

微気候からみた街区形態の評価に関する研究

Study on Evaluation of Building and Site Planning from the point of Micro-Climate

久保田孝幸*・花木啓祐**・浦野明**・粉川大樹**・小宮英孝***
Takayuki KUBOTA*, Keisuke HANAKI**, Akira URANO**,
Hiroki KONAKAWA**, Hidetaka KOMIYA***

ABSTRACT : In this study, the impacts of the construction on the micro-climate of the open space were compared and evaluated by field observation. Four kinds of field observation about micro-climate were carried out in the open spaces at Hongo Campus of the University of Tokyo and office area in Chiyoda Ward. Accordingly environmental conditions which were building density, building orientation, enclose type building and presence of thermal pollution were varied. It was made clear through this study that the thermal conditions of open spaces depend strongly on the layout of buildings and components such as vegetation, open water and so on. The application of this study to designing open spaces in developments is also discussed.

Key Words ; micro-climate, open space, site planning, Standard New Effective Temperature

1. はじめに

人口の集中、地表のコンクリート化、生活空間の地上・地下への拡大は、気候改変をもたらす熱環境を悪化させる。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、現実的に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考えられる。

市街地空間内での微気候の形成と人体の温熱感に関する研究には、山口・小林¹⁾、J.E.Burt²⁾、中村・平岡³⁾、石井・片山⁴⁾、神田⁵⁾らの研究がある。しかし、これらの研究では市街地における微気候の違いをもたらす要因として、主にキャビティの方位、アスペクト比、あるいは緑被などの材質に注目しており、一般的な市街地の再開発においてとられる街区形態と微気候の関係および評価方法については十分に論じられていない。

本研究では、市街地街区における微気候を簡易に評価するためには、街区スケールでの微気候の形成および人体への影響を測定することが不可欠と判断し、街区形態別の測定を行い、微気候と街区形態の関係を明らかにするために、街区形態の指標と測定結果について定量的な評価を行うことを目的とする。

2. 観測概要

2.1 観測地域及び観測点

観測は平成8年度夏季及び冬季に、測定点ごとの場の気象の差異を出来るだけ小さくするため、比較的狭い範囲内に、さまざまな街区の形態が存在すること、測定器の設置

の問題などから、東京大学本郷キャンパス内で行った。また、キャンパス内と実在の市街地との差異を把握する目的から東京都千代田区神田において、一部測定を

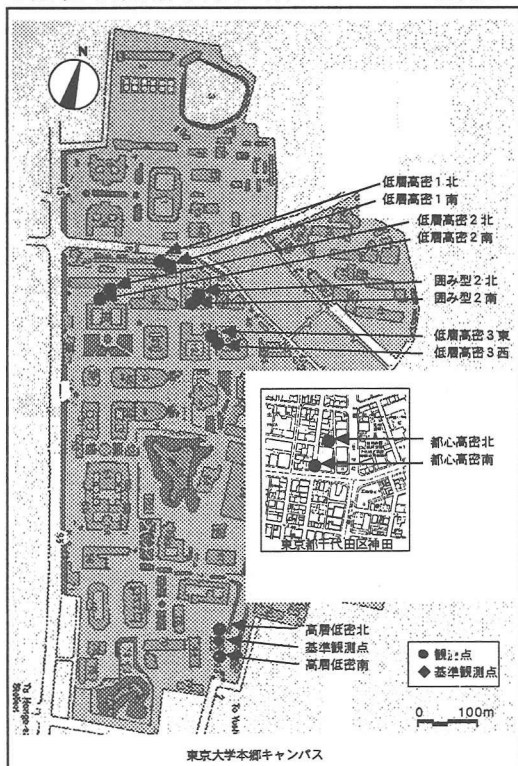


図1 測定地点

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

行った(図1)。観測地点は街区形態による影響を比較するため、周囲に緑地や水面など暑熱環境を緩和するものが少ない場所とした。観測地点として、高層で建蔽率が低い本部庁舎(12F)の南北面の空地(高層低密)、低層で建物密度が高い地域として、工学部7号館北の道路の南北(低層高密1)、工学部1号館と5号館の間の道路の南北(低層高密2)、工学部2号館東の道路の東西(低層高密3)、工学部4号館中庭の南北(囲み型)および、千代田区神田の某事務所ビルの南北面(都心高密)を選定した。測定は高さ $h=1.2\text{m}$ 、壁面より約 1.5m において行った。測定地点の概要を表1に示す。

2.2 観測方法

街区スケールにおいて街区形態による微気候への影響を評価するためには、建物の影響などが時間とともに変化することから、系時変化を詳細にとらえるとともに、多くの観測数が必要であると考え固定観測とした。しかし、一日にとれる測定点は数が限られているので、測定日の異なるデータの気候変動の影響を取り除いて全地点についての測定結果を比較するため、2地点においては常時測定を行い、もう1地点を変更していき、その比較の中で各点の測定結果を考察することとした。また、測定項目については温熱環境の評価として標準新有効温度(SET*)及び、受熱放射量を評価するために、風速、風向、湿度(相対湿度より絶対湿度を算出^{注2)})、気温、グローブ温度(黒)、及び後述するグローブ温度(白)の6項目について測定する。測定装置は図2のようにスタンドに表2の測定機器を気温、湿度に関しては高さ 1.2m に、白色のフィンを有する直径 15cm の自然通風筒の内部に、風向・風速、グローブ温度については高さ 1.5m に取り付けた。夏季には市街地における建物や路上からの放射をうける歩道状の空間の熱環境の改善が必要と思われる。そこで、予備観測を本部庁舎南で行ったところ、壁面より 2m 、高さ 1.5m の位置でも、基準となる屋上との気温差が夏季の日中において 0.5°C 程度みられた。これは建築物の影響によるものと思われる。また、都心における人の立ち入れる空地のほとんどは歩道や歩道状の空地であり建物の近傍に位置している。これらのことから、各街区における微気候の測定地点を壁面より $1\sim2\text{m}$ で、建物のほぼ中心の位置とし、ビル風などの特別な影響の少ないところとした。

