

特集 「快適な都市環境をめざして」

大規模商業施設屋上庭園における熱環境評価



赤川 宏幸



久保田 孝幸



小宮 英孝

市川 和男
(本店設備設計第一部)Evaluation of Thermal Environment at Rooftop Garden
of Large-Scale Commercial Building

Hiroyuki Akagawa Takayuki Kubota Hidetaka Komiya Kazuo Ichikawa

Abstract

The effects of a rooftop garden of a large-scale commercial building on both the indoor and the ambient thermal environments were studied from three standpoints. Firstly, the thermal insulation effect of the rooftop vegetation was estimated. Measurements of heat transmission through the ceiling slabs both with and without vegetation showed an approximately 4.5% reduction of the annual cooling load due to vegetation. Secondly, mitigating effects of the vegetation on the heat island were evaluated based on surface temperature measurements by an infrared camera made on fine days in summer. The difference between the sensible heat flux from the vegetation and that from the paved asphalt was up to 300 W/m² in the daytime, which is equivalent to a reduction in sensible heat emission from the whole rooftop garden by about 1.0 MW compared to the case where the rooftop garden is entirely covered with asphalt. Thirdly, since the rooftop garden is mainly planned for visitors, the thermal environment of resting places and the behavior of visitors in summer were observed. The cumulative number of visitors to the rooftop garden was negatively correlated to the accumulated solar radiation. The mean residence time of the visitors tended to be longer in the tree-shade than in the sun under strong solar radiation, while on cloudy days places without tree shade tended to be preferable and had longer mean residence time.

概 要

大規模商業施設の屋上庭園の屋内外熱環境を、三つの視点から実測的研究を行った。第一に、屋上緑化の省エネ効果について検討した。緑化部と非緑化部の天井断面における熱貫流量の測定から、年間冷房熱量の低減効果は約4.5%と推定した。第二に、夏季晴天日の屋上庭園全体のヒートアイランド抑制効果を、赤外線熱画像の温度情報から推定した。緑化部(高木)と非緑化部(アスファルト)において、大気に放出される熱の日中最大差は約300W/m²であった。屋上全体がアスファルト舗装であったと仮定した場合と比較すると、約1.0MWの削減量である。第三に、当該屋上庭園は主に訪問者のために計画されたことから、休憩箇所を中心とした夏季の温熱環境の評価と、ビデオカメラを用いた訪問者の行動調査を行った。屋上庭園の累積訪問者数と、夏季日中の積算日射量との間には負の関係が示唆された。また、日射量が大きい時間帯は、緑陰の平均滞留時間が、緑陰の無い場所と比べて相対的に長く、一方、曇天日には、緑陰が無い場所の方が平均滞留時間が長く、好まれる結果が得られた。

1. はじめに

東京都の屋上緑化条例等、都市ヒートアイランド対策としての屋上緑化が注目されている。同時に、建物最上階の省エネやヒートアイランドに直接影響する大気を暖める熱、及び軽量な薄層屋上緑化に適した植栽種の選定等の評価が、研究機関を中心に行われている¹⁾。一方、木陰の快適性や、癒しの効果といった、緑化本来の目的を中心に計画された屋上緑化も大規模都市建築を中心に

増えている。しかし、人間側から見た屋上緑化の評価は、件数も少なく、確立された手法も無いと言える。本報では、大規模屋上庭園において熱環境の側面から、いくつかの評価を試みた。まず、建物の省エネに関して、緑化部と非緑化部の熱貫流量の違いを調べた。次に、屋上庭園全体の夏季のヒートアイランド現象の緩和効果について調べた。最後に、当該建築物は大規模商業施設である点から、夏季における屋上庭園を訪れる客の行動と、緑化の形態、及び温熱環境との関連性を調査した。

