 5 熱画像カメラで下から撮影したテントと藤棚の表面温度. (Kusaka et al., 2022b より)

7. おわりに

暑い日に屋外を歩くと、人は熱ストレスを強く感じ、その結果、熱中症のリスクも高まります。たとえ、熱中症にならなくても、暑い日の屋外歩行は、その後の室内での作業効率や学習効率を悪化させる可能性があります。私たちの研究室の学生が調べたところ、涼しい屋内で行う簡単な二桁の足し算の正答率が、暑い日にわずか 15 分間屋外を歩くだけで、屋外歩行前に比べて有意に低下することを確かめられました (Asano et al. 2022)。この低下率は、睡眠時間が短い人ほど大きくなるという傾向がありました。また、この正答率低下の解消には、50 分かかることも分かりました (図省略、当日紹介します)。一般的に、簡単な計算よりも複雑な計算の方が環境変化の影響を受けやすいと言われています。仕事でミスしないためにも、勉強を効率よく行うためにも、屋外を歩く時は、体力に自信がある男性でもあっても木陰を歩く、日傘をさすなど、暑さ対策を積極的に行った方がよさそうです。私は、夏に屋外をある時はいつでも、それがたとえ筑波大学の休み時間 (15 分間) という短い時間でも、日傘をさすようにしています。みなさんも、ぜひ日傘を使ってみてください。

参考文献

- Adachi, S. A., Kimura, F., Kusaka, H., Inoue, T., Ueda, H., 2012: Comparison of the impact of global climate changes and urbanization on summertime future climate in the Tokyo metropolitan area. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **51**, 1441-1454.
- Asano, Y., Nakamura, Y., Kusaka, H., Suzuki-Parker, A., Aiba, S., 2022: Effect of walking in heat-stressful outdoor environments in an urban setting on cognitive performance indoors. *Building and Environment*, **213**, 108893.
- Bornstein, R. D., 1968: Observations of the urban heat island effect in New York City. *Journal of Applied Meteorology*, **7**, 575-582.
- Bruse, M., Fleer, H., 1998: Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, **13**, 373-384.
- Chandler, T.J., 1965: The Climate of London. Hutchinson & Co., Ltd: London.
- Doan, Q. V., Kusaka, H., 2018: Projections of urban climate in the 2050s in a fast-growing city in Southeast Asia: The greater Ho Chi Minh City metropolitan area, Vietnam. *International Journal of Climatology*, **38**, 4155-4171.
- Doan, Q. V., Dipankar, A., Simon-Moral, A., Sanchez, C., Prasanna, V., Roth, M., Huang, X.-Y., 2021: Urban-induced modifications to the diurnal cycle of rainfall over a tropical city. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, **147**, 1189-1201.
- Doan, Q. V., Chen, F., Kusaka, H., Dipankar, A., Khan, A., Hamdi, R., Roth, M., Niyogi, D., 2022: Increased risk of extreme precipitation over an urban agglomeration with future global warming. *Earth's Future*, **10**, e2021EF002563.
- Duckworth, F. A. and Sandberg, J. S., 1954: The effect on cities upon horizontal and vertical temperature gradients. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **35**, 198-207.
- Georgescu, M., Morefield, F., Bierwagen, B. G., Weaver, C. P., 2014: Urban adaptation can roll back warming of emerging megapolitan regions. *PNAS*, **111**, 2909-2914.
- Hamdi, R., Van de Vyver, H., Troch, R. D., Termonia, P., 2014: Assessment of three dynamical urban climate downscaling methods: Brussels' s future urban heat island under an A1B emission scenario. *International Journal of Climatology*, **34**, 978-999.
- International Association for Urban Climate (IAUC), 2007: The Climate of London. https://urban-climate.org/documents/LukeHoward_Climate-of-London-VI.pdf
- Kimura, F. and Takahashi, S., 1991: The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo Metropolitan area: a numerical experiment. *Atmospheric Environment, Ser. B*, **25**, 155-164.
- Krayenhoff, E. S., Broadbent, A. M., Zhao, L., Georgescu, M., Middel, A., Voogt, J. A., Martilli, A., Sailor, D. J., Erell, E., 2021: Cooling hot cities - a systematic and critical review of the numerical modelling literature. *Environmental Research Letters*, **16**, 053007.
- Kusaka, H. and Kimura, F., 2004: Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model. *Journal of Applied Meteorology*, **43**, 1899-1910.
- Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa, and F. Kimura, 2001: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models. *Boundary-Layer Meteorology*, **101**, 329-358.
- Kusaka, H., M. Hara, and Y. Takane, 2012: Urban climate projection by the WRF model at 3-km horizontal grid increment: Dynamical downscaling and predicting heat stress in the 2070' s August for Tokyo, Osaka, and Nagoya metropolises. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **90B**, 47-63.