グローブ温度計を用いた平均放射温度の測定に関しては、サンプリング間隔について、中村ら⁷⁾によりその問題点が指摘されているものの、その測定の簡易さから平均放射温度を求めるためにグローブ温度計を用いているため、定常状態として扱えるよう30秒間隔で測定したデータを30分間平均し評価することとした。

各測定点の測定値との比較および、測定日の異なるデータについて日々の気候変動を取り除き、街区形態による影響を抽出するため、東京大学の本部庁舎の屋上(高さ約 53m)において、表2の項目について測定を行った。サンプリングは1秒間隔で行ない30分間の平均値を算出した。

表1 測定地点の概要^{注1)}

		建蔽率	容積率	高さ	自然被覆率	天空率	南天空率	北天空率
高層低密 (本部庁舎)	南1	19.3	152.1	51.4	9.7	36.4	33.8	2.6
	南2					28.5	17.1	11.3
	北1					33.1	2.6	30.5
	北2					30.9	1.6	29.3
低層高密1 (工学部7号館北)	南北	34.6	159.0	16.4	9.8	19.5	16.0	3.5
低層高密2 (工学部5号館南)	南北	53.6	236.7	30.3	3.3	17.8	13.6	4.2
	南北					17.0	4.5	12.5
低層高密3 (工学部2号館東)	東西	39.2	117.7	19.6	6.2	23.1	12.2	10.9
	東西					21.0	11.2	9.8
囲み型 (工学部4号館)	南北	40.2	156.6	24.0	5.3	14.3	13.0	1.3
	南北					14.7	4.3	10.4
都心高密 (神田町町並ビル)	南北	43.6	301.0	31.0	0.7	23.0	14.7	8.3
	南北					20.8	3.8	17.0

単位：高さ(m)、その他(%)

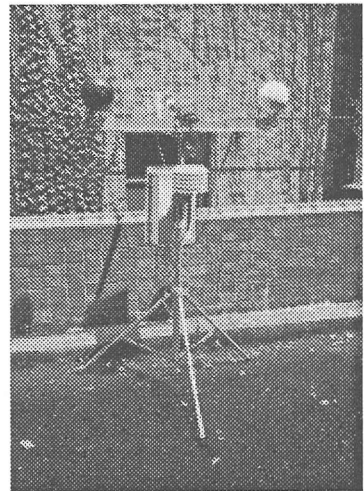


図2 測定装置(固定観測)

表2 測定機器(街区の測定)

測定項目	測定方式	測定範囲	精度
風向	三杯式風向風速計	0~360°	±4°
風速		0~45m/s	10m/s以下 0.1m/s 10m/s以上 1.1m/s
湿度	高分子抵抗式+自然通風筒	0.2~100%RH	±2%RH (0~90%RH) ±3%RH (90~100%RH)
気温	T型熱電対 (0.3mmφ)+自然通風筒	-200~200℃	
黒球温度	黒球 (φ15cm)+T型熱電対 (0.3mmφ)	-200~200℃	
白球温度	白球 (φ15cm)+T型熱電対 (0.3mmφ)	-200~200℃	

表3 測定機器(基準値の測定)

測定項目	測定方式	測定範囲	精度
風向	三次元超音波パルス方式	0~360°	±1%以内
風速		0~±30m/s	±1%以内
湿度	高分子抵抗式+自然通風筒	20~95%RH	±3%RH
気温	白金抵抗式+自然通風筒	-10~60℃	±0.5℃
放射収支量(北面・南面)	通風風防型		±5%
日射量	ネオ日射計		0.1%/℃

2.3 微気候の評価手法

微気候の評価については、微気候の測定データと、関連する温熱環境を標準化し、温度という理解しやすい指標で表わすことの出来る標準新有効温度 (SET*) を用いることとする。また、特に夏季における建物などの壁面や地面からの放射などの影響を把握するため受熱放射量について評価することとする。

(1) 標準新有効温度 (SET*)

標準新有効温度 (SET*) は、環境側要素の気温、放射 (グローブ温度 (黒) より平均放射温度を算出^③)、湿度、気流と人体側要素の着衣量 (clo^④)、代謝量 (met^⑤) 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 Si.55-74^⑧) 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℃、伊藤・深井ら^⑨) の日本人被験者を用いた実験結果では 21.6~25.6 とされている。屋外環境下では温熱的中立域を与える SET* は山下・石井ら^⑩) の 28.1℃、谷本ら^⑪) の 25.6℃と高めになることが示されているが、ここでは ASHRAE の基準の範囲を快適域とする。また、本研究では SET* の計算は Gagge ら^⑫) によ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、冬は 1.0clo とした。また代謝量は 1.2met とした。

(2) 受熱放射量

SET* は総合的な指標であるため、微気候の各々の要素が温熱感に与える効果を個別にみるのには適していない。街区の形態の変化は、放射や気流に大きな変化をもたらすと考えられる。気流に関しては、ビル風などの問題から解析及び対応が進んでいる。しかし、放射に関しては、夏季における壁面や道路からの長波放射が問題とされているにもかかわらず、対応策が十分には示されていない。そのため実空間における放射を個別に評価することは有用であると考えられる。その点に関し、中村、石井ら^⑦) は温熱感に対する放射量を算出する場合には、人体形状や人体表面の日射吸収率を考慮する必要があるという指摘をしている。しかし、測定における簡易さと、各人で変化する行動や服装をつけている人体ではなくここでは街区形態そのものの効果を見るため、グローブ球に対する放射量について評価することとする。

定常状態における中空金属球の熱平衡式は次のようになる。

$$\alpha_i S + h (\theta_a - \theta_i) + \varepsilon_i L - \varepsilon_i \sigma T_i^4 = 0 \quad (1)$$

