

街区における熱環境の評価・制御技術の研究

久保田 孝 幸 小 宮 英 孝
宮 川 保 之

Study on Evaluation and Control of Thermal Environment in Building and Site Planning

Takayuki Kubota Hidetaka Komiya
Yasuyuki Miyagawa

Abstract

Impacts of buildings on the thermal environment of open spaces in urbanized areas were investigated by field observations. Micro-climatological components were observed at six sites in central Tokyo. Of these sites, five are in the Hongo Campus of the University of Tokyo, while the other is located in an office area of Chiyoda Ward. These six sites differ from each other in terms of density, orientation, and types of surrounding buildings. The presence or absence of anthropogenic heat source nearby is another difference among the observation sites. This study showed that the thermal conditions of open spaces are strongly affected by the layout of surrounding buildings. An application of this study to designing open spaces in developments is also shown.

概 要

本研究では、建築形態や街区形態による屋外の熱環境への影響を実測により評価を行った。東京大学本郷キャンパスおよび東京都千代田区のオフィス街において、容積率、方位、建築形態、人工排熱量などの影響を検討するため4種類の実測を行った。実測結果から、街路の方向や密度などの街区形態による空地の熱環境への影響が明らかとなった。この結果をもとに、開発における空地の熱環境の制御方法について検討した。

1. はじめに

人口の集中、地表のコンクリート被覆化、生活空間の地上・地下への拡大は、都市の気候の改変をもたらす熱環境を悪化させている。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るため、現実には街区スケールの再開発に伴って徐々に改善されてゆくことが考えられる。

本研究では、市街地街区における熱環境を簡便に評価するため、街区スケールでの熱環境の形成および人体への影響を街区形態別に測定した。それをもとに熱環境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い、その結果をもとに熱環境の制御技術を考案し、検討を加えた。

2. 観測概要

2.1 観測地域および観測点

観測は平成8年度夏季および冬季に行った。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し、かつ測

定器の管理上の便から、観測は主として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も測定を行った(Fig. 1)。街区形態のみによる影響を比較するため、これらの観測地点は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。測定地点の概要をTable 1に示す。

2.2 観測方法

熱環境に与える建物の影響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必要がある。そのため時間分解能の高い観測が必要である。したがって観測は基本的には固定観測とした。しかし、同時にとることのできる測定点は数が限られている。ここでは、高層低密、低層高密1は全測定日において測定を行い、他に日

によって異なる一地点を加えて測定を行った。測定1では低層高密2を加え、高層低密と低層高密の違いをみた。また、測定2では低層高密3を加え、街路方向の違いを、測定3では囲み型を加え、囲み型空地の効果をみた。さらに測定4においては、都心高密を加え、実際の都心の市街地との人工排熱や密度の差をみた。また、基準となる気象データを、本部庁舎の屋上(h=約53m)で全日において測定した。

測定項目は、風速、風向、湿度(相対湿度より絶対湿度を算出)、気温、グローブ温度(黒)、グローブ温度(白)の6項目とした。これらの測定値から、後述する温熱環境を評価するために標準新有効温度(SET*)、および受熱放射量を求めた。測定装置をFig.2に示す。気温、湿度は高さ1.2mにある白色のフィンを有する直径15cmの自然通風筒の内部で、風向・風速、グローブ温度は高さ1.5mで測定した。都心における人の立ち入ることのでき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とから、各街区における熱環境の測定地点は壁面より1~2m離れたところで、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。測定の概要をTable 2に示す。

2.3 熱環境の評価手法

熱環境の評価は、熱環境に関する直接測定データと、温熱環境を温度という理解しやすい指標で表すことのできる標準新有効温度(SET*)を用いて行うことにした。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も評価することにした。

2.3.1 標準新有効温度(SET*) 標準新有効温度(SET*)は、物理環境要素の気温、放射(グローブ温度(黒)より平均放射温度を算出)、湿度、気流と人体側要素の着衣量(clo¹⁾)、代謝量(met¹⁾)の6つの要素より算出される温熱環境の評価指標であり、温度とし

