

■ 調査報告

都心の緑地が有する夏季における夜間の冷却能力に関する研究

Research on the cooling potential of urban green spaces during the night in summer

外崎 公知* 川合 史朗** 所 功治**

Kochi TONOSAKI Shiro KAWAI Koji TOKORO

Abstract : Recently, because there has been increasing of people who get disturbed sleep and have heatstroke, urban heat island phenomenon has become a serious topic of public concern. At the same time, it sometimes brings about disaster that is caused by localized torrential downpour into urban area that is covered with asphalt or concrete. This paper aims to clarify the cooling potential of urban green spaces during the night in summer. Specifically, we showed that green spaces and anthropogenic heat emission affect the temperature in urban downtown areas clearly. We obtained them by calculating the multiple regression analysis applying various types of data that were collected from 27 observation points of Tokyo's Minato-Ku. As a result, we found out that the cooling potential by green spaces of 150 square meters would offset the increasing of temperature by the anthropogenic heat released from 87 offices of the average size in Minato-Ku, having a total floor area of about 259,900 square meters. Finally, we compared result data of this research with daytime data of which we got one year ago. Based on this background, we obtained that green spaces in urban downtown areas have the function of natural air-conditioner working through day and night.

Keywords : *green spaces, cooling potential, urban heat island phenomena, anthropogenic heat emission, day's low temperature*

キーワード : 緑地, 冷却能力, ヒートアイランド現象, 人工排熱, 日最低気温

1. はじめに

近年、東京や大阪をはじめとする大都市では、昼夜を問わず夏季における都心の気温が周辺よりも著しく高温化し、街路樹などの木陰が少ない市街地は、健常者であっても日中の外出を控えなくなるほど厳しい温熱環境となる。それは同時に、単に都市空間の快適性が損なわれるだけでなく、熱中症患者数の増加や大きな被害をもたらす都市型豪雨等を誘発しており、都市に暮らす私たちに深刻な影響を与えつつある。これは、「ヒートアイランド現象」として既に広く認知されており、既に、国や地方自治体では、地球温暖化対策と同様に、ヒートアイランド対策を重要政策に位置づけるようになりつつある。

関連する様々な取り組みが進められる中で、緑化を展開軸にした施策が着目されている。もとより緑化によって、地球温暖化の原因である温室効果ガスの吸収、都市における生物多様性の向上、都市の快適性の確保、都市景観の向上など、様々な側面からの効果が得られるが、これらに加えて、特に、緑地が有する冷却効果によってヒートアイランド現象の緩和が期待されるという観点から、いくつかの研究が行われている。

大和田ら¹⁾が、熱帯夜が現れる日の最低気温と緑被率の相関関係から、緑被率が高いほど気温が低く現れることを明らかにしている。また、最高気温が現れる日中の緑地の効果では、安藤ら²⁾による皇居における冷気の染み出しに関する実測値の評価を実施している。しかしこれらは、緑地を構成する樹林地、草地、裸地等の土地被覆の違いが気温に与える影響を評価・分析している研究であり、建物の延床面積、緑地面積、人工排熱量などが気温に及ぼす影響を評価・分析した研究ではない。このため、外崎ら³⁾が、東京港区内の22箇所の測定地点から得られた気温データと、各地点の気温の形成要因になり得る各種データから、各観測地点の日最高気温が樹林地面積と人工排熱量を用いて説明できることを明らかにしている。また、単位面積当たりの樹林地が固定でき

るCO₂の単位量を1とし、一方で、当該樹林地が有する冷却効果分だけ空調機器の運転が控えられ、電力使用量が削減されたと仮定すると、発電に伴い発生するCO₂量が削減されることから、その約233倍ものCO₂の削減効果が期待できることを明らかにしている。

