

建物間の空地形態が熱環境に及ぼす効果

Impact on the Thermal Environment of the Type of Open Space

粉川大樹 *
Hiroki KONAKAWA

久保田孝幸 **
Takayuki KUBOTA

花本啓祐 *
Keisuke HANAKI

浦野明 *
Akira URANO

ABSTRACT : The impact of layout of buildings and open space on thermal environment in district scale was studied. Two kinds of field observation was performed in the open spaces at Hongo Campus of Tokyo University. Impacts of the various surfaces and open space, those of designed space as a sunken garden and a piling were evaluated. Wind speed is influenced by openness of the district. The open space surrounded by artificial structure tends to create unpleasant thermal environment.

KEYWORDS : Open Space, Thermal Environment, Field Observation

1 序論

一般的に都市化が進むと、人口の集中、地表の人工物化、生活空間の地上・地下への拡大などの現象が見られるが、それに付随するように気候改変もまたもたらされる。気候改変の中で最も顕著に見られる現象は、都市域の気温が周辺地域よりも高くなるヒートアイランド現象である。ヒートアイランドに代表される気候改変は、居住環境の悪化を招き、近年高まりつつあるアメニティの確保の考え方に相反するものである。都市空間を質的に向上させるためには、人為的に生じた都市の熱環境を改善する必要がある。しかし、一度出来上がった都市を全面的に変えることは不可能であり、現実的な方法としては街区スケールの再開発に伴って徐々に改善していくことが妥当である。日常生活においても建物や道路と水辺や芝地の差や日向・日陰の差は容易に体験できるように、建物の構成を変えていくことや自然的環境を取り入れていくことで、都市気候を緩和していくことは期待できる。

しかし、このような熱環境緩和効果を実際の都市に活かすためには、微気候の実態を解明しなければ都市計画を行う上で最適な配置を考案することはできない。そこで、本研究では建物間に作り出される空地形態の違いが微気候に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2 評価方法の基礎理論

熱環境は人の温熱感覚によって評価されることが妥当であり、温熱環境評価指標を用いて評価する。その

中で、屋外環境でも適用できるSET*を本研究では用いた。また微気候の各々の要素として、特に放射環境についても個別に評価する。

2.1 温熱環境について

標準新有効温度(SET*)は、環境側要素の気温、放射、湿度、気流と人体側要素の着衣量、代謝量をすべて考慮できる温熱環境の評価指標である。SET*は、人体の体温調節をモデル化したTwo-Nodeモデルにより、ある環境下での平均皮膚温度とぬれ率を求め、皮膚表面から同じ熱損失を生じさせる作用温度と水蒸気圧との組み合わせにより導き出せる新有効温度(ET*)を、任意の代謝量、着衣量における温冷感、快適感を直接比較するため、椅座静位、着衣量0.6clo、静穏気流、平均放射温度=空気温度という標準状態で定義される。ASHRAE St.55-74において室内における温熱的中立域を与えるSET*の範囲は22.2~25.6℃とされており、ここではこの範囲を快適域とする。また、本研究におけるSET*の計算は1986年のGaggeらの論文に示されるプログラムを基にしている。

SET*を求めるための人体側の要素の着衣量は夏は0.5clo、秋は0.75clo、冬は1.0cloとした。また代謝量は1.2metとした。

2.2 放射環境について

定常状態における中空金属球の熱平衡式に基づき、同一気象条件下におかれた日射吸収率の異なる2個のグローブ球の測定値から、測定点のグローブ球に入射

* 東京大学 : Univ. of Tokyo

** 東京大学、大林組 : Univ. of Tokyo, Obayashi Co.

する短波放射量、長波放射量を算出することができる。熱平衡式は次のようになる。

$$\alpha_i S + h(\theta_a - \theta_i) + \varepsilon_i L - \varepsilon_i \sigma T_i^4 = 0$$

α_i : 球面の日射吸収率 ε_i : 球面の長波放射率

σ : Stefan-Boltzman 定数 h : 球の対流熱伝達率

S : 球に入射する短波放射量 (W/m^2)

L : 球に入射する長波放射量 (W/m^2)

θ_i : 球心温度 [$^{\circ}C$] T_i : $\theta_i + 273$ [K]

θ_a : 外気温 [$^{\circ}C$]

グローブ球は梅干野らによるものと同様のものを使用した。球面の日射吸収率と球面の長波放射率は、その値を適用する。それぞれ、黒球は0.84と0.92、白球は0.20と0.92となる。

3 観測概要

3.1 観測地点

観測対象地域は、近距離内に様々な空地が存在する東京大学本郷キャンパスを選定し、2種類の観測を1996年の夏季から冬季にわたり実施した。

観測1: 図書館前A (人工被覆面・閉鎖的空間)

安田講堂 (自然被覆面・開放的空間)