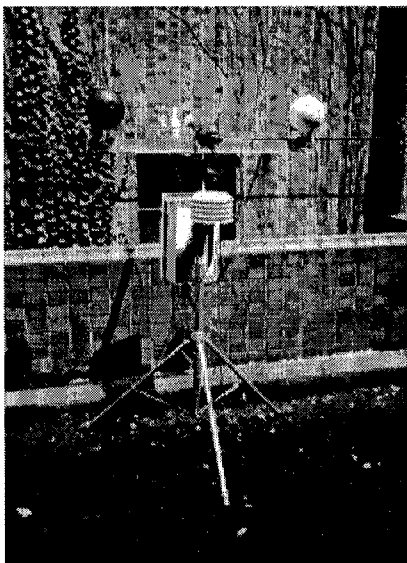


Fig. 2 測定装置
Experimental Device

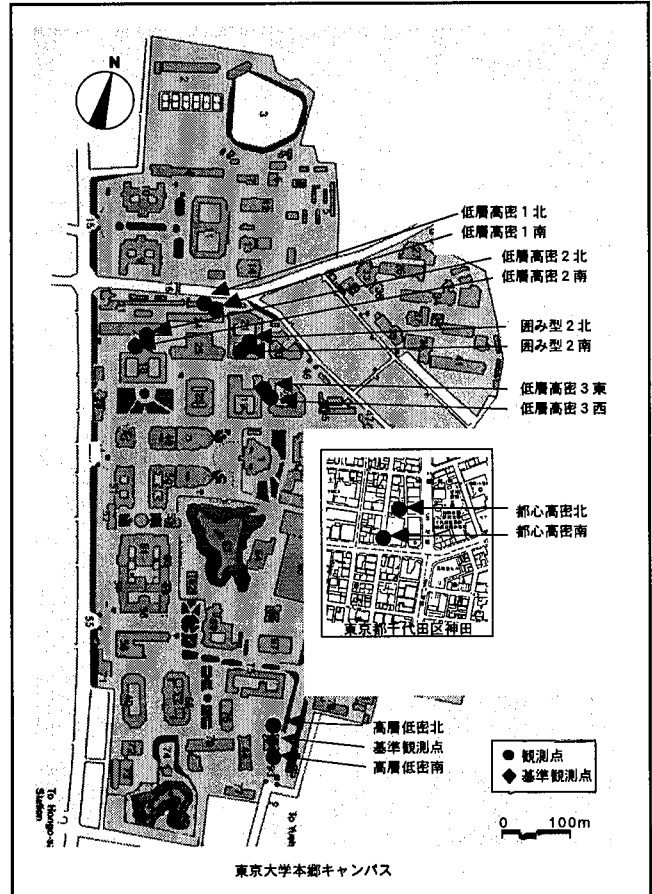


Fig. 1 測定地域
Region of Experiments

Table 1 測定地点の概要^{注1)}
Outline of Experimental points

| | | 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 | 34.6 | 159.0 | 16.4 | 9.8 | 19.5 | 16.0 | 3.5 |
| | 北 | | | | | 34.1 | 8.6 | 25.5 |
| 低層高密2 (工学部5号館南) | 南 | 53.6 | 236.7 | 30.3 | 3.3 | 17.8 | 13.6 | 4.2 |
| | 北 | | | | | 17.0 | 4.5 | 12.5 |
| 低層高密3 (工学部2号館東) | 東 | 39.2 | 117.7 | 19.6 | 6.2 | 23.1 | 12.2 | 10.9 |
| | 西 | | | | | 21.0 | 11.2 | 9.8 |
| 囲み型 (工学部4号館) | 南 | 40.2 | 156.6 | 24.0 | 5.3 | 14.3 | 13.0 | 1.3 |
| | 北 | | | | | 14.7 | 4.3 | 10.4 |
| 都心高密 (神田町某ビル) | 南 | 43.6 | 301.0 | 31.0 | 0.7 | 23.0 | 14.7 | 8.3 |
| | 北 | 49.9 | 325.4 | | | 1.0 | 20.8 | 3.8 |

