

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

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****

(*現・防災科学技術研究所、**千葉大学、***国立環境研究所、****東京大学)

要 旨

山手線の内側の大半をカバーする領域について、上向き赤外放射量の航空機計測を実施した。計測実施日時は2013年8月19日、2014年8月19日、2015年8月19日のいずれも12~13時台で、気象条件は類似していた。その計測データ及びGIS (Geographic Information System) データの解析の結果、夏季晴天日真昼の赤外放射量は、住宅密集地域で相対的に多く、都心のオフィスビル・商業施設の多い地域で少ない傾向にあることが示された。近年の施策が都心のオフィス街における熱放射環境の改善に寄与したことが示唆される一方で、住宅密集地域における暑熱環境の改善が今後の課題であるとみられる。

キーワード：赤外放射、航空機計測、土地利用、夏季晴天日、真昼

1 はじめに

2015年における世界の年平均気温の20世紀平均基準に対する偏差は+0.78℃で、1891年の統計開始以降、最も高い値となった。また、2015年の日本の年平均気温の20世紀平均基準に対する偏差は+1.30℃で、1898年の統計開始以降、4番目に高い値となった¹⁾。これらは、主に温室効果ガスの増加に伴う「地球温暖化」に起因する。この地球温暖化に加え、郊外に比べて都市部ほど気温が高くなる「ヒートアイランド現象」の影響により、東京都心においては、年平均気温の上昇率は、100年あたり約3.2℃に達している。一方、都市化の影響が小さいとみられる全国15地点で平均した上昇率は約1.5℃である²⁾。このことから、都心では、現在までのところ、ヒートアイランドによる気温上昇が地球温暖化による上昇を上回っているとみられる。また、季節別に見ると、冬季の日最低気温が最も上昇率が大きく、100年あたり約6.0℃である。これに対し、夏季の日最低気温の気温上昇率は100年あたり約2.8℃にとどまっている。さらに、夏の日最高気温にいたっては100年あたり約1.1℃であり、全ての季節における日最高気温・日最低気温の上昇率の中で最も小さい値となっている²⁾。

それにも関わらず、近年の夏季の暑さは、主に熱中症という形で都民に対して深刻な影響を及ぼしており、そ

の影響を軽減することが都における喫緊の課題の一つである。2013~2015年の夏季の熱中症による死亡者数は、東京23区だけで254人にのぼる³⁾。また、熱中症搬送者数は、2010年以降急激に増加しており、都区部だけでも過去6年間において、毎年2,000人を超えている状況にある。これらのことから、熱中症被害がいかに深刻化しているかがわかる。

熱中症被害の深刻化には、前述の地球温暖化とヒートアイランドに伴う顕著な暑熱化が大きく寄与していると考えられる。実際、東京都心における年間の猛暑日数(日最高気温35℃以上の日数)は、2010年以降はほぼ毎年5日以上となっており、2010年、2013年、2015年には10日を超えた⁴⁾。また、近年の急速な高齢化に加え、熱中症の疑いがある場合に救急車を呼ぶことが重要であるという認識が都民の間に広まったとみられることも、搬送者数の増加の要因であろう。

すでに、東京都では、暑熱対策に取り組むため、2002年に「東京都ヒートアイランド対策推進会議」を設置し、2003年に「ヒートアイランド対策取組方針」を策定した⁵⁾。また、2005年には、ヒートアイランド現象の原因である人工排熱や地表面被覆の状況等が大气に与える影響(熱負荷)を示した23区の「熱環境マップ」を作成し、これに基づき、「ヒートアイランド対策推進エリ

ア」として区部4箇所（「都心」、「新宿」、「品川駅周辺」、「大崎・目黒」の各エリア）を設定した⁶⁾。ヒートアイランド対策推進エリアでは、都は、重点的に、国・区・民間事業者と連携した様々なヒートアイランドに関する施策を進めており、例えば、道路の保水性舗装、遮熱性舗装、民間施設の省エネ化を推進する建築物環境計画書制度やキャップアンドトレード制度、街路樹や護岸緑化、民間施設や公共施設の緑化、校庭芝生化等に、中長期的な視野で取り組んでいる⁷⁾。しかしながら、前述のように熱中症患者数は増加傾向にあるなど、都の暑熱対策は現状では充分とは言い難い。

