

東京都内の大型緑地におけるヒートアイランド緩和効果

Reductional effect of heat island in large-scale green space of Tokyo

大柿 定良* 佐々木 寧*

Sadayoshi OGAKI and Yasushi SASAKI

Heat island effect has become a major issue in urban areas. Green space is expected to play a vital role in mitigating this effect. This study aims to investigate the effectiveness of different tree species for the mitigation of heat island effect, in large-scale urban green space. Each 9 tree species in Yoyogi park and 5 tree species in Meiji-Shinto shrine were selected and their canopy surface temperatures were measured by using infrared thermal images. At the results show that the canopy surface temperature level would differ depend on each tree species. But such observed levels of canopy temperature differences were not sufficient to make a significant contribution for heat island mitigation. Further, even within the same species, canopy surface temperature varied across different locations within the same site. This difference depend on soil condition of the each location. Thus, this study result shows that the soil condition is influential more than the tree species.

Keywords: infrared thermal image, Yoyogi park, Meiji Shinto shrine, Environmental economic values

1. はじめに

今日の都市ヒートアイランド現象の進行は、建築物の高層・高密度化、道路の舗装化、人工排熱の増大など、都市の熱環境の悪化が起因しているといわれている。この状況を改善する良い要因として、緑地や公園などのオープンスペースが効果的である。特に、緑地の主要構成要素である樹木には、蒸発散作用による温度低下、地表面の被覆による気温上昇抑制などの機能がある。そのため、緑地には都市域のヒートアイランドを緩和するクールアイランドの可能性が期待されている¹⁾。

東京都では、緑あふれる東京の再生を目指した「緑の東京10年プロジェクト」を策定している²⁾。施策の中では都市公園150ha、海上公園を30ha新規開園・整備、街路樹を70万本増加する(現状48万本)など、緑地・樹木増加案を掲げている。今後、少ない緑地でも、多くの緑地効果を得るために樹種などに配慮した緑地の質を考慮することが必要になると考えられる。

ヒートアイランド現象など都市、緑地などの広域的な温熱環境を調査する際に、熱赤外線画像が用いられている。既存研究では、土地被覆や土地利用状況と熱赤外線画像の被覆温度との

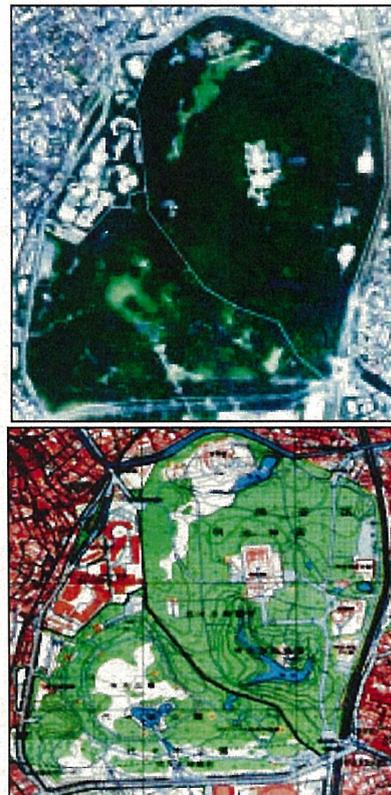


Fig. 1 The visible aero photo (up) and the map (down) of observed area.

*埼玉大学大学院 理工学研究科

Graduate school of Science and Engineering,
Saitama University, 255 Shimo-Ohkubo, Sakura-Ku,
Saitama, Saitama, 338-8570, Japan

関係性を明らかにしている研究が多い。また、樹木では熱赤外線画像の樹冠温度と樹木活性度との相関関係が示され³⁾、樹冠温度が低い場合に、樹木の温度低下効果が大きいことがいえる。しかし、緑地の樹種別類型と熱赤外線画像の関係性を明らかにしている研究は多くない。そのため本研究では東京都内の大規模緑地を例にして、熱赤外線画像を用い樹種別の樹冠温度差を調査、さらに緑地の構成要素別の熱赤外線温度差を求め、緑地の温度低下効果を検証することとした。