単位: 高さ (m)、その他 (%)

Table 2 測定概要
Outline of Experiments

| | | 測定1 | 測定2 | 測定3 | 測定4 | 基準点 |
|------|----|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| 観測日 | 夏季 | 7/27.28 8/3.4 | 8/10.11.12.21 .22.23.25.26 | 8/14.15.16.17 .18.19 | 9/25.26.27 | 連続 |
| | 冬季 | 12/21.22.23. 25.26.27 1/6.7.8 | 12/29.30.31 1/2.3.4 | 1/10.11.12.14 15.16 | 1/21.22.23 | |
| 観測地点 | | 高層低密 低層高密1 低層高密2 | 高層低密 低層高密1 低層高密3 | 高層低密 低層高密1 囲み型 | 高層低密 低層高密1 都心高密 | 本部庁舎屋上 |
| 観測間隔 | | 30秒 | | | | 1秒 |
| 観測項目 | | 風向、風速、気温、湿度、グローブ温度(黒、白) | | | | 風向、風速、 気温、湿度、 全日日射量、 放射収支量 |

て表現される量である。ASHRAE St.55-74²⁾によると、室内で温熱的中立域を与えるSET*の範囲は22.2~25.6℃である。一方、屋外環境下では山下・石井ら³⁾の28.1℃、谷本ら⁴⁾の25.6℃などがあり、室内におけるものよりも高めになることが示されている。本研究ではSET*はGaggeら⁵⁾に基づいて計算した。その際、人体側の要素の着衣量は夏は0.5clo、冬は1.0clo、また代謝量は1.2metとした。

2.3.2 受熱放射量 SET*は総合的な指標であるため、熱環境の各々の要素が温熱感に与える効果を個別に評価するには適していない。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が、気流に関しては、ビル風などの問題から解析およ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。ここでは、測定における簡易さと街区形態そのものの効果をみるという理由から、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。

測定点のグローブ球に入射する短波放射量、長波放射量は、定常状態を仮定した中空金属球の熱平衡式に、同一の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代入することによって算出した。

3. 観測結果および考察

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)に行った。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、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時ま

での実測値の平均値と最大値を求め、街区の形態が熱環境へ及ぼす影響について調べた。

3.2 夏季の測定結果

3.2.1 建物密度の影響の比較(測定1) 7月28日の測定データをTable 3に示す。この日は晴天であった。風速の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、南面では他の観測地点と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*が他の地点より最大値で2~3℃高く、最も熱環境が悪い状況である。

3.2.2 街路方向の影響の比較(測定2) 8月23日の測定データをTable 4に示す。この日は少し曇っていたが屋上の気温が平均で29.7℃となった。風速は、南側の天空率(33.8%)の高い高層低密南が他の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。

3.2.3 囲み型街区の影響の比較(測定3) おおむね晴天であった8月18日の測定データをTable 5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短く、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。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とほぼ同じ値を示している。これらよりSET*は、囲み

Table 3 測定1の結果(7月28日)
Result of Experiment 1 (July,28th)

| | | 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 | 33.8 | 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 | 524.9 | | 495.0 | 487.7 | 488.4 |
| | 最大 | 520.5 | 496.6 | 554.8 | | 522.4 | 495.3 | 498.4 |

Table 4 測定2の結果(8月23日)
Result of Experiment 1 2(August,23th)

| | | 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 | 2.58 | 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 | 33.5 | 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 |