さらに、IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）第5次評価報告書によると、現状以上の地球温暖化対策をとらなかった場合、都心における今世紀末の年間真夏日日数は、1984～2004年平均（約50日）から60日近く増加し、1年の約3割が真夏日になることが予測される⁸⁾。これらのことから、ヒートアイランドによる気温上昇を緩和するか、あるいはそれに適応する施策を実施し、熱ストレスの軽減をはかることが、引き続き都にとっての急務の課題である。

このような経緯から、本研究では、今後の都におけるさらなる暑熱対策に資することを目的として、都内の熱放射環境の実態を把握するための調査を行った。具体的には、夏季晴天日を対象とし、2013年の都心エリアとその周辺⁹⁾、2014年の新宿エリアとその周辺¹⁰⁾に引き続き、2015年には大崎・目黒エリア及び品川駅周辺エリアに加えて大森・大井・五反田・芝浦・六本木・赤坂・永田町・表参道・青山・恵比寿・麻布・白金・渋谷といった比較的広い範囲について、航空機を使用して、地表から上向きに射出される赤外放射量の計測を実施した。また、そのデータの解析と可視化を行うことで、ヒートアイランド対策効果の検証や今後対策が必要とみられる箇所の抽出を行った。

2 調査方法

ロビンソン R22 ヘリコプターに、日本アビオニクス社製サーモカメラ「TS7302」を搭載して、上向き赤外放射量の計測を実施した。搭載したサーモカメラの測定波長域は8～14 μm で、測定精度は $\pm 2\%$ である。8～14 μm は熱赤外の波長域で、この波長の電磁波は大気中の水蒸気等によって減衰されにくいという特性がある。

ヘリコプターの飛行高度は、計測範囲の大半において2,000フィート（約610m）で、大都市上空としては低高度であるといえる。また、それにより得られるデータの空間解像度は約2mであり、低高度からの撮影であるからこそ実現可能な高い空間解像度である。これにより、局所的な暑熱対策に貢献する基礎データを、広い範囲の地域について、空間的に詳細に取得することができる。ただし、航空管制指示による影響を受けた大森・大井・戸越・五反田・大崎・品川・芝浦・白金付近については、飛行高度が4,000フィート（約1,220m）であり、データの空間解像度は約4mである。

計測データについては、GCP（Ground Control Point）技法をもとにオルソ補正[†]を施し、緯度経度情報を付与することで地理情報化した。また、本稿では、相対的評価が主であることから、計測した赤外放射量について、大気減衰の補正は行わなかった。なお、赤外放射量は、赤外線を放射する物体の表面温度の4乗に比例する（シュテファン・ボルツマンの法則）。

表1に示すように、ヘリコプターによる赤外放射量計測は2013年、2014年、2015年のいずれも8月19日に実施した。各日も夏季晴天日となり、都心における13時の気温は31.3～33.7 $^{\circ}\text{C}$ 、全日射量は3.01～3.24MJ/m²、相対湿度は54～56%であり、また、都区部においては南～南東方向からの海風が卓越するなど、類似した気象条件下のもと、計測を実施することができた。

計測はともに8月19日の12～13時台に実施したため、計測実施時において太陽高度・方位角はほぼ同じであり、2013年8月19日から2015年8月19日の間に形状変化のない地物の日陰の方向と長さはほぼ同じであるとみなすことができる。よって、各日の計測データを相互比較する際に、日陰の影響はほぼ無視できるといえる。

3 結果と考察

本研究では、前述のように外的な要素も含めて計測

[†]オルソ補正：航空機搭載サーモカメラによる空撮では、カメラレンズを中心にした投影となるため、例えばビル等の高い建物の表面から射出される赤外放射の計測値の水平分布に空間的な誤差が生じ、誤差は映像の中心から外へ向かうに従って大きくなる。それを正射投影（位置関係を正確に投影すること）によって修正すること。

表 1 航空機による赤外放射量計測の実施日における東京都心の 13 時の気象状況. 気象庁公開データより作成.