2. 建物概要

当該商業施設は大阪市街地に立地し、延床面積約40,000㎡、屋上面積約8,000㎡、うち約3,300㎡が緑化されている。Photo 1に屋上庭園の夏季の様子を示す。庭園は最下階が2Fレベル、最上階が8Fレベルの北斜面の階段状を呈しており、平均勾配は16.3%である。庭園の西側には高さ約150mの高層棟が立つ。中央部2Fレベルには、隣接する鉄道駅舎からつながるキャニオン部があり、キャニオン最奥部には屋上庭園最上部の8Fレベルに直接上がるエレベータが設置してある。

Fig. 1に屋上の平面図を示す。地点A, Bは3章で示す貫流熱量の測定ポイントであり、A緑化部, B非緑化部を示す。地点 ~ はベンチ等がある休憩箇所を示し、この地点では4章に示す温熱環境の測定を行った。地点Sは9Fレベルにあり、地上高さ約40mである。図の範囲外であるが、地点Hとして当該建物の隣接する高層ビルの屋上にビデオカメラ、及び赤外線カメラを設置して適宜撮影した。

3. 屋上緑化による熱流量の低減効果

3.1 測定の概要

屋上緑化により屋上外部から天井を通じて室内に貫流する熱量が抑制されることによる、空調エネルギーの低減効果を確認するため、屋上緑化部と非屋上緑化部（カラーコンクリート）において、直下の天井スラブ下面（Fig. 2、温度測定）、及びその下のロックウール下面（温度測定）の表面温度の温度を計測し、それぞれの熱流量を評価した。計測は2003年8月～2005年3月にわたり行った。ロックウールの厚み双方とも25mmであり、熱伝導率は0.037kcal/mh とした。

3.2 天井スラブ下面温度の比較

Fig. 3に緑化部と非緑化部の天井スラブ下面の温度の2004年4月～2005年3月の変化を示した。非緑化部の天井スラブ下面温度が気温に追従するように小刻みにしかも大きく変化しているのに対して、緑化部の天井スラブ下面温度は緩やかに変化しており、年間を通して22～29℃と変化の幅が小さく、有効な断熱及び蓄熱層として機能している。

3.3 冷房時における貫流熱量の低減効果

夏季における天井のロックウールの上下面の温度より求めた貫流熱量の日変化をFig. 4に示した。夏季の冷房時における屋根から室内の方向へ流入する熱（貫流熱量）は、非緑化部と緑化部の貫流熱量の差（以下、貫流熱量差とする）の一時間あたりの最大値は（2004年7月9日20時）6.5 kcal/m²h（7.6W/m²）であり非緑化部6.5 kcal/m²h、緑化部0.0kcal/m²h、であった。営業時間10時～22時の積算による貫流熱量差の一日あたりの最大値（2004年7月9日）は58.3 kcal/m²であり、緑化部0.0 kcal/m²、

非緑化部58.3 kcal/m²であった。このように緑化部では夏季のピーク時であっても天井スラブから室内への熱の流入はほとんど無いという結果となった。

さらに年間の貫流熱量の変化をFig. 5に示した。冷房期間を5月1日から9月30日として、営業時間内のそれぞれの貫流熱量を積算すると、緑化部は-892 kcal/m²（-3.7MJ/m²）、非緑化部4,542 kcal/m²（19.0MJ/m²）とな