Table 5 測定3の結果(8月18日)
Result of Experiment 3(August,18th)

| | | 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 | 0.28 | 0.51 | 2.07 |
| | 最大 | 3.15 | 1.09 | 1.29 | 1.18 | 0.46 | 0.65 | 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 | 33.3 | 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 | 497.1 | 485.0 | 480.3 |
| | 最大 | 510.0 | 487.1 | 520.4 | 500.1 | 523.6 | 509.7 | 488.2 |

Table 6 測定4の結果(9月25日)
Result of Experiment 4 (September,25th)

| | | 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 |

型が最高36.8℃と最も高いが、これは特に風速の低いことによる影響と思われる。

3.2.4 高密市街地との比較 (測定4) 9月25日の測定データをTable 6に示す。この日は、曇後時々雨で気温が低かった。都心高密の風速は、平均、最大ともに高層低密より低いが、低層高密1よりは高い。しかし、気温は高層低密、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、これは人工排熱量などによる差と思われる。SET*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ため、風速が低く高温のためであると考えられる。長波放射量に関しては日射が少なく差がでなかった。

3.3 冬季の測定結果

3.3.1 建物密度の影響の比較 (測定1) 1月6日の測定データをTable 7に示す。南側の天空率が大きく、唯一直達日射のある観測地点である高層低密南のみが他の地点と異なった状況を示した。ここでは、短波放射量が最大213.5W/m²となった。この日は風速も低かったため、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。

3.3.2 街路方向の影響の比較 (測定2) 12月31日の測定データをTable 8に示す。低層高密3は南北方向の街路のため、天空が南側も開けているため直達日射を受け、短波放射量が東面は120.9W/m²、西面は146.7W/m²となった。これにより、SET*もそれぞれ23.1℃、24.5℃となり低層高密1と比較して7℃以上高い。

3.3.3 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Table 9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、風速は常に低く、高層低密、低層高密よりも約0.3m/s低い。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、それ以外の地点よりは2~3℃高い。

3.3.4 高密市街地との比較 (測定4) 1月23日の測定データをTable 10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。SET*は都心高密で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. 街区形態の熱環境への影響の定量的評価

市街地における熱環境を詳細に予測するには、数値流体力学に基礎をおく方法があるが、ここでは相互反射を考慮した放射計算と気流計算を連成して解くことが必要であるため、その方法を形態が非常に複雑な現実の街区へ適用するのは実際的ではない。しかし、都市計画において、市街地計画を熱環境の面からコントロールするために、なんらかの熱環境予測手法が求められている。この観点から、前述の測定データに基づいて、市街地における簡易な熱環境予測手法について検討を行う。

4.1 評価方法

ここではTable 1に示された指標を用いて、熱環境と街区の関係を定量的に表すことを考える。さらに、天空については、日照および通風における南北それぞれの異なる働きをみるために、天空面を天頂を通る東西を結ぶ線で2つに分割した南天空、北天空も指標として用いる。(天空率=南天空率+北天空率)

評価は、前述した夏季と冬季の全測定データの中から

Table 7 測定1の結果 (1月6日)
Result of Experiment 1 (January,6th)

| | | 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 |

Table 9 測定3の結果 (1月11日)
Result of Experiment 3 (January,11th)

| | | 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 | 0.40 | 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 | 349.9 | 354.3 |
| | 最大 | 391.5 | 347.3 | 352.1 | 345.2 | 354.5 | 355.6 | 362.3 |

Table 8 測定2の結果 (12月31日)
Result of Experiment 2 (December,31th)

| | | 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 | 120.9 | 146.7 | 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 |

Table 10 測定4の結果 (1月23日)
Result of Experiment 4 (January,23th)

| | | 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 | | 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 | | 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 | | | 9.7 | 8.0 | 30.2 | 6.9 | 83.2 |
| | 最大 | | 16.0 | 14.8 | 12.2 | 172.8 | 11.8 | 138.9 |
| 長波放射 (W/m ²) | 平均 | | | 337.0 | 342.2 | 348.1 | 345.0 | 358.1 |
| | 最大 | | | 354.5 | 347.6 | 348.5 | 350.3 | 366.5 |