2. 調査方法

1) 対象地

対象地は、東京都内の大型緑地である代々木公園と隣接する明治神宮で、都内最大級規模の緑地であり、東西に約 1,000m、南北に約 1,800 m の広がり形成している。

代々木公園は東京オリンピックの開催後の開園で、約 40 年程経過している。樹林面積 34.9 ha、芝生面積が 4.6 ha、平均樹高が 10~20 m 程度の高木から成る森林公園である。園内では樹木は樹種ごとにまとめて植栽されており、樹種別の樹冠温度の特徴を把握しやすいと考えられる。また園内の地形起伏があまりなく、平坦地が大部分を占めている。また、噴水やバードサンクチュアリ（池）といった水辺施設があり、地中には雨水などを浸透させる浸透枳などが一部設置されている。一方、隣接する明治神宮は造成後、約 90 年経過しており、樹林面積 60.9 ha、芝生面積が 2.4 ha を有する。樹林の平均樹高は 10~20 m で、主に常緑広葉樹林から成っている。地形は自然地形を生かし、谷・丘などを含む起伏がある他、宮内には三つの池があるのに加え、湧水や水路があり、水環境がより豊富である（Fig. 1）。

2) 熱赤外線画像

対象地の撮影は、小型ヘリコプターを用いカラー可視画像、遠赤外画像、熱赤外画像を同時に撮影した。主な利用対象の熱赤外線画像については、分割して撮影された画像（約 30 枚）

Tab. 1 Weather conditions on shooting photograph

撮影日	2007年8月10日
時刻	12時11分~12時24分
撮影高度	約610m (2000ft)
熱赤外線画像解像度	2m
天気	薄雲一時晴れ
平均気温	29.4℃
最高気温	33.2℃
12時の気温	32.0℃
13時の気温	31.5℃

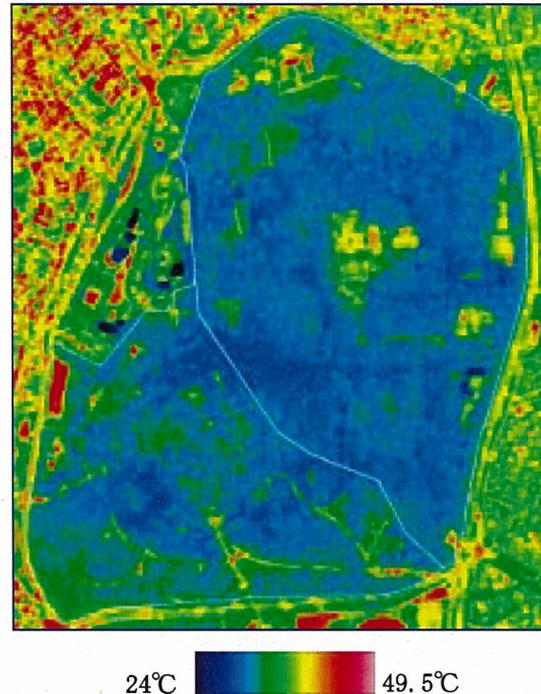


Fig. 2 The infrared thermal images of observed area

を幾何補正、画像結合して全体の熱赤外線画像を作成した（Fig. 1）。

熱赤外線画像を含む撮影日、および気象・気温条件は Tab. 1 の通りである。また熱赤外線画像の各ピクセル値は、放射輝度温度であるため、大気の影響などを受け、実際の地表面温度とは多少異なっている。したがって温度差の計測と考察は相対値となる。

3. 樹種別被覆領域

樹冠温度を樹種別に計測するために、現地を対象地に生育する樹種と位置を確認した。その結果をカラー可視画像上に重ね合わせ、樹種別の被覆領域図を作成した。代々木公園ではケヤキ、イチョウ、プラタナスなど 18 の種別に区分（Fig. 3）、明治神宮ではコナラ、イチョウ、クスノキ、クスノキ、スギの 5 種別の被覆領域図を作成した（Fig. 4）。明治神宮では、立ち入り可能場所が限られているため、既存研究⁴⁾で作成された植生図を参考にし、樹種の被覆領域を判別した。