Photo 1 屋上庭園の様子（2004年8月3日撮影）
Rooftop Garden

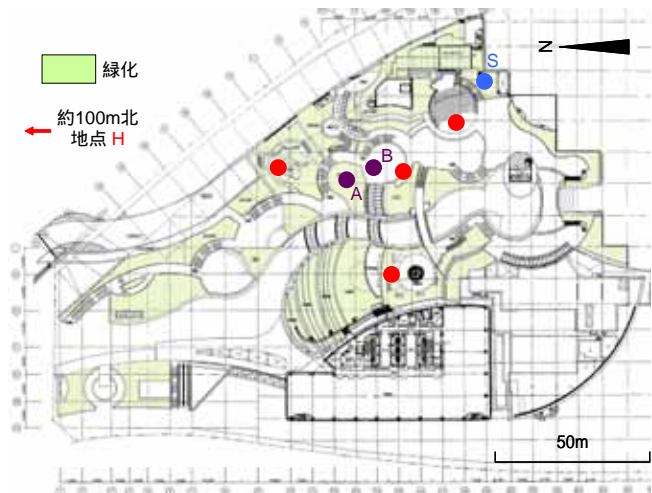


Fig. 1 屋上の平面図
Floor Plan of Rooftop

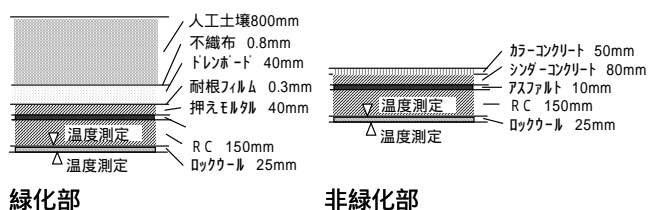


Fig. 2 緑化部と非緑化部の天井スラブ断面と温度測定部分
Cross Sectional Views of the Ceiling Slab with and without Vegetation

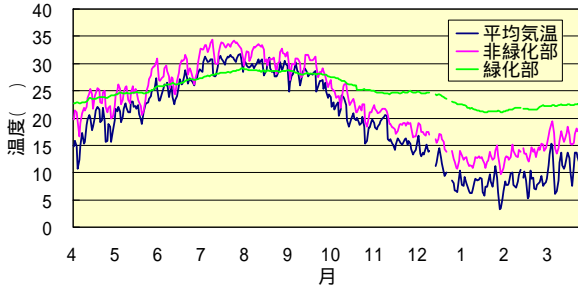


Fig. 3 天井スラブ下面の日平均温度の変化
(2004年4月～2005年3月)
Variation of Daily Mean Temperature of the
Underside of Ceiling Slab (2004/4～2005/3)

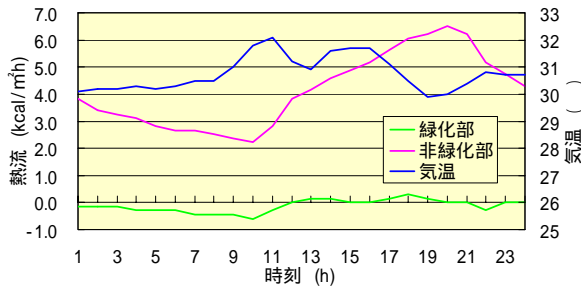


Fig. 4 天井スラブの熱流の日変化 (2004年7月9日)
Diurnal Variation of Heat Fluxes through Ceiling Slab
(2004/7/9)

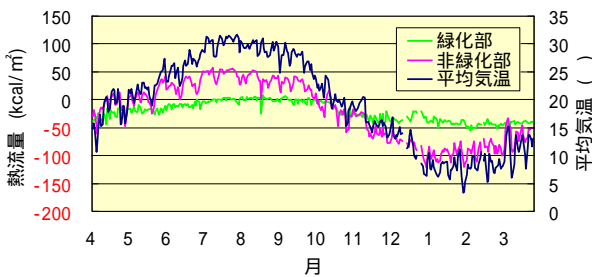


Fig. 5 日積算貫流熱量(営業時間内)の変化
Annual Variation of Daily Heat Transmission through
Ceiling Slab (Business Hours)

り、削減量は $5,434 \text{ kcal/m}^2$ (22.7 MJ/m^2)となった。これが冷房期間における屋上緑化による空調負荷の低減効果と見ることが出来る。

4. ヒートアイランド抑制効果

4.1 測定概要

4章、5章に共通の測定概要をTable 1に示す。測定期間は2004年8月2日午後から6日午前までで、期間中8/2、8/3は概ね晴天であったが、8/4以降は雲が多く、8/4の夜半には台風が通過した。