欠測値の無いそれぞれ116ケース、119ケースを対象として、夏冬を別々に、9時から18時の平均値により行った。

分析は、SET*を目的変数、街区指標と屋上気象データを説明変数とする線形重回帰法によって行った。それぞれの街区指標と熱環境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にする。説明変数には、基準となる屋上気象データの全天日射量、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影響をみるため、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)。これらから、回帰係数や標準化係数、t値を求め有意性について検討するとともに、ステップワイズ法により回帰式を導いた。予測式中の説明変数を以下に示す。

- I: 全天日射量 U: 屋上風速 Ta: 屋上気温
- B.R: 建蔽率 B.V: 容積率 H: 高さ
- G.R: 自然被覆率 SK: 天空率
- SK.S: 南天空率 SK.N: 北天空率

4.2 解析結果

4.2.1 夏季のSET*との相関 (Table 11)

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、全天日射量が正、風速が負となっており、SET*に対する影響は論理的に矛盾の無い結果となっている。

SET*に対する建蔽率、自然被覆率の影響は少ないが、容積率、高さは有意性のある相関を示している。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熱環境の悪化の方向に働くということが出来る。

天空率については、天空率、および北天空率において高い相関関係がみられる。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、熱環境が緩和されることになる。南天空率との相関が少し低いのは、夏季における南側の開放が風通しを良くする一方、日射の増大を招きSET*に相反する働きとなっているためと考えられる。

ステップワイズ法による回帰式は以下のようになった。

$$SET^* = 2.2365 + 0.855 * Ta - 0.044 * H - 0.034 * SK.N + 0.301 * G.R + 0.011 * B.V + 0.017 * I - 0.429 * U - 0.054 * SK$$

R=0.957

すべての気象要素が説明変数として有効となった。

4.2.2 冬季のSET*との相関 (Table 12)

SET*と屋上気象データとの相関については、気温が高い相関を示し、また、それより少し低いですが、風速が負の相関となっ

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、その中では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の滞留が起こ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、冬季に風上となる北側の開放度が風通しを良くするために、負に働き低くなるものと考えられる。

また、ステップワイズ法による回帰式は以下のようになる。

$$SET^* = 11.858 + 0.268 * SK.S + 0.906 * Ta - 0.812 * G.R - 0.065 * B.R - 0.375 * U + 0.088 * SK.N - 0.015 * B.V$$

R=0.902

街区の指標としては南天空率が大きな影響を及ぼし、気象要素としては風速が説明変数となった。

5. 熱環境制御技術の検討

これまで得られた知見から、市街地における快適な熱環境を形成する街区形態のあり方について検討する。

Table 11 夏季における街区指標とSET*との相関
Correlation between Building Form and SET*

| 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 |
| 互相関係数R | | 0.952 | | | 0.957 | | |

Table 12 冬季における街区指標とSET*との相関
Correlation between Building Form and SET*

| 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 |
| 互相関係数R | | 0.724 | | | 0.902 | | |

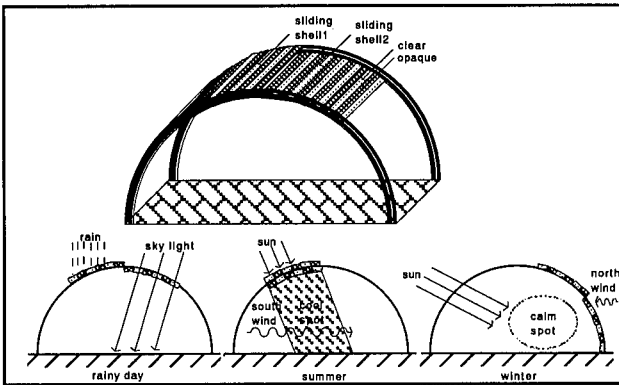


Fig. 3 熱環境制御シェルター
Thermal Environment Control Shellter

Table 13 熱環境制御シェルターの効果試算
Results of Simulation

| | シェルター無 (a) | シェルター有 (b) | b-a |
|---------------------|---------------|---------------|-------|
| 7月28日13:00の SET* | 34.45 | 30.02 | -4.43 |
| 1月23日12:00の SET* | 14.66 | 18.94 | 4.28 |