航空機計測年月日	気温 ℃	全天日射量 MJ/m ²	相対湿度 %
2013年8月19日	32.9	3.17	56
2014年8月19日	33.7	3.24	54
2015年8月19日	31.3	3.01	54

条件を揃えたうえで、各日の上向き赤外放射量計測結果を正規化（標準化）し、山手線の内側の大半をカバーする範囲の赤外放射強度の合成図を作成した。なお、正規化は次の式により行った：

$$\frac{(x_i - \bar{x})}{SD_x} \quad (1)$$

ここで、 x_i は各緯度経度における赤外放射量、 \bar{x} は各計測範囲内における赤外放射量平均値、 SD_x は各計測範囲における x の標準偏差である。

作成した合成図を図 1 として示した。なお、この図において、浅草・上野付近（「上野駅」という表記を含む点線枠内）の値は、国立環境研究所が実施した計測データにもとづくものである。

図 1 の上半分に着目すると、大まかに、新宿駅の北側に当たる地域（**A**で示した付近）において特に赤外放射量が多く、それと比較して、例えば、**B**・**C**・**D**で示した付近では赤外放射量が相対的に少ないことが分かる。両者の差を絶対値で示すと、平均で約 22W/m²である（図省略）。

図 2 に、図 1 の「BOX03」・「BOX26」と表記した各ボックス内における、2011 年の建物用途（建物現況）割合を、それぞれ示した。これを見ると、エリア**A**に近い「BOX03」においては、独立住宅の割合が最も多く、集合住宅と併せれば、その範囲内における全建物用途の 73%を占める。つまり、この地域はいわゆる住宅密集地域であり、東京都により、「木造住宅密集地域（木密地域）」に指定されている。一方、エリ

ア**D**付近の「BOX26」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 74%を占める。

これらのことから、夏季晴天日の真昼の上向き赤外放射量は、住宅密集地域で多く、オフィスビル・商業施設の多い地域で少ない傾向にあることがわかる。それをわかりやすく示したのが図 3 である。この図は、図 1 の各ボックスに沿った正規化赤外放射量の断面で、各ボックスの範囲内で平均した値をプロットしグラフ化したものである。図 3 を見ると、真昼の赤外放射量は、西側の住宅密集地域（エリア**A**）において最も多く、東側のオフィスビルや商業施設の多い地域では相対的に少ないことが明らかである（エリア**B**・**D**）。また、緑地やお堀が広がる皇居付近では赤外放射量が最も少ない（エリア**C**）。

住宅密集地域で上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、温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、ならびに、その影響により昼間において主に住宅の屋根面からの放射が多いことに起因するとみられる。例えば、木造住宅等のストレート屋根の熱容量は他の材質と比べて小さく、昼間の日射によって昇温しやすいと考えられる。住宅の屋根面が昇温しやすいことは、シミュレーション等でも示されている（例：エーアンドエー株式会社 Web ページ：<http://www.aanda.co.jp/products/ThermoRender/Consulting.html>）。結果として、前述のシュテファン・ボルツマンの法則から、高温になった屋根面からの赤外放射量は多くなる。ただし、先行研