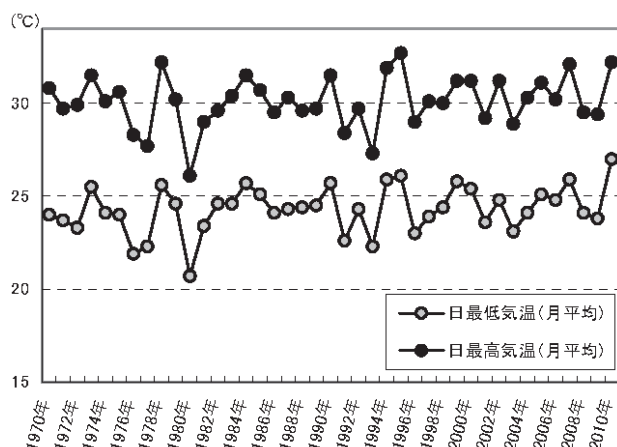
近年、大都市を中心にして熱帯夜の発現日数が増加しつつあるが、気象庁の発表によると、2010年における東京都心における熱帯夜、即ち日最低気温が25℃以上となる日数が、観測史上初となる48日を記録し、真夏日の増加日数と相まって、今後、ますます熱中症患者等の増大が懸念される状況にある。入江⁴⁾は、ランドサットデータによる土地利用データ、アメダスデータによる気温データを用いた解析により、最低気温時は緑地の効果が最も顕著に現れる時間帯であることを示している。

本調査は、外崎ら³⁾が発表した過年度の論文において日最高気温が樹林地面積と人工排熱量を用いて説明できることを示したのを踏まえ、同じ観測地点において同時に取得した日最低気温のデータを対象に同じ分析手法を用いた場合に、各観測地点の気温が、概ね、樹林地面積と人工排熱量で説明できるかを検証するものである。その上で、ヒートアイランド現象の緩和に資する冷却効果が、日中と夜間で、どの程度の差異となって発現するかを定量的に明らかにし、樹林地が有する多面的機能を評価する際の新たな指標設定の可能性について考察を行うことを目的としている。

2. 調査の方法

本調査は、過年度の研究手法を踏襲して実施した。具体的には、ヒートアイランド化が顕著な東京都心の港区を調査対象とし、かつ近年上昇傾向にある夏季の日最低気温に着目した(図-1)。分析対象とする気温データは、港区内における学校・公園・その他公共施設などの27箇所の地上1.5mに設置されているデジタル百葉箱⁵⁾で観測された2007年8月のデータを取得しつつ、風や

* (財)都市緑化機構 ** (株)創建



出典：気象統計情報（気象庁）より作成

図－１ 港区の８月日最高気温と日最低気温の推移

建物の向き等による気温データの攪乱要因を排除するため、各観測地点における日最低気温の８月の平均値を求めることで得た。それらの観測地点を図－２に示す。但し、27箇所の観測地点のうち、海風や自動車・鉄道等の影響を常に受けて異常値が記録される可能性が高い６地点を除外した21の観測地点を記載している。

気温データのメッシュ化は、各観測地点の日最低気温の平均値データを、各観測地点を中心にした50 mメッシュ（基本メッシュ）に割付けた上で、これらのメッシュデータの平面補間をGISで行い、港区全域の気温分布を推定した。

なお、各観測地点の気温への影響度合いを分析する各要因データの集計範囲と分析方法についても、過年度の研究と同様に、最小のメッシュ単位が50 mである点に鑑み、気温観測地点を中心にした50 m区域、150 m区域、250 m区域の3つの区域規模を便宜的に設定し各区域別に集計した。その上で、日最低気温の平均値と各要因データ間（樹林地面積、緑地面積、人工排熱量、延床面積、標高）で相関分析を実施し（表－１）、この相関分析結果から、気温形成に一定の影響を及ぼす要因データである樹林地面積と人工排熱量に着目し、重回帰分析を行うことで、緑地が有する冷却能力の定量評価を行った（表－２）。

３．各種データの算出結果

（１）日最低気温の分布特性

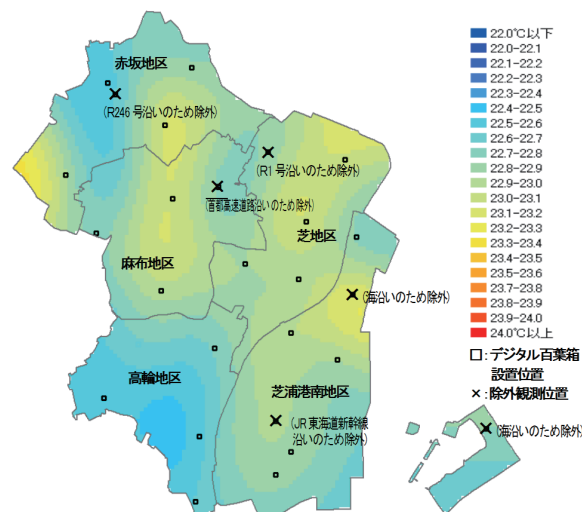
図－２より、８月の日最低気温平均値が23℃以上の比較的高い気温を示している地区は、麻布地区中部から赤坂地区の南部にかけての六本木を中心とした高層ビルが比較的多く林立する地域、芝地区の北部の新橋を中心とするビジネス街、芝浦港南地区の北部に位置する芝浦埠頭周辺の工場・倉庫群の地域となっている。

