

地域開発における熱環境評価

An Evaluation of Thermal Environment in a Zonal Development

○赤川 宏幸* 小宮 英孝* 大塚 清敏*

Hiroyuki AKAGAWA* Hidetaka KOMIYA* Kiyotoshi OTSUKA*

ABSTRACT: The effects on the thermal environment of vegetation and layout of buildings were evaluated with numerical models for an imaginary development of a few square kilometers in area. Heat fluxes from various surface materials such as asphalt, concrete, and so on were calculated with a one-dimensional heat balance model for typical summer days. This model takes into account the static stability of the atmosphere in the boundary layer. Heat fluxes from trees are evaluated both at the tree crown and at the ground under the trees, while heat fluxes from the wall and the rooftop of buildings are also evaluated. Sensible heat fluxes thus obtained were then used as boundary conditions for a three-dimensional simulations of the air flow in the development area. The results of the simulation show that summer hot condition in the area varies significantly with the fractional coverage and the types of vegetation. It turned out that the fractional coverage of 30% of trees seemed to be sufficient to lower the air temperature in the area and that the trees were much more effective in moderating the thermal condition than the low vegetation such as grass. The method of this study can well be applied to optimal land-use design in zonal developments.

KEYWORDS: Heat balance model, Fluid dynamics model, Land-use design, Sensible heat flux

1 はじめに

近年、都市部において、夏季日中の高温化が顕著になっている。したがって、新たに地域開発を行う場合、そうした状況をできるだけ軽減する必要がある、そのためには人工排熱抑制のための省エネルギー型の要素技術の導入や、熱環境の緩和効果があるとされる水面や緑等の適切な配置を図ることが望まれる。しかし、数km四方程度の広がりを持つ地域開発に対し、複数建物の空間配置や、空地への植生・水面の敷設等が、熱環境改善において有する効果を定量的に評価した研究は、いまだ十分には成されていない。本研究では、こうした立場から、開発地区内の最適な土地利用形態について、熱環境の面からの検討を行っており、森林、公園、水面の配置、風の道等の夏季の熱環境の改善における役割を定量的に把握することを目的としている。本報では、1つのモデル開発地域を想定し、建物の配置や植生の敷設が、街区の夏季の熱環境に与える影響について、数値モデルを用いて調べた。具体的には、まず、1次元の熱収支モデルを用いて、典型的な夏季の晴天日における地区内の被覆（道路、植栽、建物外壁）材料の表面温度、および各表面から大気への熱流束の日変動を求めた。次に、そこで得られた結果を熱境界条件として、想定開発地域に3次元の熱流体解析モデルを適用し、建物配置、緑被率や植生の種類の違いに対する街区内の気温分布の変化を計算した。ここでは、その結果を報告するとともに、こうした手法の地域開発計画への適用に関する検討を行う。

* (株)大林組 技術研究所 Obayashi Corporation, Technical Research Institute

2 1次元熱収支モデルによる熱流束の推定

2. 1 各被覆材料に対する熱収支計算

本研究では段階的に被覆表面の熱収支を求める方法を用いた。そのために、まず松本・森山ら¹⁾の1次元熱収支モデルに従って、街区の粗度高さにおける熱収支計算を行い、その後、石野・森山ら²⁾と同様に、地表面での熱収支計算を行った。また、建物壁面や樹冠における熱収支計算も行った。各面における熱収支の計算では、地中および建物壁内部の熱伝導も考慮した。計算の概念図、および熱流束の評価面を図1に示す。粗度高さ、および地面における熱収支式は、それぞれ、次の(1)、(2)のようになる。式中の記号の意味は、表1に示してある。

$$RN_0 + HS_0 + HL_0 + HG_0 + H_0 = 0 \quad (1)$$

$$RN_s + HS_s + HL_s + HG_s = 0 \quad (2)$$

地面の熱収支式(2)には、人工排熱 H_0 が含まれていないが、それは人工排熱が主として建物屋上の冷却塔から供給されるため、粗度高さのみにおいて考慮するほうが適切であると考えられるからである。粗度高さより上の接地境界層内部では、Monin-Obukhovの相似則が成り立つと仮定した。顕熱流束 HS_0 を計算する際の対流熱伝達率は、熱収支式から次のように表わせる。これは、接地境界層全体の熱伝達率を示している。

$$\alpha_{c0} = \frac{C_{pa} \rho_a \kappa^2 \cdot U(z)}{f_m(\xi) \cdot f_h(\xi)} \quad (3)$$