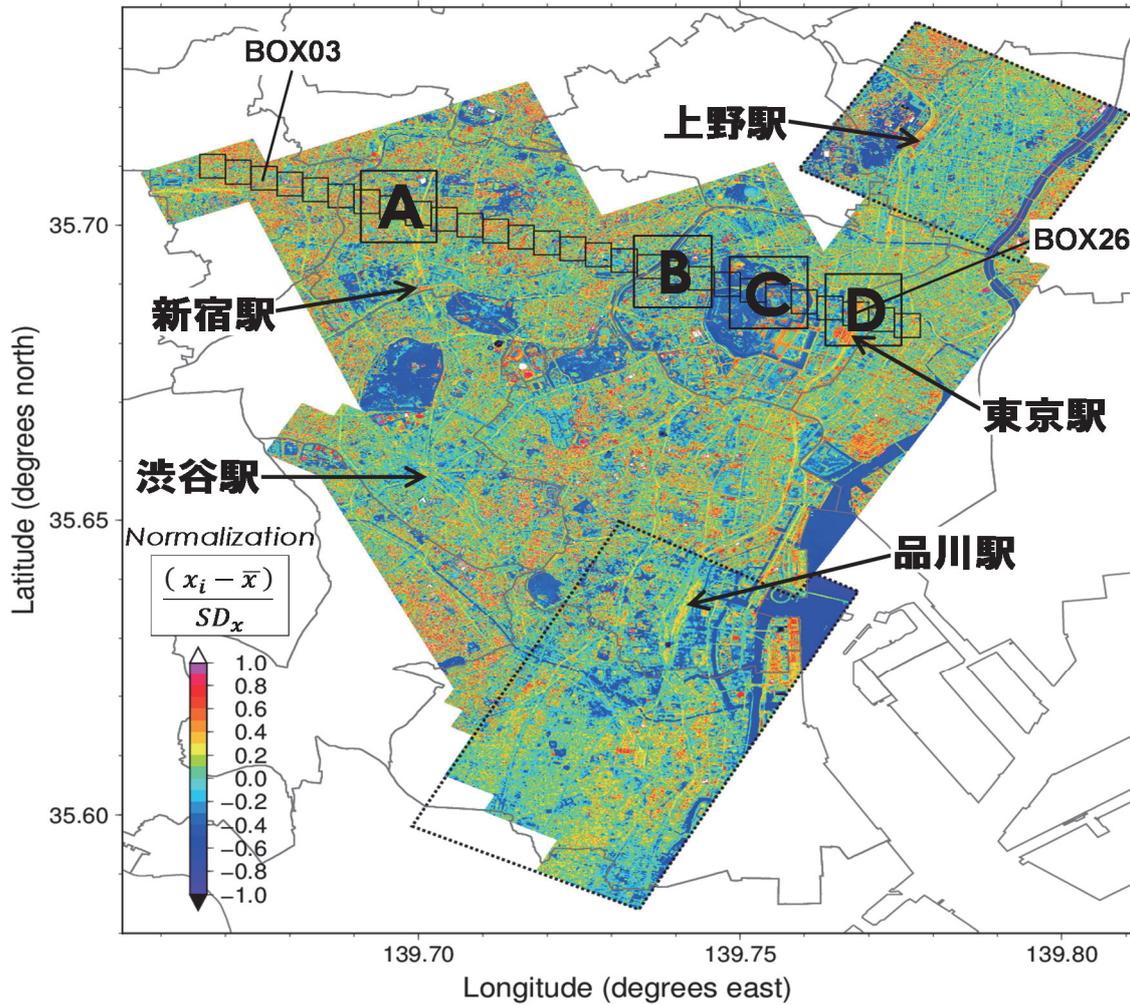


図1 真昼における上向き赤外放射量計測結果の合成図。2013～2015年のいずれも8月19日に計測した結果を正規化。点線枠内のみ13時台の計測結果，その他は12時台の計測結果。品川駅含む点線枠内のみ4m，その他は2m解像度。点線枠内の標準偏差については他の範囲の値との相違が大きくなるよう調整。「BOX03」・「BOX26」は図2に示した2つの円グラフに対応。それらを含む28個のボックスとそのライン上のA・B・C・Dの表記は図3に対応。