4.2 屋上庭園全体の熱画像

Fig. 6は隣接する高層ビルの屋上から、赤外線カメラ

によって撮影した、屋上庭園の熱画像である。Photo 2に熱画像の撮影領域(矩形)を示す。

(1)8/3 8:00 建物東面が朝の日射により温度が上昇している。高層棟右側の車道上に影が落ち、温度が低い。

(2)8/3 12:00 左側に位置するアスファルトの駐車場や鉄道軌道、右側の車道が高温となり、50以上を示している。また、密集街区の建物屋上面が高温となっている。一方、屋上庭園の大部分を占める緑化部分は日中でも35程度を示し、蒸散作用により表面温度の上昇が抑えられている。大気へ伝わる熱は、気温と表面温度の差に比例することから、緑化がヒートアイランドに寄与する熱を大幅に減らしていることがわかる。

(3)8/2 18:00 夕方になってもアスファルトが依然、緑化よりも5程度高い。

(4)8/2 22:00 概ね全ての表面温度が下がっているが、左側鉄道駅舎の上に設置してある冷却塔が、その稼働の状況により、温度が異なることが認められる。人工廃熱のヒートアイランド現象への寄与が画像から把握できる良い例である。

また、熱画像の撮影は10分間隔で行い、結果をムービー画像(熱画像ムービー.WMV)へと編集した。上記の一連の温度変化が把握でき、都市を覆う材料の違いによって、異なる温度変化の挙動を示すことがわかる。

4.3 各被覆材料の温度変化

Fig. 7は、10分間隔の熱画像から抽出された各材料の平均気温(領域平均)の日変化を示す。緑化部分の表面温度が、日中、夜間を通して気温と同程度を示しており、大気に伝わる熱が小さいことがわかる。一方、アスファルトは夜間も他の被覆よりも2~3温度が高い。

4.4 ヒートアイランド抑制効果の概算

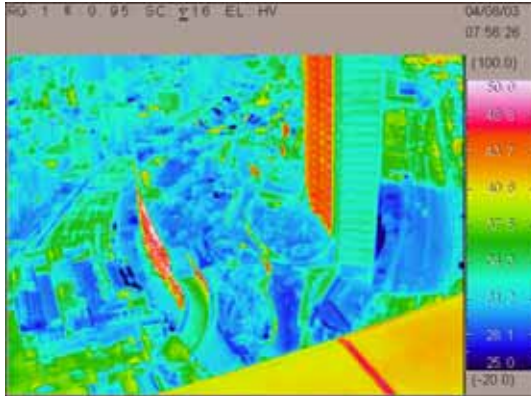
Table 2は表面温度、気温、風速から推定した、顕熱流束を示す。顕熱流束とは、大気を直接暖める熱で、式(1)(2)で表される。

$$HS = \alpha_c (T_s - T_a) \quad (1)$$

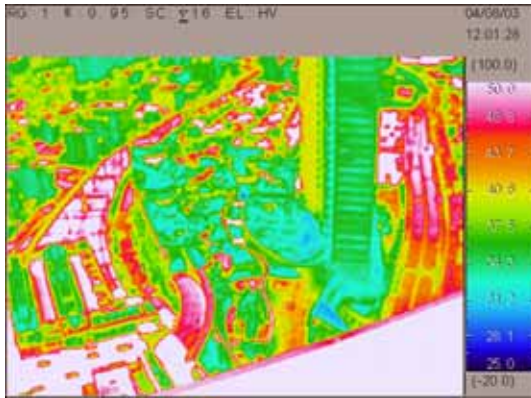
$$\alpha_c = 1.163 (5.3 + 3.6U) \quad (2)$$

Table 1 測定の概要(4章、5章共通)
Summary of Measurement (Chapter 4 and 5)