（２）日最低気温平均値と各要因データの相関分析

日最低気温平均値と各要因データを相関分析した結果を表－１に示す。日最低気温平均値の形成に正・負の両側面から影響を及ぼす主たる要因（相関係数が高い）データは区域規模により異なるが、概ね樹林地面積・緑地面積・標高が負に、人工排熱量と延床面積が正に作用している。また、区域規模別に見ると、50 m区域・150 m区域・250 m区域の全区域で、日最低気温平均値に対する気温低下側の要因として、最も相関が高いのは樹林地面積であり、一方で、日最低気温平均値に対する気温上昇側の要因として、最も相関が高いのは、50 m区域では延床面積が、150 m区域・250 m区域では人工排熱となっている。

（３）日最低気温を説明変数とした重回帰分析の結果

表－１の結果を踏まえ、50 m区域・150 m区域・250 m区域の



図－２ 50 mメッシュの気温分布（８月の日最低気温平均値）

表－１ 日最低気温平均値と各要因データの相関分析結果

50m区域	最低気温	樹林地面積	緑地面積	人工排熱	延床面積	標高
最低気温	1					
樹林地面積	-0.639	1				
緑地面積	-0.352	0.595	1			
人工排熱	0.140	-0.136	-0.202	1		
延床面積	0.212	-0.272	-0.462	0.801	1	
標高	-0.408	0.205	0.214	-0.116	0.058	1
150m区域	最低気温	樹林地面積	緑地面積	人工排熱	延床面積	標高
最低気温	1					
樹林地面積	-0.704	1				
緑地面積	-0.705	0.817	1			
人工排熱	0.596	-0.415	-0.565	1		
延床面積	0.583	-0.511	-0.666	0.857	1	
標高	-0.408	0.384	0.275	-0.356	-0.227	1
250m区域	最低気温	樹林地面積	緑地面積	人工排熱	延床面積	標高
最低気温	1					
樹林地面積	-0.664	1				
緑地面積	-0.640	0.825	1			
人工排熱	0.518	-0.443	-0.600	1		
延床面積	0.435	-0.534	-0.555	0.745	1	
標高	-0.408	0.457	0.275	-0.445	-0.302	1

全てを対象に、目的変数に日最低気温平均値を用い、説明変数に樹林地面積と延床面積を用いた場合と、樹林地面積と人工排熱を用いた場合の全6ケースについて重回帰分析を行った。

表－２の重回帰分析の結果に示すように、p値と決定係数、即ちモデルの妥当性と説明力が6ケースの中で相対的に見て有意であるのは150 m区域である。ここで、150 m区域の分析結果を詳しく見ると「②樹林地面積・延床面積」と「⑤樹林地面積・人工排熱」との比較において、②の決定係数は0.5626、⑤は0.6066となり⑤が良好な値となっている。一方、説明変数のp値を見ると、樹林地面積、人工排熱ともに⑤のケースが良好である。一方、筆者らの以前の研究で、日最高気温平均値の形成に寄与する要因データに、樹林地面積と人工排熱量を用いて重回帰分析を行った経緯があり、本調査結果と相互に比較することで、緑地の冷却能力に関する定量的評価の妥当性を検証することが可能になることから、本稿では、表－２の⑤のモデルを用いた。

なお、表－２において、説明変数に用いた150 m区域・250 m区域における樹林地面積と人工排熱量及び延床面積の相関がやや高いことから、多重共線性の可能性を疑ったが、VIFや許容度の値を確認した結果、その可能性は極めて低いことを確認している。