三四郎池 (自然被覆面・閉鎖的空間)

御殿下グラウンド (人工被覆面・開放的空間)

観測2: 図書館前A

図書館前B (樹陰・単木)

文学部3号館A (サンクンガーデン)

文学部3号館B (ピロティ)

観測1は、被覆面 (自然・人工) と開放度による違いが微気候に及ぼす影響を評価し、観測2は、サンクンガーデン・ピロティといったデザインされた空地の効果を評価することを目的とする。測定地点の概要を表1に示す。ここでは、魚眼レンズを用いた写真法により各値を求めている。

表1 測定地点概要

	天空率 (%)	緑葉率 (%)	自然被覆率 (%)
図書館前 A	36.8	37.3	5.3
	3.6	73.9	29.2
安田講堂	63.2	13.7	85.3
三四郎池	12.6	82.8	100.0
御殿下グラウンド	68.1	3.5	4.6
文学部3号館 A	22.6	22.7	20.6
	21.5	19.6	0.5

3.2 測定機器と測定方法

観測は、9時から18時まで90分おきに表2の測定項目、風速・湿度・気温・黒球グローブ温度・白球グローブ温度を測定した。風速・湿度・気温についてはマルチ観測器を用いて移動観測を行った。風速は1分

間の平均値を、湿度・気温は瞬時値を計測した。グローブ温度計は中空金属球に水銀温度計を差し込んだものを使用し、測定時に球心温度を目視で読み取った。グローブ温度計は安定するまで時間を要するため、測定地点に固定して設置した。機器の詳細については表2に示す。

表2 測定機器

測定項目	測定方式	測定範囲	精度
風速	熱式	0~10.00m/s	$\pm 0.1m/s$ (0~5.0m/s) $\pm 0.2m/s$ (5.0~10.0m/s)
湿度	静電容量方式	2.0~98.0%RH	$\pm 1\%RH$
気温	サーミスタ	-40.0~70.0 $^{\circ}C$	$\pm 0.1^{\circ}C$ (-20~50 $^{\circ}C$) $\pm 0.2^{\circ}C$ (50 $^{\circ}C$ ~)
黒球グローブ温度	黒球・水銀温度計	-20.0~50.0 $^{\circ}C$	
白球グローブ温度	白球・水銀温度計	-20.0~50.0 $^{\circ}C$	

4 測定結果と考察

4.1 概要

測定は主に熱環境上問題となる夏季と冬季に行った。しかし、一方で夏季から冬季にわたって微気候の季節変化も把握するために、観測1に関しては秋季の測定も行った。表3に測定日の一覧を示した。

表3 測定日

	夏季	秋季	冬季
観測1	7/27, 28, 8/3, 4	10/19, 20	12/21, 22
観測2	8/16, 17, 9/15		1/11, 12

測定日の中で晴天日もしくは晴天に近い日について結果に示した。結果に関しては、風速・気温・湿度の測定項目に加え、SET* (風速・湿度・気温・黒球グローブ温度より算出)、短波放射量、長波放射量 (黒球グローブ温度・白球グローブ温度より算出) についてそれぞれ平均値と最大値を求めたものを表にまとめた。

4.2 被覆面と開放度の影響 (観測1)

(1) 夏季

7月28日の測定値を表4に示す。

風速は天空率の高い安田講堂と御殿下グラウンドが大きく、天空率の低い図書館前と三四郎池は小さい。気温は平均値では地表面が人工舗装である図書館前と御殿下グラウンドが高く、最大値ではこの2地点に加え、開放度の高い安田講堂がほぼ同値となっている。一方、開放度の低い三四郎池は平均値・最大値とも最も低い。短波放射量は天空率の低い三四郎池が非常に低く、その他の3地点は強い日射を受けていることが分かる。長波放射量は人工舗装で、閉鎖的である図書館前が直達日射を受けることから他の地点に比べ高く

なっている。SET*は、直達日射を受け、風通しの悪い図書館前で最大値38.8℃に達した。次いで風通しは良いが、人口被覆面をもつ御殿下グラウンドが高い。

(2) 冬季

12月22日の測定値を表6に示す。
風速は夏季と同様天空率の高い2地点が大きくなっている。気温は太陽高度が低くなるため、冬季には直達日射を受けない図書館前で低くなっている。また、南側を落葉樹で覆われている三四郎池は、冬季には南側が開けるため最大値が高い。短波放射量は前述の理由から、図書館前で非常に低くなっている。長波放射量は天空率の高い安田講堂と御殿下グラウンドが天空放射の影響から低くなっている。SET*は南側が開け、風速の小さい三四郎池が平均値・最大値とも高く、最も快適な空間と言え、反対に直達日射の当たらない図書館前は不快な空間と言える。