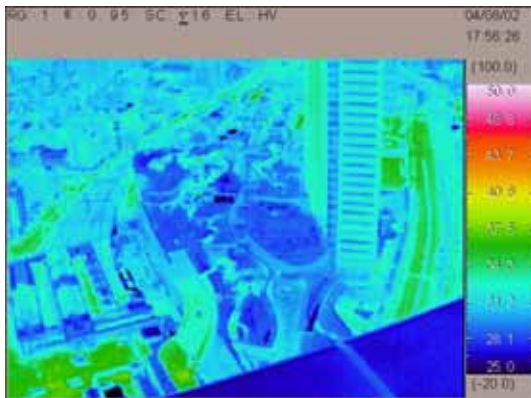
調査項目	地点	測定要素	測定器
温熱環境 移動測定 (8/3のみ)		気温	湿度温度計
		相対湿度	(HMI41/HMP45, VAISALA)
		グローブ温度	黒球 (直径15cm, 銅製)
		日射量	日射計(PCM-01, プリード)
一般気象(定点) (8/2-8/6)	S	気温・相対湿度 風向・風速・日射量	自動気象ステーション (MAWS201, VAISALA)
屋上全体の熱画像 (8/2-8/3)	H	赤外線熱画像	赤外線カメラ (TH9100MV, NEC 三栄)
人の動き (8/2-8/4)	H	ビデオ映像	デジタルビデオカメラ



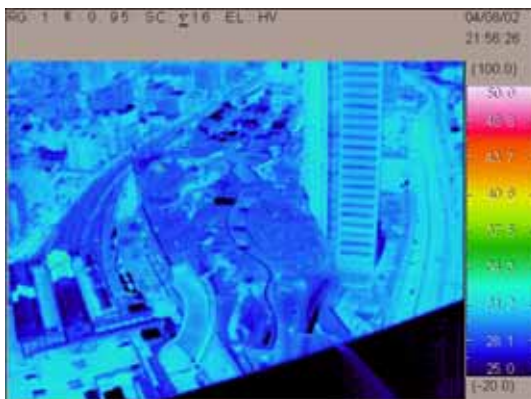
(1) 2004/8/3 8:00



(2) 2004/8/3 12:00



(3) 2004/8/2 18:00



(4) 2004/8/2 22:00

Fig. 6 屋上庭園と周辺の熱画像

Thermal Images of Rooftop Garden and Peripheral Area

ここで、 HS は顕熱流束 [W/m^2]、 T_s は表面温度 [°C]、 T_a は気温 [°C]、 α_c は対流熱伝達率 [W/m^2K]、 U は風速 [m/s]である。式(2)はユルゲスの式である。植栽からの顕熱流束は一般的に評価が難しく、厳密な熱収支を測定する必要があるが、ここでは平面での対流熱伝達に置き換えて概算する。

晴天日であった2004年8月3日12時10分には、アスファルト舗装は $338.4W/m^2$ と、非常に多くの熱を大気へと放出している。一方、緑化部は $37.2W/m^2$ とアスファルトの約 $1/9$ である。屋上庭園の緑化部を屋上標準舗装であるタイル舗装とした場合と比較すると、約 $1/3.6$ である。これを一日の積算値として算出すると、アスファルト舗装が約 $2,580Wh/m^2day$ 、タイル舗装が約 $1,300Wh/m^2day$ 、緑化が約 $-150Wh/m^2day$ となる。緑化は、一日を通して負となり、大気を冷やす方向に働いていると言える。



Photo 2 熱画像の撮影領域 (白枠)
Captured Area of Thermal Images (White Frame)