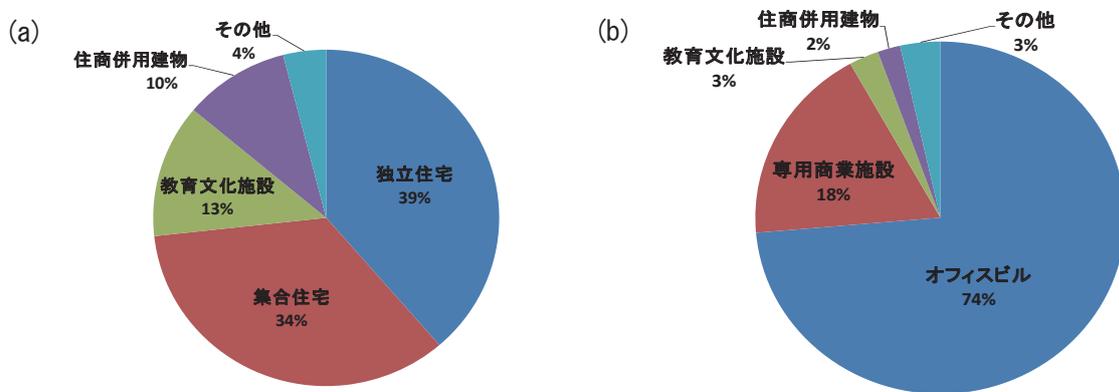


図2 (a)図1の「BOX03」と(b)「BOX26」における建物用途割合(2011年)。東京都都市整備局GIS(Geographic Information System) データ使用。