- Kusaka, H., Nakata, K., Suzuki-Parker, A., Takane, Y. and Furuhashi, N., 2014: Mechanism of Precipitation Increase with Urbanization in Tokyo as Revealed by Ensemble Climate Simulations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **53**, 824-839.
- Kusaka, H., Suzuki-Parker, A., Aoyagi, T., Adachi, S. A., Yamagata, Y., 2016: Assessment of RCM and urban scenarios uncertainties in the climate projections for August in the 2050s in Tokyo. *Climatic Change*, **137**, 427-438.
- Kusaka, H., Nishi, A., Mizunari, M., Yokoyama, H., 2019: Urban Impacts on the Spatiotemporal Pattern of Short-Duration Convective Precipitation in a Coastal City Adjacent to a Mountain range. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **145**, 2237-2254.
- Kusaka, H., Nakamura, Y., Asano, Y., 2022a: UV parasol, dry-mist spraying, and street trees as tools for heat stress mitigation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. (in press)
- Kusaka, H., Asano, Y., Kimura, R. 2022b: Wisteria trellises and tens as tools for improved thermal comfort and heat stress mitigation: Meteorological, physiological, and psychological analyses considering the relaxation effect of greenery. *Meteorological Applications*, **29**, e2046.
- Martilli, A., Clappier, A., Rotach, M. W., 2002: An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorology*, **104**, 261-304.
- McCarthy, M. P., Best, M. J., Betts, R. A., 2010: Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophysical Research Letters*, **37**.
- Oleson, K. W., Bonan, G. B., Jackson, F. T., 2011: An examination of urban heat island characteristics in a global climate model. *International Journal of Climatology*, **31**, 1848-1865.
- Tsoka, S., Tsikaloudai, A., Theodosiou, T., 2018: Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications - a review. *Sustainable Cities and Society*, **43**, 55-76.
- 赤川宏幸, 竹林英樹, 森山正和, 2008: 湿潤舗装と遮熱舗装上の温熱環境改善効果に関する実験的研究. 日本建築学会環境系論文集, **73**, 85-91.
- 榊原保志, 2001: 都市表面からの顕熱供給と都市大気の混合が夜間ヒートアイランド形成に与える影響の比較. 天気, **48**, 306-311.
- 長野和雄, 志村恭子, 三嶋真名美, 井上司, 桐山和也, 須藤美音, 堀越哲美, 2020: 各種アスファルト道路舗装材が歩行者の熱ストレスに及ぼす影響. 日本生気象学会誌, **57**, 81-94.
- 西岡真稔, 鍋島美奈子, 若間賢志, 上田淳也, 2006: 高反射型アスファルト舗装の表面温度低減効果と路上の熱環境特性. 日本ヒートアイランド学会誌, **1**, 46-52.
- 福井栄一郎・和田憲夫, 1941: 本邦の大都市における気温分布. 地理学評論, **17**, 354-372.
- 福井栄一郎・矢沢大二, 1957: 最近における都市気候研究の展望. 地理学評論, **30**, 36-54.