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^⑥)
 S : 球に入射する短波放射量 (W/m²)
 L : 球に入射する長波放射量 (W/m²)
 θ_i : 球心温度 [°C] T_i : $\theta_i + 273$ [K]
 θ_a : 外気温 [°C]

上記の熱平衡式から、同一気象条件下におかれた日射吸収率の異なる 2 個の中空金属球の測定値を用いることにより、測定点のグローブ球に入射する短波放射量、長波放射量を算出することができる。グローブ球の α_i と ε_i は、梅干野ら^⑬) を参考にし、それぞれ、黒球は 0.84 と 0.92、白球は 0.20 と 0.92 を用いた。

3. 観測結果及び考察

3.1 概要

測定は夏季 (1996 年 7 月~9 月) と冬季 (1996 年 12 月~1997 年 1 月) に行い、それぞれの晴天日または晴天日に近い日について結果を示す。ここでは、測定結果をそれぞれの気象要素の平均値・最大値により、それぞれの街区の形態が微気候へ及ぼす影響について把握した。

先に述べた測定地点について、街区の形態による微気候の影響を把握するため、3 地域を選択して同時測定を行った。測定日の異なるデータの気候変動の影響を取り除いて全地点について比較するため、高層低密と低層高密 1 においては常時測定を行い、もう 1 地点を変更していった。街区の構成の影響に関して以下の 4 種類の測定を行った。

- 測定 1: 建物密度の影響の比較・・・高層低密、低層高密 1、低層高密 2 の 3 地域における測定において、高層低密型と低層高密型の差、及び低層高密型の建物密度の違いによる影響について比較する。
- 測定 2: 街路方向の影響の比較・・・高層低密、低層高密 1、低層高密 3 の 3 地域における測定において、低層高密 1 と低層高密 3 の結果から街路方向の影響を比較する。
- 測定 3: 囲み型街区の影響の比較・・・高層低密、低層高密 1、囲み型の 3 地域における測定において、囲み型街区の影響を比較する。

表 4 測定日

	観測地点						観測日	
	高層 低密	低層 高密1	低層 高密2	低層 高密3	囲み 型	都心 高密	夏季	冬季
測定1	○	○	○				7/27.28 8/3.4	12/21.22.23. 25.26.27 1/6.7.8
測定2	○	○		○			8/10.11.12.21 22.23.25.26	12/29.30.31 1/2.3.4
測定3	○	○			○		8/14.15.16.17 .18.19	1/10.11.12.14. 15.16
測定4	○	○				○	9/25.26.27	1/21.22.23

○測定4：高密市街地との比較・・・高層低密、低層高密
1、都心高密の3地域における測定において、実際の高密市街地とキャンパス内との違いを比較する。

測定日について表4に示す。

3.2 測定結果

風速、気温、SET*（測定した風速・湿度・気温・グローブ温度（黒）より算出）、短波放射量、長波放射量（グローブ温度（黒）・グローブ温度（白）の熱平衡式より算出）について、9時から18時までの実測値の平均値と最大値を求めた結果を示す。

(1) 夏季の結果

1) 建物密度の影響の比較（測定1）

晴天であった7月28日の測定データを表5に示す。風速は各測定地点による差はそれほど大きくはない。短波放射量は南側の天空率が最も高い高層低密南の値が大きく、最大246.0W/m²となった。次いで低層高密1南が大きい。長波放射量は、建物間隔が密であり、短波放射量も中程度である低層高密1南が、南面ではほかの観測地点と25～30W/m²の差が生じている。以上から直達日射を充分受け、建物からの再放射も大きい低層高密1南は、SET*がほかの地点より最大値で2～3℃高く、最も暑熱環境条件が悪い状況である。

2) 街路方向の影響の比較（測定2）

少し曇っていたが屋上の気温が平均で29.7℃となった8月23日の測定データを表6に示す。風速は、南側の天空率（33.8%）の高い高層低密南がほかの5地点に比べて大きく、屋上の風速と同程度である。この結果、低層高密1南よりSET*が約3℃低くなっている。低層高密3は、低層高密1と比べて風速は変わらず、短波放射量は少ない。そのため、SET*は低層高密1南より平均で2.5℃低くなる。

3) 囲み型街区の影響の比較（測定3）

概ね晴天であった8月18日の測定データを表7に示す。周囲を建物に囲まれている囲み型は平均風速が、高層低密南より1.5m/s、低層高密1より0.3m/s低い。また、天空率が低いため日照時間も少なく、短波放射量は高層低密より90W/m²、低層高密1より60W/m²少ないが、長波放射量は逆に開放面が少ないため熱が蓄積し、低層高密1とほぼ同じ値を示す。これらよりSET*は囲み型が最高36.8℃と最も高く、特に風速の影響が大きいことがわかる。

4) 高密市街地との比較（測定4）

曇後時々雨で気温の低かった9月25日の測定データを表8に示す。都心高密の風速は平均、最大とも、高層低密より低いが、低層高密1よりは高い。しかし、気温では高層低密、低層高密に比べて平均、最大とも約1℃前後高い状況となっており、人工排熱量などによる差と思われる。SET*では都心高密の北側が平均値では最大となっている。これは北側の道路幅が狭く換気効率が悪いいため、風速が低く高温のためだと考えられる。長波放射量に関しては日射が少なく差がでなかった。