(3) 季節変化

秋季の結果(表5)を含めて、季節変化により生じる熱環境の変化について考察する。
風速は開放的空間である安田講堂と御殿下グラウンドが季節を通じて大きい。日射の情報を含む短波放射量は冬季になるに従い太陽高度が低くなるため小さくなるが、図書館前は南側に図書館があるためこの影響を非常に受け、短波放射量は激減している。一方で、季節変化により南側が開けてくる三四郎池は短波放射量は季節を通じて変化がほとんどない。長波放射量は閉鎖的な空間である図書館前と三四郎池が季節を通じて大きい。

4.3 デザインされた空地の効果(観測2)

ここでは図書館前Aに関しては図書館前、図書館前Bに関しては図書館前樹陰、文学部3号館Aに関してはサンクンガーデン、文学部3号館Bに関してはピロティと表現する。

(1) 夏季

気温の上昇は少なかったが、午後から晴天となった8月17日の測定値を表7に示す。
風速は図書館前が平均値では他の地点に比べ大きい。最大値ではサンクンガーデンが最も大きい。気温は平均値では測定地点ごとの差は少ないが、最大値は樹陰が西日の影響で最大となっている(3:00の測定データ)。短波放射量は一日を通じて日当たりの良い図書館前が大きく、日射の当たる時間の短い図書館前樹陰とサンクンガーデンは小さくなっている。長波放射量は西側以外を人工物で囲まれたピロティが西日が

よく当たることから平均値・最大値とも測定地点の中で最も大きな値を取る。SET*は一日を通して日の当たる図書館前が高い。またほとんど一日中木陰になっ

表4 観測1(夏季7/28)

		図書館前	安田講堂	三四郎池	御殿下グラウンド
風速 (m/s)	平均	0.91	1.92	0.92	1.81
	最大	1.25	2.56	1.62	2.51
気温 (℃)	平均	32.3	31.7	31.2	32.2
	最大	34.0	34.0	32.7	34.3
絶対湿度 (10E-3kg/kg)	平均	19.4	18.6	18.5	18.5
	最大	20.6	19.8	19.1	19.1
SET* (℃)	平均	34.6	32.2	32.1	32.8
	最大	38.8	34.3	34.3	35.6
短波放射 (W/m2)	平均	172.5	184.5	89.7	226.8
	最大	285.9	298.3	253.2	354.9
長波放射 (W/m2)	平均	488.2	476.9	469.5	467.5
	最大	504.3	490.6	505.4	502.9

表5 観測1(秋季10/19)

		図書館前	安田講堂	三四郎池	御殿下グラウンド
風速 (m/s)	平均	0.81	1.54	0.64	1.13
	最大	1.20	2.56	1.10	1.49
気温 (℃)	平均	20.6	21.0	20.3	21.5
	最大	22.5	23.1	23.6	23.9
絶対湿度 (10E-3kg/kg)	平均	9.6	9.8	9.8	9.8
	最大	11.1	11.1	11.0	11.0
SET* (℃)	平均	21.3	20.9	21.1	21.6
	最大	26.1	25.2	25.1	25.0
短波放射 (W/m2)	平均	83.5	149.3	65.0	111.8
	最大	211.7	305.0	190.7	262.4
長波放射 (W/m2)	平均	411.1	395.5	409.8	408.9
	最大	419.0	406.9	424.3	419.5

表6 観測1(冬季12/22)

		図書館前	安田講堂	三四郎池	御殿下グラウンド
風速 (m/s)	平均	0.74	1.49	0.67	1.33
	最大	1.28	2.41	1.42	1.62
気温 (℃)	平均	10.5	11.3	11.2	11.3
	最大	12.5	12.5	14.3	13.2
絶対湿度 (10E-3kg/kg)	平均	3.9	4.1	4.1	4.2
	最大	4.8	4.9	5.4	4.8
SET* (℃)	平均	12.4	13.4	14.3	13.6
	最大	16.5	17.4	18.7	16.8
短波放射 (W/m2)	平均	21.3	117.2	71.5	136.3
	最大	65.1	210.5	230.4	273.2
長波放射 (W/m2)	平均	341.8	329.7	344.3	333.7
	最大	347.9	345.1	358.8	352.0

表7 観測2(夏季8/17)

		図書館前	図書館前樹陰	サンクンガーデン	ピロティ
風速 (m/s)	平均	1.29	1.16	1.13	1.10
	最大	2.26	1.65	2.37	1.70
気温 (℃)	平均	29.9	29.7	29.5	29.6
	最大	31.7	33.2	31.0	31.6
絶対湿度 (10E-3kg/kg)	平均	15.5	15.3	14.9	15.0
	最大	17.6	16.7	16.4	16.3
SET* (℃)	平均	29.7	27.8	28.0	29.3
	最大	34.0	32.9	30.8	32.5
短波放射 (W/m2)	平均	122.2	52.9	51.9	84.4
	最大	334.6	124.9	88.0	198.2
長波放射 (W/m2)	平均	479.1	471.7	478.1	482.2
	最大	498.1	486.2	494.7	513.5