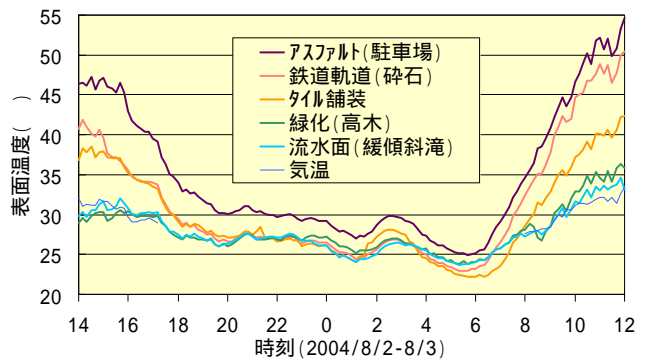


Fig. 7 熱画像から抽出した表面温度の日変化 (領域平均)
Diurnal Variation of Surface Temperature Extracted from Thermal Image (Area Average)

Table 2 顕熱流束の概算 (2004年8月3日 12:10)
Estimates of Sensible Heat Fluxes (2004/8/3 12:10)

	表面温度 (°C)	顕熱流束 概算値 (W/m^2)	緑化との差 (W/m^2)	緑化面積を 積算 (MW)
アスファルト(駐車場)	55.3	338.4	301.2	0.994
タイル舗装	42.2	134.6	97.3	0.321
緑化(高木)	35.9	37.2	-	-

顕熱流束は、気温 33.5 °C、風速 2.24m/s (地点 S) で計算

5. 屋上庭園の温熱環境

5.1 測定概要

温熱環境の測定概要はFig. 1, およびTable 1に示したとおりである。各地点における温熱環境の測定は2グループに分かれ、毎正時を挟む前後10分間内に行った。

5.2 WBGT (湿球黒球温度) の評価

一般的に屋上は熱的に過酷な条件であり、緑化空間であっても、遮蔽物が無ければ、高温環境である。また、当該屋上は回遊することを前提とした庭園であることから、快適性指標ではなく、運動に対する熱的危険度を示すWBGTを用いて評価した。WBGT (湿球黒球温度) とは、屋外においては式(3)で表される。

$$WBGT = 0.7 T_w + 0.2 T_g + 0.1 T_a \quad (3)$$

ここで、 T_w は湿球温度 (), T_g は黒球温度 (), T_a は気温 () を示す。黒球温度とは黒色に塗った直径15cmの中空銅球の中心温度である。評価地点である地点 ~ の天空写真をPhoto 3に示す。

Fig. 8は8/3の地点 ~ におけるWBGTの日変化を示す。地点 は高木の単木があるが、測定位置によって日射の当たり具合が異なり、休憩場所の環境を代表するデータを得ることは難しかった。地点 は最大200名程度座れるイベント広場であり、天空がほぼ完全に開けている。地点 は天空と周囲が高木に囲まれており、数名

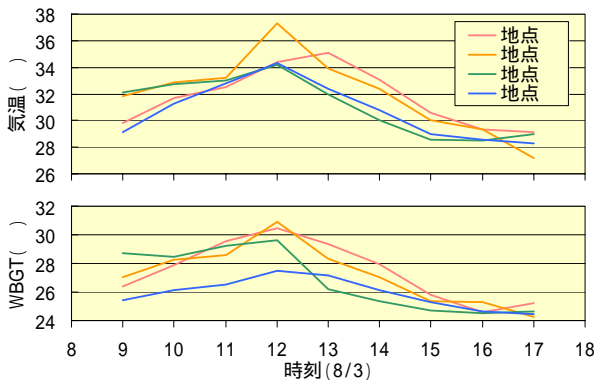


Fig. 8 WBGTの日変化 (2004年8月3日)
Diurnal Variation of WBGT (2004/8/3)

が座れるベンチがある。地点 の気温を比べると、午前中はほとんど差が無いが、13~14時頃は、地点 が約2.5 高い。一方、WBGTは樹陰の効果により、午前午後を通して差が見られ、地点 では日中も28 以下を推移した。熱中症予防の運動指針²⁾ではWBGT 28 以上では「厳重警戒」であり、体力の低いものは運動中止のレベルである。つまり、子供や高齢者が地点 の環境で歩き続けたり、階段を上り下りすることは危険だが、同時に地点 のようなWBGTが28 以下に保たれる緑陰が多く設けられており、適切な温熱環境空間と言える。