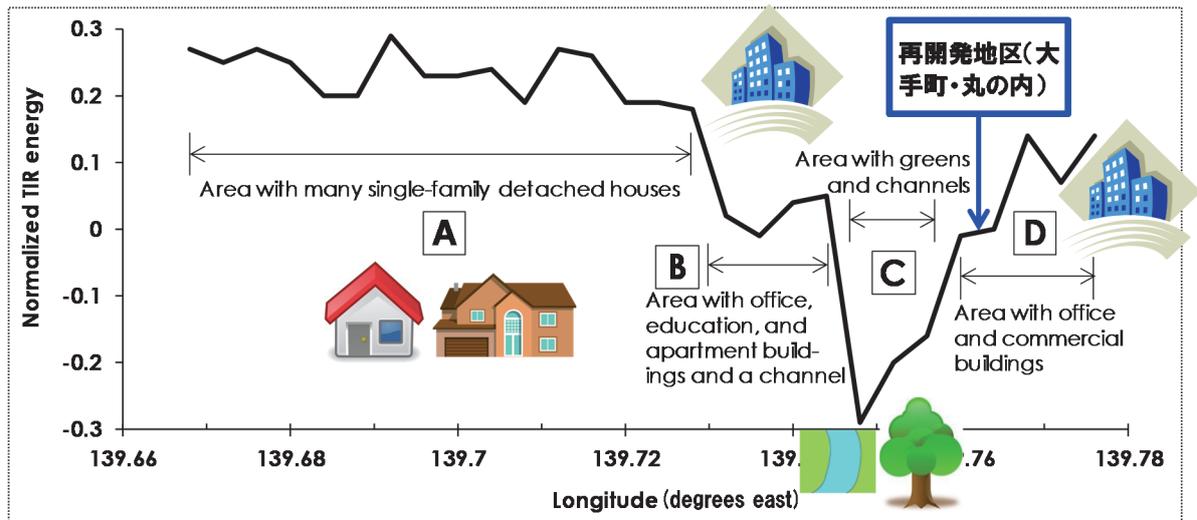


図3 真昼における正規化した赤外放射量の西北西—東南東断面(図1の各ボックスに沿った断面; 図中のA・B・C・Dは図1におけるA・B・C・Dに対応)¹¹⁾。

究により、住宅密集地では、夜と昼の表面温度差が大きく、夜は他の土地利用の地域と同程度かそれ以下まで、地表面温度(赤外放射量)が減少することがわかっている¹²⁾。

図3においても一つ注目されることは、オフィスビル・商業施設の多い地域(エリアD)の中でも、再開発地区(大手町・丸の内地区)では、赤外放射量がより少ないことである。図4は、東京駅周辺における2013年8月19日と2007年8月7日の真昼の赤外放射量の差を示したものである¹¹⁾。猛暑が続いた2013年の方が全体的に放射量が多い中で、大手町・丸の内や御茶ノ水といった近年大規模に再開発された地区では、逆に放射量の減少が目立っている。これは、前述のように都の建築物環境計画書制度や都市開発諸制度により、近年、公開空地の設定とそこへの緑地や水面の導入をはじめ(図5)、保水性被覆化、高反射率被覆等の推進がはかられ、そうした行政の取り組みが、結果的に熱環境の改善に対し一定の効果をあげていることを示しているといえよう。

その一方で、今後は住宅密集地における熱環境の改善が課題であるといえる。そのために、まずは地上気象観測により住宅密集地における熱環境の実態を詳細に把握することが重要であろう。

4 まとめ

地球温暖化の進行とヒートアイランド現象に伴う

東京の暑熱化は、主に夏季の熱中症という形で都民に対して深刻な影響を及ぼし始めており、暑熱環境を改善し、熱ストレスを軽減するためのさらなる施策が必要である。

本研究では、都における暑熱対策に資することを目的として、山手線の内側の大半をカバーする範囲の上向き赤外放射量の航空機計測を実施した。計測は、類似した気象条件のもと、2013年8月19日、2014年8月19日、2015年8月19日の、いずれも12~13時台に、計測高度約610mで実施された。

その計測データ及びGISデータの解析の結果、夏季晴天日真昼の赤外放射量は、住宅密集地域(木密地域)で相対的に多く、都心のオフィスビル・商業施設の多い地域で少ない傾向にあることがわかった。

また、過去の計測データを用いた解析を行ったところ、都心のオフィスビル・商業施設の多い地域で夏季晴天日真昼の赤外放射量が少ないことの要因は、再開発に伴う公開空地の設定とそこへの緑地・水面の導入等にあることが示され、近年の都の施策が熱環境の改善に対して一定の効果をあげているとみられることが明らかになった。

一方、本研究結果から、住宅密集地における熱環境の実態把握とその改善が、今後の重要課題の一つであることが示唆された。

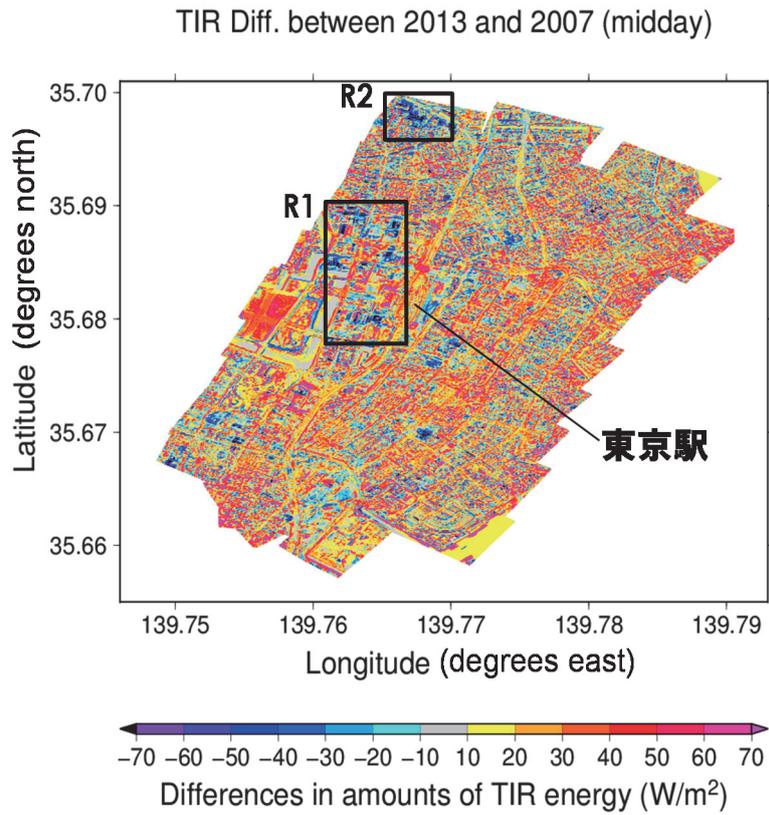


図4 ヘリコプターから計測された東京駅周辺地域の上向き赤外放射量 (W/m²) の2013年8月19日と2007年8月7日の差分 (両日も12時台に計測)¹¹⁾。