表－２ 区域規模別の重回帰分析結果

【説明変数(樹林地面積・延床面積)の場合】

	①樹林地面積・延床面積 A:50m区域	②樹林地面積・延床面積 B:150m区域	③樹林地面積・延床面積 C:250m区域
重相関係数	0.6402	0.7500	0.6708
決定係数	0.4098	0.5626	0.4499
p値	0.0087	0.0006	0.0046
観測数	21	21	21
説明変数	上段:係数 下段:標準誤差	上段:係数 下段:標準誤差	上段:係数 下段:標準誤差
樹林地面積 (m ²)	-0.000307 0.000092	-0.000034 0.000011	-0.000015 0.000005
延床面積 (m ²)	0.000002 0.000011	0.000003 0.000002	0.000000 0.000001
切片	22.932001 0.063257	22.863928 0.089839	22.936132 0.103094

【説明変数(樹林地面積・人工排熱)の場合】

	④樹林地面積・人工排熱 A:50m区域	⑤樹林地面積・人工排熱 B:150m区域	⑥樹林地面積・人工排熱 C:250m区域
重相関係数	0.6412	0.7789	0.7095
決定係数	0.4111	0.6066	0.5033
p値	0.0085	0.0002	0.0018
観測数	21	21	21
説明変数	上段:係数 下段:標準誤差	上段:係数 下段:標準誤差	上段:係数 下段:標準誤差
樹林地面積 (m ²)	-0.000309 0.000089	-0.000034 0.000010	-0.000014 0.000005
人工排熱 (GJ/day)	0.000744 0.002514	0.000905 0.000400	0.000222 0.000147
切片	22.936748 0.046490	22.881896 0.064828	22.884228 0.081687

以上を踏まえ、重回帰モデルを式(1)に示す。

$$Y = 22.88190 - 0.00003(X_1) + 0.00091(X_2) \cdots \cdots \text{式(1)}$$

ここで、Y:8月の日最低気温平均値(℃), X₁:樹林地面積(m²), X₂:人工排熱量(GJ/day)である。

式(1)より気温形成に与える影響は、相関分析の結果で得られたように、樹林地面積の係数がマイナスを示し、人工排熱量の係数がプラスを示していることから、冒頭に示した仮説を検証することができたと言える。

4. 緑地が有する冷却能力の評価

(1) 気温低減効果の観点から捉えた緑地の評価

次に、式(1)から樹林地面積と人工排熱量が気温形成に寄与する割合を導き出すため、Yの値が切片と等しい場合を考えて、式(2)を得る。但し、X₁:樹林地面積(m²), X₂:人工排熱量(GJ/day)である。

$$0.00003(X_1) = 0.00091(X_2) \cdots \cdots \text{式(2)}$$

以下に続く計算結果は、表－2の⑤に示す各説明変数の係数(推計値)を適用したものであるが、本節の最後の段落では、これらの係数が有する標準誤差を含めた形での算出結果を併記した。

式(2)より150 m区域(22,500m²)あたりの樹林地が有する冷却能力(クーリング・ポテンシャル)は、1日当たりの人工排熱量837GJ/dayを相殺するに等しいと言える。このことについて吟味する。今、837GJ/dayが港区内の典型的な建物用途・建物規模⁶⁾である事業所建物からの人工排熱量に置換すると何棟分の事業所建物に相当するかを考察する。「平成15年度都市における人工排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書(国土交通省・環境省)」に記載されている「事業所建物の排熱原単位(8月の推計値)」のうち、2,000m²～5,000m²未満のランクに該当する事業所建物から1日あたりに排出される人工排熱の原単位

が、顕熱:2,925.66kJ/m²/day、潜熱:270.87kJ/m²/day、下水排熱:23.76kJ/m²/day、計:3,220.29kJ/m²/dayとして示されている。これらの原単位を用いることで、837GJ/dayの熱量が、延床面積が3,000m²程度の事業所建物の約87棟分(総延床面積:259,900m²)から排出される1日当たり人工排熱量に相当することが導出される。但し、この人工排熱量837GJ/dayは、前述した報告書に詳述されているように、照明器具、OA機器、空調機器、換気装置、厨房機器、給湯施設などの各種熱源が稼働している状況に対して、主に空調排熱、換気排熱として室外機等から屋外に排出される熱量と、下水から排出される熱量の総量^{7) 8)}を示している。