4. 構成要素別の熱赤外線温度

緑地による温度低下効果を検証するため、対象地の熱環境特性と構成要素別の熱赤外線温度、および樹種別の樹冠温度を計測した。

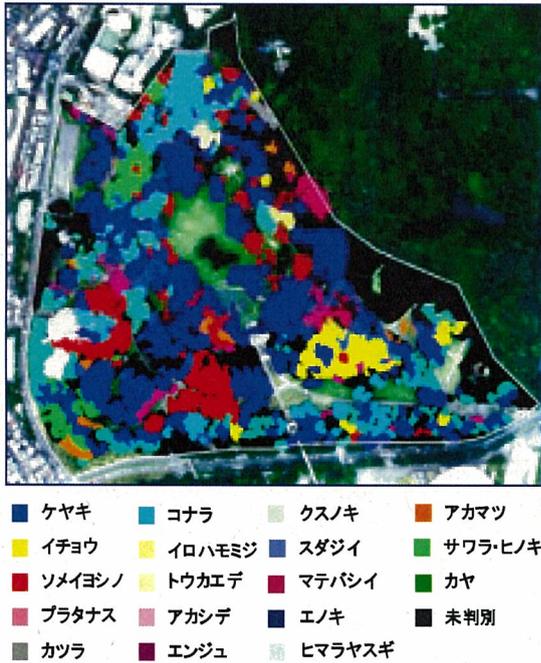


Fig. 3 Coverage area of each tree in Yoyogi Park

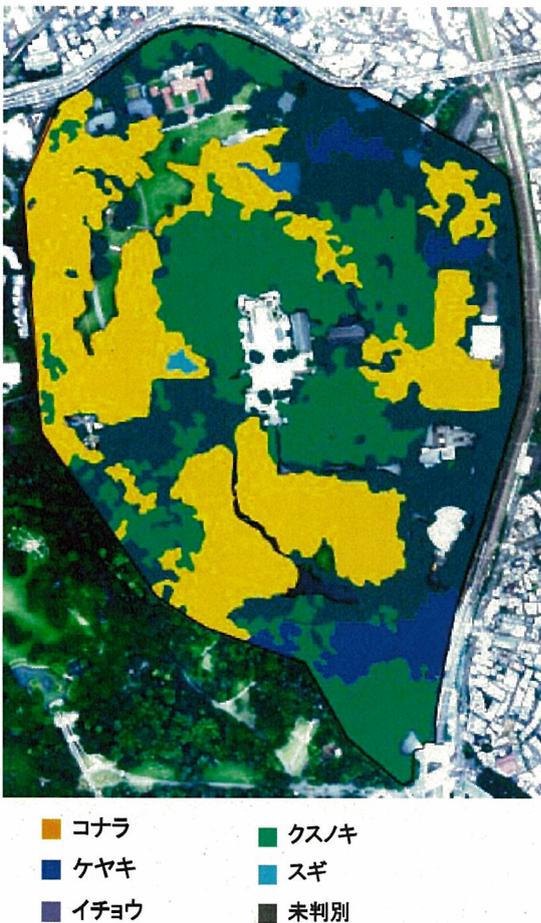


Fig. 4 Coverage area of each tree in Meiji Shino shrine

構成要素とは樹林、水面、芝生、道路・建物の4つのカテゴリである。対象地をこの構成要素別に分割、その分割した構成要素別領域を熱赤外線画像と重ね合わせ、対応部分を切り取る。この切り取った画像を用い、熱赤外線温度を計測した。樹林を例とした計測手順を以下に示す (Fig. 5)。