表5 測定1の平均値、最大値（7月28日）

		高層低密		低層高密1		低層高密2		屋上
		南	北	南	北	南	北	
風速(m/s)	平均	1.14	0.65	1.02	0.89	0.98	0.64	2.98
	最大	1.37	1.09	1.45	1.25	1.40	0.87	3.41
気温(℃)	平均	31.8	31.6	33.1	33.0	32.0	31.7	31.7
	最大	33.5	33.5	34.9	34.8	33.6	33.1	33.2
SET* (℃)	平均	32.1	30.0	33.3	32.9	31.8	30.8	
	最大	35.3	34.7	37.2	35.9	34.7	34.9	
短波放射 (W/m ²)	平均	144.7	42.2	133.3		106.1	45.4	134.5
	最大	246.0	116.1	222.3		203.7	186.5	204.3
長波放射 (W/m ²)	平均	500.8	484.8	524.4		495.0	487.7	488.4
	最大	520.5	496.6	554.4		522.4	495.3	498.4

表6 測定2の平均値、最大値（8月23日）

		高層低密		低層高密1		低層高密3		屋上
		南	北	南	北	東	西	
風速(m/s)	平均	2.38	0.96	0.84	0.88	0.81	0.75	2.88
	最大	3.98	1.41	1.44	1.37	1.08	1.15	4.08
気温(℃)	平均	30.0	30.4	31.1	31.1	30.4	30.5	29.7
	最大	30.7	31.3	31.9	32.3	31.1	31.5	30.6
SET* (℃)	平均	28.5	29.1	31.3	30.4	29.7	29.9	
	最大	30.3	31.8	33.3	33.0	31.8	32.7	
短波放射 (W/m ²)	平均	111.8	46.4	79.6	57.9	51.3	53.0	96.3
	最大	218.8	105.6	189.6	135.0	132.8	162.9	184.7
長波放射 (W/m ²)	平均	480.9	477.6	492.7	486.5	484.4	484.2	476.0
	最大	490.2	483.2	505.3	494.2	495.4	495.8	481.7

表7 測定3の平均値、最大値（8月18日）

		高層低密		低層高密1		囲み型		屋上
		南	北	南	北	南	北	
風速(m/s)	平均	2.04	0.79	0.86	0.82	0.26	0.58	2.07
	最大	3.15	1.09	1.29	1.18	0.46	0.63	2.80
気温(℃)	平均	30.3	30.5	31.4	31.4	31.9	31.0	30.4
	最大	31.7	31.9	33.1	33.2	34.3	32.8	31.6
SET* (℃)	平均	29.9	29.1	32.4	31.1	33.7	30.1	
	最大	33.2	32.7	35.5	34.6	36.8	34.7	
短波放射 (W/m ²)	平均	169.9	48.5	148.4	101.1	80.3	39.4	133.7
	最大	296.4	175.2	268.5	212.9	212.5	223.8	222.6
長波放射 (W/m ²)	平均	487.7	478.8	501.0	488.1	497.8	485.0	480.3
	最大	510.0	487.1	520.4	500.1	523.6	509.7	488.2

表8 測定4の平均値、最大値（9月25日）

		高層低密		低層高密1		都心高密		屋上
		南	北	南	北	南	北	
風速(m/s)	平均	0.7	0.4	0.2	0.2	0.5	0.2	2.5
	最大	1.0	0.6	0.3	0.3	0.7	0.3	4.1
気温(℃)	平均	21.9	21.5	21.7	21.8	22.7	22.5	21.8
	最大	23.2	23.2	23.3	23.5	24.4	23.9	23.3
SET* (℃)	平均	19.8	20.5	21.9	22.0	20.6	22.2	
	最大	22.8	23.7	24.5	25.1	23.3	24.6	
短波放射 (W/m ²)	平均	26.1	21.4	18.8	23.4	16.3	14.1	39.0
	最大	85.6	44.3	42.9	49.2	40.1	28.9	89.8
長波放射 (W/m ²)	平均	421.6	421.1	424.0	423.2	422.3	425.3	428.3
	最大	434.9	434.2	436.6	435.8	439.6	439.2	437.2

(2) 冬季の測定結果

1) 建物密度の影響の比較 (測定1)

1月6日の測定データを表9に示す。南側の天空率が大きく、唯一直達日射のある高層低密南のみほかの地点と差が生まれ、短波放射量が最大213.5W/m²となった。この日は風速も小さかったため、SET*は最高26.2℃となり、他の地点に比べて10℃以上の差が生じた。

2) 街路方向の影響の比較 (測定2)

12月31日の測定データを表10に示す。低層高密3は天空が南側も開けているため直達日射を受け、東面は120.9W/m²、西面は146.7W/m²となった。

3) 囲み型街区の影響の比較 (測定3)

1月11日の測定データを表11に示す。囲み型は中庭を囲んでいる建物の壁が風除けとなるため、風速は常に小さく、高層低密、低層高密よりも約0.3m/s小さい。長波放射量は直達日射を受けていないもの同士を比較すると平均で約5~12W/m²大きい値を示している。また、SET*は、直達日射を受ける高層低密南よりは約9℃低いが、それ以外の地点よりは2、3℃高い。

4) 高密市街地との比較 (測定4)

1月23日の測定データを表12に示す。都心高密の風速の平均値は高層低密よりは低いが、低層高密とは同程度である。気温の平均値は都心高密が最も高く、低層高密が最も低い値となっている。SET*は都心高密は低層高密に比べ約1℃の差が生じている。長波の受熱放射量に関しては大きな差は生じない。

4. 街区形態による微気候への影響の定量的評価

市街地における街区の形態は非常に複雑であり、そのことが市街地における微気候の予測を困難なものとしている。また、市街地の広範囲にわたって微気候を予測するには数値計算では放射を連成して解くことや相互反射などを考慮する必要があり困難である。しかし、都市計画において、市街地環境の改善の一つとして熱環境をコントロールするためには微気候の簡易な予測手法は非常に有用である。ここでは、街区形態の微気候への影響を簡易に評価することを目的として、前述の測定データより市街地における微気候の簡易な予測手法について検討を行う。