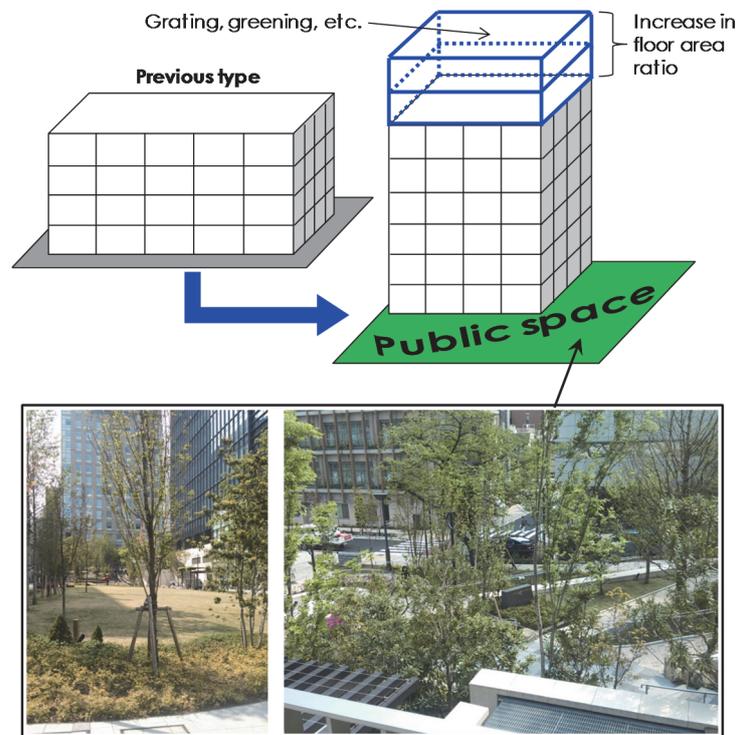


図5 公開空地の設定とそこへの緑地等の導入を示す概念図¹¹⁾。

参考文献

- 1) 気象庁：世界の年平均気温 (http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html) (2016)
- 2) 気象庁：ヒートアイランド監視報告 2014, 56 pp (2015)
- 3) 東京都監察医務院：平成 27 年夏の熱中症死亡者の状況(東京都 23 区) (<http://www.fukushihoken.metro.tokyo.jp/kansatsu/oshirase/nettyusho27.html>) (2015)
- 4) 東京管区気象台：東京における日最高気温 35℃以上(猛暑日)の日数 (http://www.jma-net.go.jp/tokyo/sub_index/kiroku/kiroku/data/44.htm) (2015)
- 5) 東京都環境局：ヒートアイランド対策取組方針, 43 pp (2003)
- 6) 東京都環境局：ヒートアイランド対策ガイドライン, 43 pp (2005)
- 7) 常松展充ら：東京都におけるヒートアイランドに関する研究, 日本ヒートアイランド学会誌, 9, pp. 30-35 (2014)
- 8) 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)
- 9) 東京都環境公社東京都環境科学研究所：「東京都におけるヒートアイランド現象等の実態に関する研究」平成 25 年度成果報告書, 98 pp (2014)
- 10) 東京都環境公社東京都環境科学研究所：「東京都におけるヒートアイランド現象等の実態に関する研究」平成 26 年度成果報告書, 124 pp (2015)
- 11) Tsunematsu, N. et al.: 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)
- 12) Ando, H. et al.: Effects of urban geometry on urban heat islands in Tokyo, *Proceedings of the seventh International Conference on Urban Climate*, P4-25 (2009)