以上を踏まえ、式(2)より、150 m×150 m、即ち、22,500m²の樹林地が存在することにより、気温が約0.8℃(±0.2)だけ上昇する増分を、抑制・相殺する効果があると言える。なお、その気温上昇分の熱量は、港区において平均的な延床面積を有する事業所建物(3,000m²程度の延床面積)の約87(±52)棟に具備された諸々の設備機器等から排出される837(±500)GJ/dayの熱量に相当する。

(2) 気温低減効果のメカニズム

緑地が有する気温低減効果のメカニズムについては、菅原ら⁹⁾が、クールアイランド強度(都市内緑地とその周囲の市街地との気温差)の季節変化および気象条件への依存性について、都内の大規模緑地(新宿御苑)での実測データをもとに検討を行っている。これによると、クールアイランド強度の季節変化は、日中のそれは夏に大きく冬に小さく、これは植物の落葉・展葉が原因と考えられると述べている。一方で夜間のクールアイランド強度はほとんど季節変化せず、季節を問わず大気安定度に依存し、安定であるほどクールアイランド強度は大きかった。さらに、放射冷却が強い夜間にもクールアイランド強度が大きくなることが定量的に示されている。

さらに、菅原ら¹⁰⁾が自然教育園(東京都港区白金台)において2009年夏季に実測を行った結果に基づく、都市内緑地における冷気にじみ出しの熱収支解析によると、にじみ出しが発生する23時以降は、顕熱がゼロに近く、また水平移流が正味放射とほぼ等しい値となっている。端的に言えば放射で冷えた分がにじみ出しとして市街地を冷却していることになり、瞬時の市街地冷却量はその時の正味放射量の約8割であることを明らかにしている。

また、萩島ら¹¹⁾は、大規模な13層の階段状屋上庭園を有する建物を対象として周辺微気象観測の結果を報告しており、放射冷却によって斜面沿いの空気塊が周囲より低温となることで発生する密度流を調査・分析し、単独建物の屋上緑化や壁面緑化が周辺微気象に及ぼす影響を明らかにしている。

これらのことから、緑地の気温低減効果のメカニズムは、緑地と周辺との放射冷却の差で生じることを意味している。また、表－2に示すように、150 m区域及び250 m区域において最低気温との相関係数が樹林地面積と緑地面積ともに高いことから、樹木の多少に関わらず夜間の気温低減効果は発現するものと考えられる。

5. まとめと考察

一連の調査・分析により得られた結果を次にまとめる。

1) 8月の日最低気温平均値を目的変数、樹林地面積と人工排熱量を説明変数とした重回帰分析の結果、都心の気温は、樹林地の増加が気温低下の要因となり、人工排熱量の増加が気温上昇の要因になるとの分析結果が得られた。これは、以前、日最高気温を目的変数にした場合と同じ分析結果になった。

2) 港区の樹林地22,500m²が有する冷却能力(クーリング・ポテンシャル)を、日中(日最高気温)と夜間(日最低気温)の2

つの側面から評価すると、夜間における寄与度がより高いという結果が得られた。具体的には、外崎ら⁴⁾が、日中における樹林地22,500m²の冷却能力は、681.8GJ/dayの人工排熱量を相殺するに値し、これは、港区の平均的な延床面積を有する事業所建物の70棟分から一日に排出される総熱量を相殺・抑制するのに等しいとの結果が導いている。一方、夜間における評価では、それぞれ837GJ/day、87棟分となり、約1.2倍と日中よりもやや高いことが得られた。但し、これらの結果には前述したように一定の誤差を含むことに留意する必要がある。

3) 人工集積が進む真夏の都心では、昼夜を問わずエアコンの利用が常態化しており、ヒートアイランド現象を助長する人工排熱量が増大化しつつある。本調査では、都心に残る樹林地が、日中・夜間ともに周囲の気温低減に寄与しており、特に日射のない夜間における効果が高いことを定量的に示した。近年、都心では真夏日や熱帯夜の日数が増加傾向にある。また、気候変動枠組条約第16回締約国会議(COP16)以降、気候変動への「適応(Adaptation)」の必要性が叫ばれている。既存の樹林地等の適切な維持・管理を通じてその保全を図るだけでなく、樹冠が広い街路樹や緑量感あふれる公園等の拡充を図ることで緑地を点・線・面へと広げるなど、市街地における一定量のまとまりある緑の確保を通じて、快適で過ごしやすい都市空間を積極的に創出する施策の展開が求められる。