4.1 街区形態の表現方法

微気候と街区の関係を定量的に表わすためには、街区自体を何らかの方法で定量的に表現しなければならない。ここでは、一般的にも求めやすい指標を利用することとする。街区形態を表わす指標としては、都市・建築の規制に使われている建蔽率、容積率、高さ、および気象緩和効果の評価に使われる自然被覆率（緑被+水面+未舗装地）、また街区環境コントロールに用いられる天空率を利用する（表1参照）。また、ここでは、天空率が日照及び通風の面から南北でそれぞれ異なる働きをするという予測から、天空面を天頂を通る東西を結ぶ線で2つに分割したものを南

表9 測定1の平均値、最大値 (1月6日)

		高層低密		低層高密1		低層高密2		屋上
		南	北	南	北	南	北	
風速(m/s)	平均	0.49	0.49	0.14	0.20	0.25	0.37	2.39
	最大	0.92	0.91	0.48	0.56	0.47	0.56	3.36
気温(℃)	平均	12.0	10.8	9.8	9.5	10.5	10.7	10.8
	最大	14.5	12.5	11.7	11.3	12.3	12.4	12.5
SET* (℃)	平均	19.9	13.1	13.7	13.1	14.1	13.7	
	最大	26.2	14.6	15.3	14.5	15.0	14.8	
短波放射 (W/m ²)	平均	120.5	8.0	4.4	5.6	3.5	5.1	76.8
	最大	213.5	13.6	6.3	8.5	6.2	9.0	137.2
長波放射 (W/m ²)	平均	375.8	349.6	351.3	343.6	357.8	356.5	367.8
	最大	401.4	357.2	358.7	350.3	364.4	363.1	376.6

表10 測定2の平均値、最大値 (12月31日)

		高層低密		低層高密1		低層高密3		屋上
		南	北	南	北	東	西	
風速(m/s)	平均	0.30	0.32	0.16	0.20	0.06	0.11	1.27
	最大	0.65	0.53	0.51	0.54	0.13	0.20	2.05
気温(℃)	平均	12.4	10.9	10.4	10.3	10.9	11.0	11.9
	最大	14.5	12.7	12.0	12.0	12.6	12.7	14.6
SET* (℃)	平均	20.6	14.1	14.4	13.8	16.4	16.6	
	最大	26.0	16.4	16.3	16.1	23.1	24.5	
短波放射 (W/m ²)	平均	97.5	9.0	7.1	8.8	24.0	28.7	62.8
	最大	181.9	15.4	12.0	13.8	20.9	46.7	117.3
長波放射 (W/m ²)	平均	379.9	355.2	358.5	352.6	363.4	363.3	373.3
	最大	401.4	362.0	367.1	361.1	371.2	375.2	387.9

表11 測定3の平均値、最大値 (1月11日)

		高層低密		低層高密1		囲み型		屋上
		南	北	南	北	南	北	
風速(m/s)	平均	0.54	0.58	0.63	0.58	0.19	0.24	2.29
	最大	0.69	0.94	0.88	0.77	0.38	0.48	3.13
気温(℃)	平均	9.8	8.3	8.2	8.1	8.4	8.5	8.2
	最大	11.5	9.6	9.5	9.5	9.6	9.7	9.7
SET* (℃)	平均	17.5	10.6	10.3	10.2	12.5	12.5	
	最大	22.0	12.4	12.4	11.6	13.6	13.4	
短波放射 (W/m ²)	平均	119.0	7.1	4.5	5.9	3.0	3.1	78.9
	最大	219.9	12.0	7.4	8.3	5.7	6.7	141.1
長波放射 (W/m ²)	平均	369.1	341.5	345.0	338.5	349.3	349.3	354.3
	最大	391.5	347.3	352.1	345.2	354.5	355.6	362.3

表12 測定4の平均値、最大値 (1月23日)

		高層低密		低層高密1		都心高密		大手町
		南	北	南	北	南	北	
風速(m/s)	平均	2.1	1.1	0.9	0.8	1.3	0.5	3.2
	最大	3.2	1.9	1.8	1.9	1.9	1.2	4.7
気温(℃)	平均	8.7	8.2	8.2	8.0	9.1	8.8	8.9
	最大	9.7	9.3	9.4	9.2	10.4	10.0	10.1
SET* (℃)	平均	10.3	8.8	9.5	9.7	10.2	11.0	
	最大	14.7	10.6	12.7	12.7	17.9	13.5	
短波放射 (W/m ²)	平均	234.3	8.1	9.7	8.0	30.2	6.9	83.2
	最大	516.5	16.0	14.8	12.2	172.8	11.8	138.9
長波放射 (W/m ²)	平均	209.5	339.8	337.0	342.2	348.1	345.0	358.1
	最大	354.5	347.6	348.5	350.3	366.5	354.3	364.2

天空率、北天空率とした。(天空率＝南天空率＋北天空率)

4.2 評価方法

評価は、前述した夏季と冬季の全測定データの中から欠損値の無いそれぞれ116ケース、119ケースを対象として、夏冬を別々に行った。また、市街地でオフィスワーカーが活動すると考えられる9時から18時の平均値を求めて評価に用いることとする。SET*および長波放射量を目的変数として、説明変数に基準となる屋上の全日射量 (I (roof))、風速 (u (roof))、気温 (ta (roof)) また、街区指標として建蔽率、容積率、高さ、自然被覆率、天空率、南天空率、北天空率を用いて重回帰分析を行った。これらから、回帰係数や標準化係数、t値により相関の度合や有意性について検討する。

分析の方法としては、それぞれの街区指標と微気候との相関を個別に評価するのではなく、除去基準を設けず強制投入法により複数の街区指標を同時に説明変数とし、他の街区指標との関係の中での相関関係をみることとする。説明変数としては、まず基準となる気象状況を表す屋上データの全日射量と風速、気温および、街区指標である建蔽率、容積率、高さ、自然被覆率、天空率を選び強制投入法により重回帰分析を行った。(モデル1) 次に、天空の開放の方向性による働きをみるため、説明変数に天空率の代わりに南天空率、北天空率を加えて、同様に強制投入法により重回帰分析を行った。(モデル2)