5.3 訪問者と各気象要素との関係

Fig. 9は客足が増す正午からの地点 における積算日射量と、累積訪問者数を示す。地点 は日射量を測定した地点S と隣接し、遮蔽物も無いことから、日射量はほぼ一致すると考えられる。訪問者数は地点H から撮影したビデオ映像から、地点に通じる出入り口を通過した人数を10分間隔でカウントした。8/2はほぼ晴れ、8/3は雲が多いながら晴れ、8/4はほぼ曇りである。いずれも平日であり、客層に大きな差は無かったものと考えられる。グラフから、積算の日射量が少ない日ほど屋上を訪ねる人の数が多いことが分かる。

Fig. 10は8/3の地点Sにおける日射量と、地点 における気温、WBGT、訪問者数を示す。16時頃に地点 ではイベントが行われ、訪問者数が増えているが、暑い時間帯の訪問者数に差は見られなかった。理由として、この屋上庭園が上階から斜面を下る一方通行型であることが

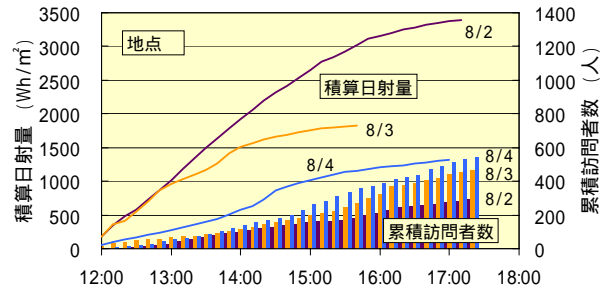


Fig. 9 12時から積算日射量と累積訪問者数 (地点)
Accumulated Solar Radiation and Cumulative Number of Visitors from Noon (Point No.1)



地点

地点

地点

地点

Photo 3 各地点の天空写真
Sky View Photos taken by a Fish-Eye Lens

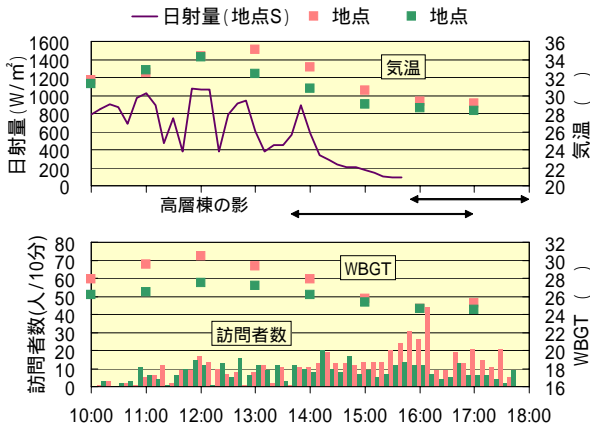


Fig. 10 地点 の日射量, 気温, WBGT, 訪問者数 (2004年8月3日)

Solar Radiation, Air Temperature, WBGT and Number of Visitors at Points No. 1 and 4 (2004/8/3)

挙げられ、緑の鑑賞を目的とする訪問者の多くが、各地点を順に通じたためであると考えられる。

Fig. 11は8/2, 8/4の地点 における日射量, 滞留者数, 及び平均滞留時間を示す。なお, 平均滞留時間 W は式(4)を用いて算出した。

$$L = \lambda W \quad (\text{リトルの公式}) \quad (4)$$

ここで, L は平均滞留者数, λ は単位時間当たりの入場者数を示す。なお, 両日も15時以降, 地点 においてイベントが行われ, 滞留者数, 平均滞留時間ともに増加している。