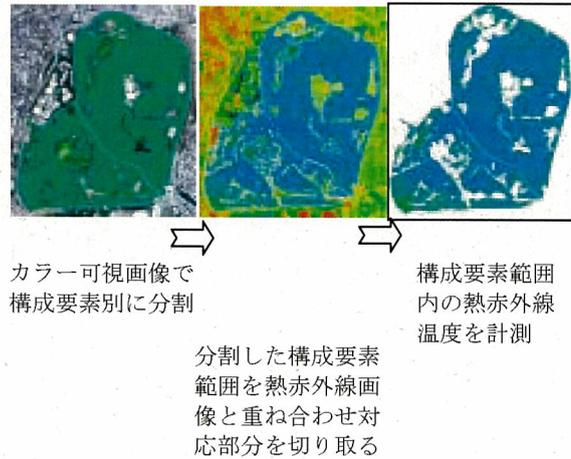


Fig. 5 Infrared thermal temperature for each component

1) 構成要素別の熱赤外線温度

構成要素別の熱赤外線温度を構成要素別で見ると、代々木公園・明治神宮ともに樹林、水面、芝生、道路・建物の順に高い値をとり、樹林がもっとも低い温度を示した (Fig. 6)。

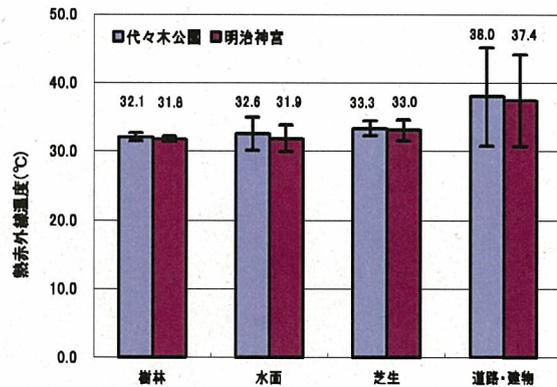


Fig. 6 Measurement method for each component

樹林とその他要素との温度差をみると、樹林と道路・建物部分の温度差は5.9℃ (代々木公園)、明治神宮では5.6℃の差があった。樹林と芝生の温度差はいずれも1.2℃であった。一方、樹林と水面の差は0.5℃ (代々木公園)と0.1℃ (明治神宮)でその温度差は小さい。両対象地において、構成要素別 (樹林 - 水面など) の温度差は、有意な差 ($\alpha=1\%$) であった。

こうした構成要素別間の温度差は、代々木公園・明治神宮共に同じ傾向になった(Tab. 2)。

対象地別でみると、明治神宮は代々木公園よりも全構成要素で温度が低い値となった(Fig. 6)。同じ構成要素における対象地別の差は、0.3℃(樹林、芝生)~0.7℃(水面)であった(Tab. 2)。対象地別の温度差についても道路・建物を除き、有意な差($\alpha=1\%$)であった。

Tab.2 Difference of infrared thermal temperature for each component (upper), difference for each place (lower)

	熱赤外線温度差(℃)	
樹林	0.3	
水面	0.7	
芝生	0.3	
道路・建物	0.6	

	熱赤外線温度差(℃)	
	代々木公園	明治神宮
樹林-水面	0.5	0.1
樹林-芝生	1.2	1.2
樹林-道路・建物	5.9	5.6
水面-芝生	0.7	1.1
水面-道路・建物	5.4	5.5
芝生-道路・建物	4.7	4.4

樹林や芝地など構成要素別の熱赤外線温度の結果でみると、各構成要素間には明瞭な温度差があることがわかった。さらに樹林、水面、芝生、道路・建物の順に温度が高くなり、とくに道路・建物と他の構成要素との温度差は大きかった。そのため、道路・建物の被覆面積をより少なくし、芝生、水面、樹林の被覆面積を多くすることが温度低下効果をより高めると考えられる。このような結果は、多くの既存研究ですでに述べられているとおりでである。