(1) 夏季の関係

1) SET* との相関 (表 13)

SET*と屋上気象データとの相関については、気温との相関が高く、モデル1ではt値で20.23となっている。それぞれの相関は気温、全日射量が正、風速が負となっており、SET*に対する効き方は計算と同様の結果となっている。

建蔽率、自然被覆率による影響は少ないが、容積率、高さに対しては有意性のある相関関係が見られる。容積率との相関は正であり、高さとは負の相関であるため、容積率の増大、および低層化は夏季の暑熱環境の悪化の方向にはたらく。

天空率については、天空率と北天空率で高い相関関係が見られる。それぞれ負の相関となっており、天空率の高い、つまり開放性が高いほど、暑熱環境を緩和するといえる。南天空率の相関が少し低いのは、夏季における南側の開放度が風通しを良くするばかりでなく、日射によるSET*の上昇を引き起こす原因となっていることによるものと考えられる。

2) 長波放射量との相関 (表 14)

長波放射量と屋上気象データとの相関については、気温との相関が高いものの、その他との相関は低い。

建蔽率、容積率、高さ、自然被覆率との相関についても有意性がない。

表 13 街区指標と SET* との相関

目的変数	SET* N=116	モデル 1			モデル 2		
		回帰係数	標準化係数	t値	回帰係数	標準化係数	t値
説明変数	I(roof)	0.018	0.142	3.354	0.018	0.141	3.480
	u(roof)	-0.463	-0.086	-2.718	-0.462	-0.086	-2.844
	ta(roof)	0.852	0.811	20.230	0.856	0.814	21.267
	建蔽率	-0.060	-0.185	-1.225	-0.057	-0.175	-1.215
	容積率	0.014	0.137	3.017	0.014	0.139	3.212
	高さ	-0.064	-0.291	-2.865	-0.068	-0.309	-3.180
	自然被覆率	0.186	0.132	1.442	0.173	0.123	1.404
	天空率	-0.088	-0.213	-4.174			
	南天空率				-0.056	-0.169	-2.516
	北天空率				-0.090	-0.295	-4.449
切片		5.696		1.933	5.292		1.879
重相関係数R		0.952			0.957		

表 14 街区指標と長波放射量との相関

目的変数	L N=116	モデル 1			モデル 2		
		回帰係数	標準化係数	t値	回帰係数	標準化係数	t値
説明変数	I(roof)	0.076	0.080	1.467	0.074	0.078	1.663
	u(roof)	1.623	0.052	1.065	1.567	0.050	1.198
	ta(roof)	5.799	0.798	14.370	5.799	0.798	16.752
	建蔽率	0.053	0.027	0.046	-0.332	-0.167	-0.338
	容積率	0.045	0.057	0.374	0.089	0.113	0.865
	高さ	-0.172	-0.131	-0.337	-0.416	-0.317	-0.947
	自然被覆率	2.519	0.272	0.821	1.195	0.129	0.453
	天空率	-0.458	-0.185	-2.199			
	南天空率				0.029	0.015	0.147
	北天空率				-0.456	-0.251	-2.555
切片		287.768		4.657	305.342		5.752
重相関係数R		0.899			0.927		

天空との相関については、モデル1の天空率は他の街区指標に比べて高い。さらに南北に分けると、北天空率でより高い相関を示すが、南天空率は非常に低い。北天空率との相関は負であるが、これは今回の測定点の多くが南北のどちらかの面に沿ったものが多かったため、北天空率が高いものは南側には建物があり日陰となった壁面に面しているところが多かったことも一つの要因と思われる。

(2) 冬季の関係

1) SET* との相関 (表 15)

SET* と屋上気象データとの相関については、気温が高い正の相関がある。少し低い、風速は負の相関となっている。

建蔽率、容積率、高さ、自然被覆率については、モデル1をみると各々あまり相関が高くないが、容積率が比較的高い。回帰係数は負であり、容積率が高いほど冬季の寒冷環境も悪化させる結果となっている。これは、容積率の増加とともに日照の減少や冷気が滞留するためであると思われる。

天空率については、有意性は無いものの、他の街区指標より高い相関がある。しかし、天空率を南北に分けると、各々のt値は南側で8.40、北側で3.20と高くなり、南側との相関が特に高い。回帰係数をみると、天空率は南北ともに正の相関となっており、天空率が大きくなるほど冬季の寒冷環境は緩和するということになるが、北天空率は少し

低い正の相関となっている。これは、冬季における主風向である北側の開放度が風通しを良くすることによるものと考えられる。

2) 長波放射量との相関 (表 16)

長波放射量と屋上気象データとの相関については、モデル1をみると風速と気温が高い相関を示す。

建蔽率、容積率、高さ、自然被覆率については、モデル1をみるといずれも有意性のある相関関係がみられない。わずかに高さが他に比べて高い。

天空についても、天空率は非常に低い。しかし、南北に分けて考えると南天空率で相関が高くなり、t値で7.60となる。回帰係数をみると、南天空率は正の相関であり、これは南側に対する開放性が日射を受けることで地物の温度が上昇し、長波放射量を大きくする方向に働いていると考えられる。

5. まとめ

街区形態による微気候への影響の観測及び評価を夏季と冬季に行った。その結果以下のことがわかった。

1) 建物密度の影響の比較では、高層低密の風速は他より大きくなることが多い。夏季においては、短波放射量は天空率の大きい高層低密で最大となる。次いで低層高密街区の中で容積率の小さい低層高密1南で大きい。この風速と短波放射の関係から気温は