8/2, 12~14時の日射量大きい時間帯は, 地点 では滞留者数は少なく, 平均滞留時間も短かったが, 夕方にかけて日射量の減少とともに, 平均滞留時間が長くなった。一方, 曇天日(8/4)の地点 では12~15時の滞留者数が多く, 平均滞留時間も長かった。高木の遮蔽がある地点 では, 天気にかかわらず滞留者数, 平均滞留時間に明白な差は見られなかった。

Fig. 12は8/2, 8/4の地点 における, 日射量(地点S)と平均滞留時間との関係を示す。地点 では日射量と平均滞留時間との間に負の相関が見られた。一方, 地点 では, 曇天日(8/4)に平均滞留時間が小さくなる傾向が見られた。

6. おわりに

大規模商業施設の屋上庭園において, 建物の省エネ効果, ヒートアイランド抑制効果, 訪問者の温熱環境に関して調査, 評価を行った。今回のような大規模の屋上庭園においては, 上記三つの視点から熱環境の効果が期待できることがわかった。特に, 訪問者を中心に考えた屋上庭園である場合は, その温熱環境に配慮し, 高齢者等の熱的弱者が安心して滞在できる建築, 緑化計画が重要

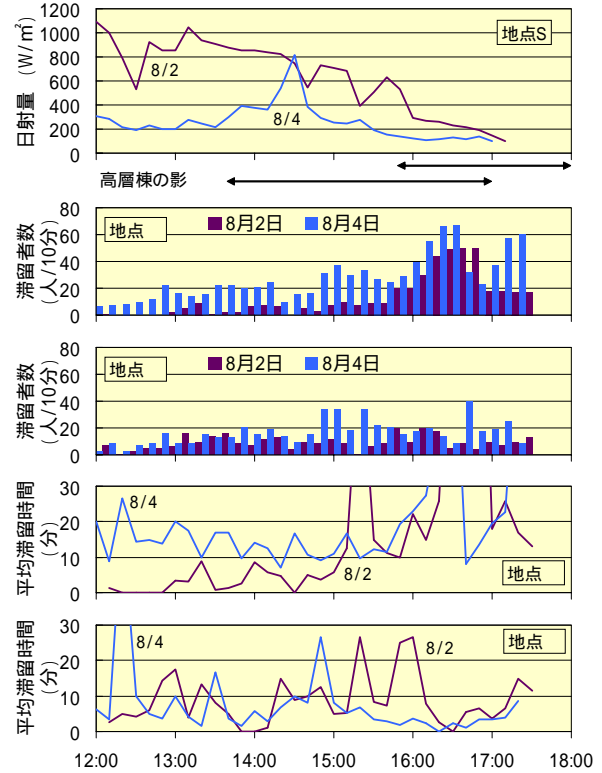


Fig. 11 地点 の滞留者数と平均滞留時間
Number of Residences and Mean Residence Time at Points No. 1 and 4

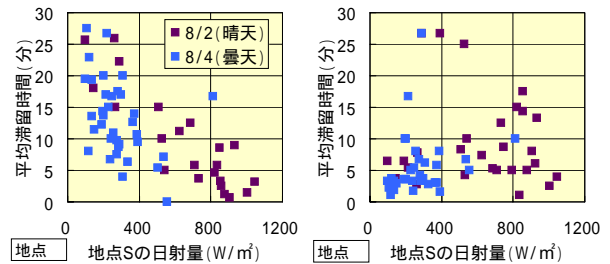


Fig. 12 日射量(地点S)と平均滞留時間の関係
Relationship between Solar Radiation (Point S) and Mean Residence Time

であることが示された。今後, このような大規模緑化施設の普及に伴い, 設計段階において温熱環境を評価することが望まれる。そのためには, 評価データの蓄積と, 予測手法の確立が課題である。

謝辞

測定にあたり, 南海都市創造㈱ご担当者の多大なるご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 横山 仁他: 屋上緑化のヒートアイランド緩和効果, 東京都環境科学研究所年報, pp.3~10, (2004)
- 2) 日本体育協会, 熱中症予防のための運動指針