ている図書館前樹陰は平均値では最低になっているが、西日の当たる時間帯（3:00）があるために、最大値では図書館前に次ぐ値となっている。

(2) 冬季

1月11日の測定データを表8に示す。

風速は図書館前樹陰で高く、冬季においてはこの地点は風の通り道になっていることがわかる。気温は短波放射量の結果を見てもわかるように、どの地点も日射がほとんど当たらないが、中でも最も短波放射量の高い図書館前で高くなっている。長波放射量はこの測定地点の中で天空の開放度の最も高い図書館前が他の3地点に比べ低い結果になっている。SET*は平均値では風速の小さい図書館前、サンクンガーデンで高く、最大値では西日を受けるピロティが最も高くなる。

5 結論

夏季から冬季にわたって、建物間に存在するさまざまな形態の空地において観測を2種行った。空地形態の違いが熱環境に及ぼす効果を調べた。その結果以下のことがわかった。

(1) 風速に対しては、開放度の影響が大きい。観測1を見ると、天空率の高い安田講堂と御殿下グラウンドは、天空率の低い図書館前Aと三四郎池よりも約2倍風速は大きい。しかし一方で図書館前樹陰は、天空率が非常に低いにもかかわらず冬季には風速が大きいこ

表8 観測2（冬季1/11）

		図書館前	図書館前樹陰	サンクンガーデン	ピロティ
風速 (m/s)	平均	0.76	1.36	0.77	1.18
	最大	1.26	2.41	1.04	2.09
気温 (℃)	平均	9.1	8.2	8.4	8.4
	最大	12.1	9.8	9.8	9.9
絶対湿度 (10E-3kg/kg)	平均	2.1	2.1	2.1	2.1
	最大	2.3	2.2	2.2	2.2
SET* (℃)	平均	10.3	8.7	10.2	9.5
	最大	12.1	10.3	11.8	12.4
短波放射 (W/m2)	平均	19.2	6.5	13.5	12.1
	最大	55.4	13.3	38.2	22.8
長波放射 (W/m2)	平均	328.8	347.3	343.4	344.9
	最大	349.7	354.3	366.9	356.2

とから、周辺の建物の配置や季節による主風向も空地の風通しの構成要素となっていることがわかる。

(2) 図書館前Aのような人工物で覆われた空間は夏季は熱がたまり暑熱環境、冬季は冷気がたまり寒冷環境となる。三四郎池のような自然物に覆われた空間はその反対の環境条件となる。さらに三四郎池は南側に落葉樹、北側に常緑樹が配置され、冬季においては北風を防ぐ機能も持つ。このような樹木の配置は快適性を高める上で1つの有効な手段となる。

(3) 図書館前樹陰、サンクンガーデン、ピロティは、周辺の建物配置により日が当たる時間が異なる。その傾向は特に西日を受ける図書館前樹陰、ピロティで見られた。デザインされた空間は、それがどの方位に配置されるかにより一日のサイクル中にも大きな微気候の変化が生じる。

<参考文献>

- ・石井昭夫：街路空間における緑蔭の熱環境効果、日本建築学会環境工学委員会都市エネルギー小委員会シンポジウム、pp15-18、1995
- ・石井昭夫、片山忠久、塩月義隆、吉水久雅、安部嘉孝：屋外気候環境における快適感に関する実験的研究、日本建築学会論文報告集、No.386、pp28-36、1988
- ・磯田憲生：温熱環境（2） 温熱環境の評価指標（その1）、空気調和・衛生工学、69-12、pp993-998、1995
- ・片山忠久：水面・緑地が都市の熱環境におよぼす効果の定量化に関する総合的研究、平成5年度科学研究費補助金研究成果報告書、1994
- ・神田学、土屋信夫：微気候観測にもとずいた屋外における人体の熱環境解析、土木学会論文集、No.509/II-30、pp35-44、1995
- ・坂井庄太郎、西田勝、北山広樹：地表面被覆の異なる市街地と公園緑地の熱環境、九州産業大学工学部研究報告、vol.30、pp233-240
- ・西安信：温熱生理学、理工学社、1981
- ・梅干野晃、八木澄夫、木村剛久：建築外部空間における各種植栽により形成される熱環境の位置付け、日本建築学会計画系論文報告集、No.433、pp1-10、1992
- ・堀越哲美：温熱環境の評価（3） 温熱環境の評価指標、空気調和・衛生工学、70-1、pp65-71、1995
- ・A.P.Gagge et. al. : A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment、ASHRAE Transactions 92-2B、pp709-731、1986