表 15 街区指標と SET* との相関

目的変数	SET* N=119	モデル 1			モデル 2		
		回帰係数	標準化係数	t値	回帰係数	標準化係数	t値
説明変数	I(roof)	0.008	0.022	0.294	0.006	0.017	0.362
	u(roof)	-0.394	-0.147	-2.022	-0.391	-0.146	-3.190
	ta(roof)	0.915	0.551	7.746	0.916	0.551	12.332
	建蔽率	0.027	0.099	0.099	-0.086	-0.318	-0.502
	容積率	-0.028	-0.276	-0.934	-0.012	-0.123	-0.661
	高さ	0.067	0.339	0.560	-0.009	-0.047	-0.124
	自然被覆率	-0.442	-0.351	-0.611	-0.866	-0.687	-1.897
	天空率	0.088	0.239	1.962			
	南天空率				0.260	0.883	8.403
	北天空率				0.090	0.330	3.202
切片		7.555		0.560	12.386		1.458
重相関係数R		0.724			0.902		

表 16 街区指標と長波放射量との相関

目的変数	L N=119	モデル 1			モデル 2		
		回帰係数	標準化係数	t値	回帰係数	標準化係数	t値
説明変数	I(roof)	-0.181	-0.121	-1.501	-0.194	-0.130	-3.100
	u(roof)	2.784	0.245	3.071	2.709	0.239	5.741
	ta(roof)	2.857	0.400	5.077	2.749	0.385	9.384
	建蔽率	0.095	0.082	0.083	-0.399	-0.346	-0.670
	容積率	-0.081	-0.192	-0.658	-0.013	-0.031	-0.203
	高さ	0.429	0.503	0.856	0.075	0.088	0.288
	自然被覆率	-0.975	-0.183	-0.323	-2.935	-0.552	-1.865
	天空率	-0.002	-0.001	-0.009			
	南天空率				0.904	0.706	7.590
	北天空率				0.027	0.023	0.255
切片		337.470		5.993	359.408		12.253
重相関係数R		0.665			0.922		

- 低層高密1で高く、低層高密2が続く。長波放射量についても南面で比較すると低層高密が他の地点より20~30W/m²大きい。これらのことからSET*も低層高密1南が2、3℃高く、もっとも暑熱環境条件が悪い。冬季においても、低層高密は密度が高いため街路に日が当たらず、特に風通しが悪い低層高密1で気温が上がらず、SET*でも最も低い値となり寒冷環境にある。
- 2) 街路方向の影響の比較では、南北街路をもつ低層高密3は日中の限られた時間にしか日が当たらない。このため、夏季においては東西街路の低層高密1に比べて平均気温、平均のSET*で1℃前後低い値となり、冬季においては街路に日が当たるため、低層高密1より平均気温、平均のSET*で0.5℃前後高くなる。
- 3) 囲み型街区の影響の比較では、周囲を壁に囲まれている空地は風速が非常に小さく、日照時間も短い。このため、夏季においては短波放射量が少ないが長波放射量は低層高密1と同等であり、SET*は最大となる。冬季においては日射を受けていない点の間で比較するとSET*で2℃程大きい。
- 4) 高密市街地との比較では、都心高密は風速で高層低密より低く、低層高密とは同程度または少し高い。また、夏季、冬季ともに平均気温で約1℃前後他の地点に比べ高く、これは人工排熱の影響と考えられる。冬季の日射が当たらない点で比較すると、平均のSET*では低層高密1より1℃、高層低密より2℃前後高い。
- 5) 長波放射量は、夏季においては、長時間直達日射を受け、天空率の低い低層高密1南が高く、夜間も建物・アスファルトからの再放射量が多い。昼間に最も日射量の多い高層低密南は、天空率が高いために天空放射の影響を受け、夜間は値は小さくなる。また囲み型は天空率が測定地点の中では最も小さいことと、まわりを人工物により囲まれているために夜間は低層高密1南以上に再放射量が大きくなっている。冬季においては、昼間は日射量を受ける地点で値が大きくなっている。夜間は、天空率の低い低層高密2と囲み型で値が大きい。
- 6) これらから、場の気象の異なる都心高密を除いた点で、SET*により温熱環境を比較すると、夏季においては風速が小さく日射をよく受け、冬季においては風速が大きく直達日射の全くない低層高密1がどちらの季節においても不快側に位置していることがわかった。囲み型は1年中風速が小さいため、夏季は不快側に働くが、冬季は快適側に働く。高層低密南は主風向の違いから、夏季は風速が大きく、冬季は風速が小さいために快適性を高める効果が現われていた。
- 7) 街区形態とSET*との相関関係は、夏季は容積率や高さ、天空率との相関が高く、高容積率や低層化が暑熱環境を悪化させる方向に働く。冬季には天空率との相関が高い。特に冬季に天空率を南北に分割して表わすことにより説明力が高まる。また、天空率の増大は夏冬とも熱

環境を向上させる方向に働く。

- 8) 街区形態と長波放射量の相関は、天空率が高く、冬季は南天空率がt値で7.59の正の、夏季は北天空率が-2.56の負の高い相関が得られた。
- 9) 街区指標と微気候の関係は、気象の影響が方向性や面積、高度の要素をもっているため、建蔽率や高さより、容積率や天空率との相関が高い。さらに、南天空率や北天空率は方向性を表しており、冬季においては、南天空率の増大は北風の影響は少ない上に高度の低い日射を受けやすくなるため、SET*や長波放射量に対して南天空率は高い正の相関となる。しかし、夏季には天空率の増大による通風がSET*を低下させるが、南天空率の増大は日射を受けやすく、SET*を高くする。この働きにより、南天空率とSET*との相関は低くなる。

以上のように天空の開放度が微気候に大きな影響があり、その開放度の影響が南北により性質が違うことがわかった。しかし、現行の法制度においては、北側斜線や日影規制を除いて、空地の位置などについて方位の違いを評価していない状況であり、熱環境的には異なる空地も面積や接道の仕方のみで評価されている。今後、空地インセンティブ制度などでは熱環境の面からの検討も必要であると思われる。