6. 今後の課題

本調査で得られた成果は、全て、東京都港区内の各観測地点で記録された2007年8月の気温データに依拠している。このため、最新の年次データに基づく同手法の分析を行うとともに、同じ都心にある他の特別区にも同手法を適用して検証することで、本稿で提唱した都心の樹林地が有する冷却能力(クーリング・ポテンシャル)の評価の客観性を吟味する必要がある。

また、特に夜間の気温形成に正の側面から大きな影響を及ぼすと考えられる要因データに、建築物や道路が蓄積した輻射熱を加え、それらの放出分も考慮した形の分析が必要と考える。具体的には、新たに各要因データ間の相関を算出し、参照する必要があるが、日最低気温平均値及び日最高気温平均値を目的変数にしつつ、樹林地面積、人工排熱、輻射熱を説明変数にした場合の重回帰分析を実施して、それぞれの要因の気温形成に対する寄与度を把握すべきであると考えている。

さらに、今回の分析手法を都心から離れた緑が多く残る郊外にも適用し、都心と郊外における樹林地の冷却能力(クーリング・ポテンシャル)の違いを定量的に把握することで、都心の樹林地が有する冷却能力の重要性を浮き彫りにするとともに、今回得られた分析結果を用いた、樹林地の新たな評価指標の構築等を通じて、関連する緑化施策の基礎資料として活用していくことが求められる。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、防衛大学校の菅原広史准教授には、気温低減効果のメカニズムについてご教授をいただき大変お世話

になりました。

参考文献・補注

- 1) 大和田道夫・中川由雅・岩田充弘・櫻井麻里・梅田佳子(2007):名古屋市における熱帯夜の分布と緑地効果について:愛知教育大学研究報告56(自然科学編),19-24
- 2) 安藤邦明ら(2008):大規模緑地のヒートアイランド緩和効果の実測評価(その1~その3):日本建築学会学術講演梗概集9月,983-987
- 3) 外崎公知・川合史朗・所功治(2010):都心の緑地が有する夏季における冷却能力に関する研究:ランドスケープ研究(オンライン論文集)3,5-10
- 4) 入江彰昭(2003):気温推計による緑地のヒートアイランドの緩和効果に関する研究:ランドスケープ研究66,889-892
- 5) 東京都港区は、インターネットに接続した「デジタル百葉箱」を区内に高密度に設置して、気象情報等を収集している。「デジタル百葉箱」は、学校・公園・その他公共施設の27箇所、地上高1.5mの箇所に設置されている。
- 6) 平成18年度における港区都市計画基礎調査データによると、港区における合計建物延床面積の7割を事業所建物の延床面積が占め、これらの事業所における建物延床面積の平均値を求めると約3,000m²となる。これを踏まえ本調査では、約3,000m²の事業所建物を港区における典型的な建物とした。
- 7) 事業所からの人工排熱について、「平成15年度都市における人工排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書(国土交通省・環境省)」において、建物から排出される環境への排熱を、空調排熱、燃焼排熱、換気排熱および下水排熱と大別し、熱源として、照明器具、OA機器、空調機器、換気装置、厨房機器、給湯施設、燃焼施設などの各種設備機器の稼動が挙げられている。
- 8) 「東京都建築物環境計画制度マニュアルー建築物環境配慮指針における評価基準と手法の解説(東京都環境局)平成17年9月」に記載の図4-1-1 人工排熱計算ツールで計算される建築設備からの排熱内容をもとに、建物からの人工排熱(下水排熱を除く)を集計すると、空調負荷による排熱が9割(90.1%)を占め、換気による排熱・ボイラーからの直接排熱などの排熱は1割(9.9%)に満たない。
- 9) 菅原広史・成田健一・三上岳彦・本髙毅・石井康一郎(2006):都市内緑地におけるクールアイランド強度の季節変化と気象条件への依存性:天気53(5),393-404
- 10) 菅原広史・清水昭吾・成田健一・三上岳彦・萩原信介(2010):都市内緑地における冷気にじみ出しの熱収支解析:社団法人日本気象学会大会講演予講集97,157
- 11) 萩島理・成田健一・谷本潤・三坂育正・松嶋篤・尾之上真弓(2004):大規模な階段状緑化屋根を有する建築物周辺の微気象に関する実測調査:日本建築学会環境系論文集577,47-54

(2011.4.23 受付, 2011.12.9 受理)