5. 樹種別の樹冠温度

次に、樹種別の樹冠温度を計測した。計測対象樹種は、対象地内で被覆面積が大きい代表的な樹種とした。代々木公園では落葉樹のケヤキ(*Zelkova serrata*)、イチョウ(*Ginkgo biloba*)、ソメイヨシノ(*Prunus yedoensis*)、常緑樹のクスノキ(*Cinnamomum camphora*)、スダジイ(*Castanopsis cuspidata*)、マテバシイ(*Pasania edulis*)、針葉樹のヒマラヤスギ(*Cedrus deodara*)、アカマツ(*Pinus densiflora*)、ヒノキ・サワラ(*Chamaecyparis obtusa*・*Chamaecyparis pisifera*)で、落葉樹3樹種、常緑樹3樹種、針葉樹3樹種の合計9樹種である。明治神宮では落葉樹のケヤキ、コナラ(*Quercus serrata*)、イチョウ、常緑樹のクスノキ、針葉樹のスギ(*Cryptomeria japoni*

ca)で、落葉樹3樹種、常緑樹1樹種、針葉樹1樹種の合計5樹種とした。

1) 樹種別の樹冠温度

代々木公園では、樹冠温度はイチョウがもっとも低く(31.8℃)、針葉樹のヒノキ・サワラがもっとも高い値(33.0℃)となった(最大温度差1.2℃(Fig. 7))。

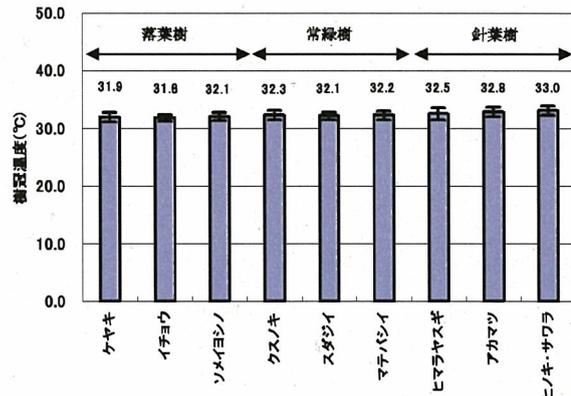


Fig.7 Canopy temperature difference of each tree species in Yoyogi park

樹種別でみるとケヤキ、ソメイヨシノ、クスノキ、スダジイ、マテバシイでは有意な差($\alpha=1\%$)がなかった。各樹種を落葉樹、常緑樹、針葉樹とする生活形別に類型分けしてみると、落葉樹と常緑樹では有意な差($\alpha=1\%$)がなく、同様に落葉樹間、常緑樹間、針葉樹間でも有意な差($\alpha=1\%$)がない傾向にあった。逆に、落葉樹と針葉樹、常緑樹と針葉樹では有意な差($\alpha=1\%$)があった。

明治神宮では、樹冠温度はケヤキ、コナラが最も低く(31.6℃)、イチョウが最大温度差0.4℃と最も高い値(32.0℃)となった(Fig. 8)。

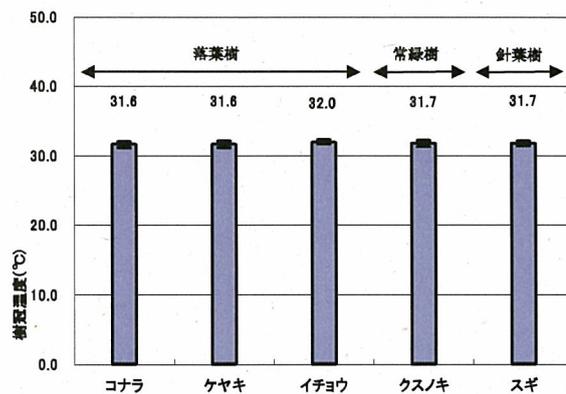


Fig.8 Canopy temperature difference of each tree species in Meiji Shino shrine

1) 生活形別の樹冠温度

樹種別の樹冠温度差の結果をみると、代々木公園では0.1℃～1.2℃、明治神宮では0.1℃～0.4℃の差があった (Fig. 7-8)。しかし、代々木公園では、針葉樹以外の生活形 (落葉樹・常緑樹)、落葉樹間・常緑樹間・針葉樹間や樹種 (針葉樹を除く) に有意な温度差がない傾向であり、明治神宮でも、落葉樹・常緑樹・針葉樹等の生活系や樹種に有意な温度差がない傾向であった。これらより、樹種別の樹冠温度は、落葉樹・常緑樹と針葉樹に有意な温度差があるが、落葉樹と常緑樹、落葉樹間、常緑樹間、針葉樹間に有意な温度差がない傾向にあることが考えられる。そのため、樹種別による樹冠温度には差がなく、それにより温度低下効果にも差がない傾向にあることが考えられる。つまり、緑地などに植栽されている樹木 (針葉樹を除く) の温度低下効果は、樹種による違いがなく、樹種別の影響はないことが考えられる。