本研究では、測定器の台数や測定日数の面からある典型的な街区の形態について測定を行った。今後もさまざまな街区において測定を重ね、微気候と街区指標の関係をより明確にすることが求められる。そのためには、測定システムの簡易化、測定環境の改善が必要である。

〈謝辞〉

本研究の実測調査にあたり、東京大学総務部及び施設部の方々に多大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

〈注記〉

- 1) 建蔽率、容積率、自然被覆率については、観測点を中心とした100m四方、1haを敷地面積として、地図および現地踏査により算出した。また、天空率については立体角投射法則に基づいて、正射影魚眼レンズを用いた写真法により、フィルム面上に投影された円の面積に対する天空部の面積の比の計測により直接求めた。天空面を天頂を通る東西を結ぶ線で2つに分割したものを南天空率、北天空率とした。(天空率=南天空率+北天空率)

高さについては、測定地点の10mの範囲内で壁面をもつ建物の平均値とした。

- 2) 湿度に関しては相対湿度(Rh:%)を測定し、Goff-Gratchの式により飽和水蒸気圧を算出し、絶対湿度(x:kg/

kg')を求めた。

絶対湿度とはある温度の空気中に含まれている乾き空気 1kg'に対する水蒸気の質量を示す湿度の単位である。¹⁴⁾

3)放射に関しては、平均放射温度(MRT:Tr)をグローブ温度(黒)(Tg)、気温(Ta)、気流速(u)の観測値よりBedfordの式により求めた。

$$MRT=Tg+2.37\sqrt{u}(Tg-Ta)$$

4)clo値は着衣の熱抵抗を表わすパラメーターであり、着衣が夏ズボン、半袖ワイシャツ、半袖下着、パンツ、靴下、靴で0.43、冬ズボン、冬上着、セーター、長袖ワイシャツ、下着、ハイソックス、靴で1.09となる。¹⁵⁾

5)met値は代謝量を表現するパラメーターの一つである。これは体表面積1m²につき58.2Wの発熱量を基準としている。これは静座時の代謝量に相当するものであり、非常に軽い作業時で1.3~1.7metとなる。¹⁵⁾

6)h は球の対流熱伝達率の計算式¹⁶⁾ (Ranx-Marshall の式)より求めた。

$$h=N_g\lambda/D$$

$$N_g=2+0.60Pr^{1/3}Re^{1/2}$$

$$Re=uD/\nu$$

D:球の直径[m]

N_g:ヌセルト数

Re:レイノルズ数

Pr:プラントル数(=0.72)¹⁷⁾

λ:空気の熱伝達率[W/mK]¹⁸⁾

ν:空気の動粘性係数[m²/s]¹⁸⁾

u:空気の流速[m/s]

$$\lambda=0.0241+7.7\times 10^{-5}T$$

$$\nu=\mu/\rho$$

μ:粘性係数[Pa・s]¹⁸⁾ ρ:空気の密度[kg/m³]¹⁸⁾

$$\mu=(0.0074237/(T+390.15))((T+273.15)/293.15)^{5}$$

$$\rho=1.293/(1+T/273.15)$$

T:空気の温度[°C]

(参考文献)

- 1)山口賢次郎・小林陽太郎:建築外部環境と人体との間のふく射熱授受について,日本生気象学会雑誌,第17巻第1号,pp.49~57,1980
- 2)J.E.Burt et.al.:The Relative Influence of Urban Climates on Outdoor Human Energy Budgets and Skin Temperature I.Modeling Considerations,Int.J.Biometeor,26,pp.3~23,1982
- 3)J.E.Burt et.al.:The Relative Influence of Urban Climates on Outdoor Human Energy Budgets and Skin Temperature II.Man in an Urban Environment,Int.J.Biometeor,26,pp.25~35,1982
- 4)中村泰人・平岡久司:二次元長方形市街地空間の路上にある人体の熱負荷に関する解析的研究,日本建築学会計画系論文報告集,第369号,pp.12~21,1986
- 5)石井昭夫・片山忠久他3名:屋外気候環境における快適感に関する実験的研究,日本建築学会計画系論文報告集,第386号,pp.28~37,1988
- 6)神田学・土屋信夫:微気象観測に基づ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,pp.35~44,1955
- 7)中村泰人他:「屋外気候環境における快適感に関する実験的研究」に対する討論,日本建築学会計画系論文報告集,第395号,pp.80~82,1989
- 8)ASHRAE Standard 55-74,Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy,ASHRAE,1974
- 9)伊藤宏・深井一夫・後藤滋:着衣量のことなる場合のSET*と温熱感覚に関する実験的研究,空気調和・衛生工学会論文集, No.56,pp.35~45,1994
- 10)山下盛久・石井昭夫他3名:屋外環境における温熱感覚に関する申告実験 その6 温冷感と温熱指標の比較,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.751~752,1991
- 11)谷本潤・木村建一他1名:涼房手法を用いた屋外休憩施設に関する実験的研究,日本建築学会計画系論文報告集,第481号,pp.41~48,1996
- 12)A.P.Gagge et. al.:A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment,ASHRAE Transactions 92-2B,pp.709~731,1986
- 13)梅干野晃・何江:屋外熱環境計の改良とその検討,日本建築学会計画系論文報告集,第406号,pp.11~19,1989
- 14)日本農業気象学会関東支部編:農業気象の測器と測定法,農業技術協会,pp.51~81,1988
- 15)西安信:人体と環境との熱交換,温熱生理学(中山昭雄),理工学社,1981
- 16)社団法人日本機械学会:伝熱工学資料改訂第3版,pp.16,1975
- 17)岩波理化学辞典第3版:岩波書店,pp.1174,1971
- 18)宇田川光弘:パソコンによる空気調和計算法,オーム社,pp.312,1986