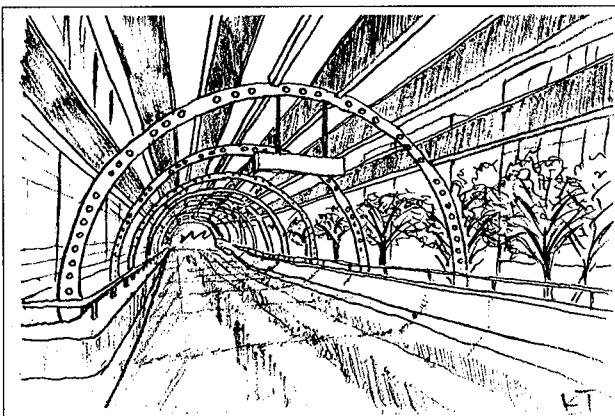


Fig. 4 熱環境制御シェルターの設置イメージ
Situation of Thermal Environment Control Shellter

観測から温熱感を改善するためには、日射と気流をコントロールすることが大きな効果があることがわかった。ただし、その取り扱い方は夏冬で異なる。夏季には、日射が遮断され風通しが良く、また冬季には、日射が入り風が遮蔽された空間が快適となる。ここでは関東地方のように、夏は南風、冬は北風が吹くような地域において、快適な空間を街区形態によって達成することを考える。

まず、街区指標と測定結果の相関関係からみると、容積率の低減、および天空率の増大が熱環境の改善にとって大きい。また、容積率が一定な場合、高層低密型の方が、低層高密度型に比べ熱環境的にはよい。しかし、高層低密型は日照を多く受けるとともに風速も増大する。したがって夏冬ともに快適な空間の設ける方法としては、次のように考えられよう。冬季については、建物の南側に空地を設置することにより、日照を受け、かつ北風を防ぐことが可能である。夏季への対策としては、南側の空地は通風が見込めると同時に日射を増加させてしまう。そのため広葉樹などを植栽して、夏季のみ日射を遮る必要がある。低層高密度型での改善手法としては、東西

街路よりも南北街路にそって空地を設けた方が快適な環境を望むことができる。

また、観測や解析の結果をもとに、局地的に日射や風をコントロールし快適な屋外環境を提供する装置として Fig. 3 のようなシェルターを考案した。これは交互に並んだ透明部と不透明部からなる2枚のシェルが季節や天候に対応して可動し、快適な空間を創出する。都心の再開発地区の街区形態を想定し、高層低密の実測値をもとにシェルターの有無による効果を試算したところ夏冬ともにSET*で4℃以上の改善がみられた (Table 13)。現状では透明感を出すためにガラスで覆って、空調を施したり、逆に空調はしないものの日射を遮る不透明な屋根の仕様によって、暗い感じのあるスカイウェイなどの問題が解決されると考えられる (Fig. 4)。

6. おわりに

街区形態と熱環境の関係を求める観測および評価を夏季と冬季に行った。典型的な測定地点を選ぶことにより少ない測定点から、熱環境と街区形態の関係について多くの知見が得られた。

本研究を行うに当たり、東京大学先端科学技術研究センターの花木啓祐教授よりご指導いただきました。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。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。

参考文献

- 1) 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)
- 2) ASHRAE Standard 55-74, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE, (1974)
- 3) 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, p.751~752, (1991)
- 4) 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, p.41~48, (1996)
- 5) A.P.Gagge et. al.: A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment, ASHRAE Transactions 92-2B, p.709~731, (1986)