2) 生活形別の比較

落葉樹、常緑樹、針葉樹とする生活形別でみると、落葉樹、常緑樹、針葉樹間では、いずれも有意な差 ($\alpha=1\%$) がなかった (Fig. 8)。

また、落葉樹間でも有意な差がない傾向にあり、樹種別でみると、コナラ、ケヤキ、クスノキ、スギでは有意な差 ($\alpha=1\%$) がなかった。

3) 代々木公園と明治神宮の比較

代々木公園と明治神宮双方で植栽されている樹種ケヤキ、イチョウ、クスノキ、ヒマラヤスギ・スギの同じ樹種の樹冠温度を、代々木公園と明治神宮の、場所の違いの影響を比較すると、イチョウ以外は、明治神宮の樹木が、より低い樹冠温度を示していた (Fig. 9)。

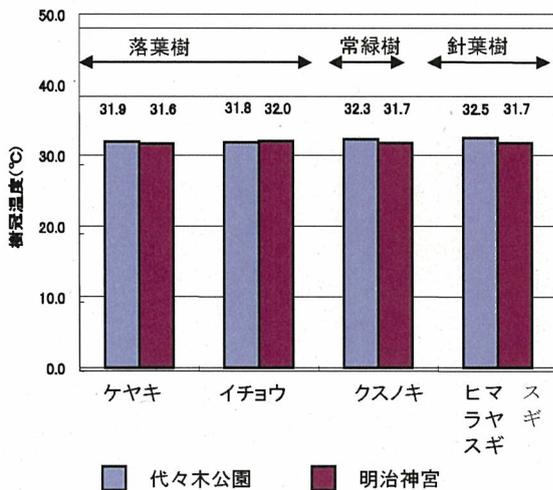


Fig.9 Canopy temperature difference of each life form in Yoyogi park and Meiji Shinto shrine

各々の樹冠温度差は小さいがケヤキで0.3℃差、イチョウで0.2℃差、クスノキで0.6℃差、ヒマラヤスギ・スギで0.8℃差であった。有意差検定するとケヤキ、クスノキ、ヒマラヤスギ・スギの温度差には有意な差 ($\alpha=1\%$) であったが、イチョウには有意な差 ($\alpha=1\%$) は認められなかった。

3) 代々木公園と明治神宮の樹冠温度

代々木公園と明治神宮では、同じ樹種でも樹冠温度に違いがあり、有意な差があることがわかった。この違いは、明治神宮の水環境が影響していると考えられる。明治神宮では、敷地内に三つの池があるのに加え、自然地形を利用した湧水やその水を周辺へ流出させる水路が維持されており、より多様な水環境がある。こうした水環境の影響により、明治神宮の樹木では樹木の活力度、蒸発散作用が促され、代々木公園よりも樹木の樹冠温度がより低い傾向にあることが考えられる。

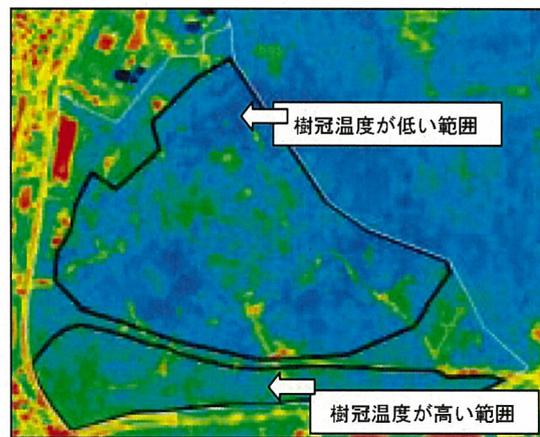


Fig. 10 The infrared thermal images of Yoyogi park

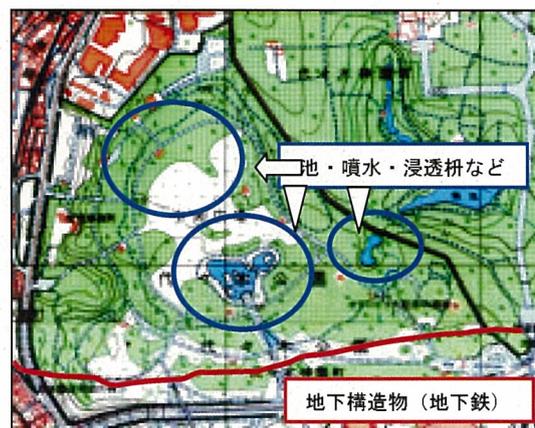


Fig. 11 Water bodies and underground facilities in the Yoyogi park

Tab.3 Environmental economic values of green space, Yoyogi park and Meiji Shinto shrine

	代々木公園			明治神宮		
	樹林	水面	芝生	樹林	水面	芝生
被覆面積(ha)	34.9	0.6	4.6	60.9	0.8	2.4
潜熱輸送量(W/m ²)	379.22	305.71	286.44	379.22	305.71	286.44
緑の蒸発散能(mm/日)	3.82	3.08	2.89	3.82	3.08	2.89
蒸発散量(kg/日)	1334755	17449	131370	2327635	24513	69871
蒸発気化熱(kcal/日)	778162456	10172790	76588547	1357011217	14290885	40735048
電力エネルギー(kWh/日)	34585	452	3404	60312	635	1810
経済価値(円/日)	691700	9042	68079	1206232	12703	36209

6. 環境経済価値評価

次に、対象地を構成要素別に分割、各構成要素別の潜熱輸送量を利用して、代々木公園、明治神宮双方の緑地としての環境経済価値の換算評価を試みた。その仮定として、既存研究³⁾で計測された値を用いた。樹林の潜熱輸送量を379.22 (W/m²)、水面の潜熱輸送量を305.71 (W/m²)、芝生の潜熱輸送量を286.44 (W/m²)とした。また、水の蒸発気化熱を気温25°Cで583 (cal/g)とし、日照時間を7時間、エネルギー交換効率を0.1、1kWhを20円とした。換算した結果をTab. 3に示した。それによると代々木公園は、1日当たり768,821円、明治神宮は1,255,144円の環境経済価値があることがわかった。

7. 地盤土壌の影響

以上、調査・研究解析の結果、当初予想された樹種別の樹冠温度にはほとんど明瞭な差がなく、したがって温度低下効果にも樹種別差がないことがわかった(針葉樹を除く)。しかし、緑地全体の熱赤外線画像をみると、樹林の林冠の表面温度には場所により明らかな違いがある(Fig. 10)。この温度差に注目、同じ樹種で樹冠温度が低い場所と高い場所について比較した。代々木公園での例で見ると、樹冠温度が低い場所の周辺では噴水やパードサンクチュア(池)などの水辺施設が設置されている。さらに、地中には雨水を浸透させる浸透枡を設置されていた(Fig. 11)。すなわち、空中から撮影、記録された樹冠温度の違いは、林床の土壌水分量など、土壌地盤の差異が表現されていると考えられる。一方、樹冠温度が高い場所については、その地下に地下鉄が通っていることがわかった(Fig. 11)。地下鉄などの地下構造物が樹林

の生育基盤である土壌条件に影響を与えていると想定される。以上より、対象地内の潜在的な水系などの水環境や地下構造物などを考慮すると、樹冠温度には土壌条件が関係しているものと想定される。つまり、この土壌条件の違いが樹木活力度に影響を与え、樹冠温度の明瞭な温度差を示していると想定される。

1) 地盤土壌影響の検証

そこで同じ地盤高さで、樹冠温度異なる場所A区とB区別に、生育するケヤキ、イチョウ、ソメイヨシノ、クスノキ、ヒマラヤスギ、サワラ・ヒノキの樹冠温度の比較を行った。噴水・池・浸透枡などがある場所をA区、地下鉄などの地下構造物がある場所をB区とした。

両地区の樹冠温度を比較した結果、同じ樹種の樹冠温度について、A区とB区の温度差はケヤキ、イチョウで0.8°C、ソメイヨシノ、クスノキ、ヒマラヤスギで0.6°Cであった(Fig. 12)。

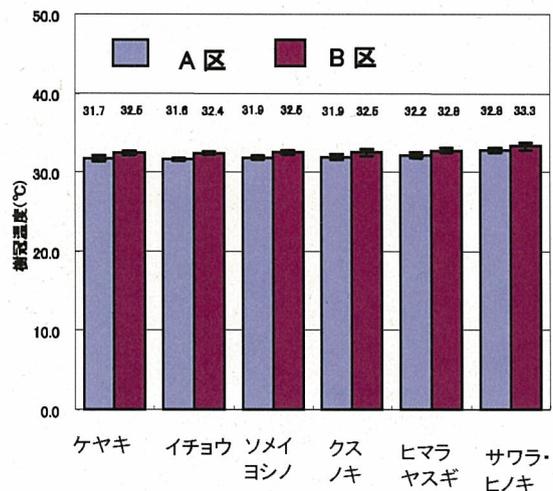


Fig. 12 Canopy temperature in A and B area

これらの温度差はすべての樹種において、有意な差 ($\alpha=1\%$) であった。ただし、同じA区内でのケヤキ、イチヨウ、ソメイヨシノの各樹冠温度には有意な差 ($\alpha=1\%$) がなく、B区でも、ケヤキ、イチヨウ、ソメイヨシノ、クスノキの各樹冠温度に有意な差 ($\alpha=1\%$) がなかった。

すなわち、樹冠温度は、人工的に植栽された樹種の差よりも、生育基盤である土壌条件の影響がより大きく影響していることが示唆された。

8. まとめ

本研究では、熱赤外線画像を利用し、東京都内の大型緑地におけるヒートアイランドの低減効果を検証した。その際、さらに樹種別の温度低下効果の検証を試みた。その結果、樹種の生活形別でみると落葉樹・常緑樹が針葉樹よりも低減効果が高い傾向にあった。しかし落葉樹間・常緑樹間・針葉樹間の個々の樹種別にはほとんど差異がないことがわかった。場所の違いに関わらず人工的に植栽されている樹種では、樹冠温度に違いがないことが分かった（針葉樹を除く）。このことは既存研究でも同じような傾向にあるとされている。

しかし、熱赤外線画像で見ると、双方の園地ないでは樹冠温度が明らかに異なる場所があり、この相違は地表の土壌条件の影響と想定された。

上空から緑地の樹冠を撮影した熱赤外線画像は、樹林の下の生育基盤である土壌条件を反映し、樹木の活性度として表現されているという結果となった。

以上の解析結果により、より有効な緑地効果が求められる都市内の緑地形成には、樹林の生育基盤である地盤の適切な整備が必要であるといえる。植栽する樹種に関しては、針葉樹よりも落葉樹や常緑樹類を選択することが温度低下効果をより高めるといえる。

これまで社寺林の新たな造成の際には、埼玉県内の平林寺や東京の石神井など湧水や水路などの水源が確保されている場所に造られていることが知られている。熱環境の悪化が懸念される都市内において、今後計画される緑地形成においても、緑地面積の増大だけではなく、その生育基盤である土壌と水環境の整備が不可欠である。

* 空中写真および熱赤外線画像の撮影は、スカイマップ株式会社の協力による。

参考文献

- 1) 都市環境学教材編集委員会編：都市環境学、森北出版株式会社、pp21-35、2003.
- 2) 東京都：「緑の東京 10年プロジェクト」基本方針 ～緑あふれる東京の再生を目指して～、2007.
- 3) 住宅・都市整備公団 南多摩開発局、財団法人 日本緑化センター：多摩ニュータウンにおける緑化と大気熱環境（その2）、1994.
- 4) 宮脇 昭・奥田重俊・井上香世子：明治神宮宮域林の植物社会学的研究、1980.