(3)式中の $f_m(\xi)$ 、 $f_h(\xi)$ は、平均風速、平均気温の普遍関数を $\xi (= z/L)$ で積分したものであり、(4)、(5)式を解いて得られる摩擦速度、摩擦温度の収束計算によって決定される。普遍関数にはBusinger³⁾らによる実験式を用いた。

$$u_* = \frac{\kappa U(z)}{f_m(\xi)} \quad (4)$$

$$\theta_* = \frac{\kappa [\Theta(z) - \Theta(z_0)]}{f_h(\xi)} \quad (5)$$

潜熱流束 HL_0 も顕熱流束と同様に扱った。その場合、湿気の伝達率にはLewisの式(表1)を用いた。地中熱伝導流束 HG_0 であるが、(1)式においては、便宜上、粗度高さの気温を、地中熱伝導を解く際の上側境界条件とした。

地表面の熱収支式(2)においては、顕熱流束は地表面温度と粗度高さの気温の差に基づき熱伝達型で表現した。熱伝達率は接地境界層の計算で得られた風速の鉛直プロファイルの地上高1mにおける値に、Jürgesの式、Slatyer, MacIlroyの式(緑地)(表1)を適用して得られたものを用いた。潜熱流束、純放射量の計算には、粗度高さにおけるこれらの計算式とほぼ同一のものを用いた。地中熱伝導方程式では、最新の地表面温度の予報値を上側境界条件とした。また、樹林の場合は、いわゆる2層モデルを用いて、樹冠と樹冠下地表面の両方について熱収支計算を行った。建物の壁面における顕熱流束は、

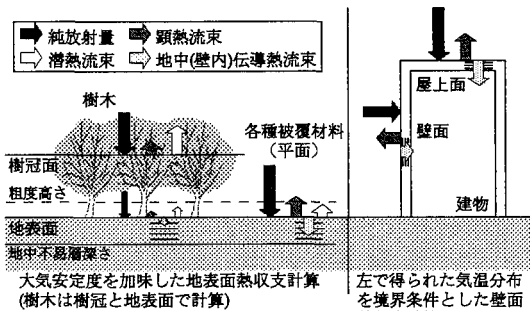


図1 熱収支計算において熱流を評価する面

表1 本文中で用いた記号・式

a_l	: 葉面積密度(m^2/m^2)
C_d	: 樹冠の抵抗係数
C_f	: 建物の抵抗係数
C_{pa}	: 空気定圧比熱($1.16 J/kgK$)
f_h	: 平均気温の普遍関数の積分値
f_m	: 平均風速の普遍関数の積分値
H_0	: 人工排熱量(W/m^2)
HG_0	: 粗度高さにおける地中伝導熱流(W/m^2)
HG_s	: 地表面における地中伝導熱流(W/m^2)
HL_0	: 粗度高さにおける潜熱流(W/m^2)
HL_s	: 地表面における潜熱流(W/m^2)
HS_0	: 粗度高さにおける顕熱流(W/m^2)
HS_s	: 地表面における顕熱流(W/m^2)
L	: モニン・オブコフの長さ(m)
LN_0	: 粗度高さにおける散乱日射量(W/m^2)
LN_s	: 地表面における散乱日射量(W/m^2)
Δp	: 圧力損失($kg/m \cdot s^2$)
RN_0	: 粗度高さにおける純放射量(W/m^2)
RN_s	: 地表面における純放射量(W/m^2)
U	: 風速(m/s)
u_*	: 摩擦速度(m/s)
Δx	: 単位長さ(m)
z	: 地表面からの高さ(m)
z_0	: 粗度長(m)
α_{c0}	: 接地境界層の総括した熱伝達率($W/m^2 K$)
α_a	: 地表面における熱伝達率($W/m^2 K$)
α_{w0}	: 湿気伝達率($kg/m^2 \cdot s \cdot mmHg$)
κ	: カルマン定数(0.35)
Θ	: 温度(K)
θ_*	: 摩擦温度(K)
ρ_a	: 空気の密度(kg/m^3)
ξ	: $= z/L$

Lewisの式 $\alpha_w = \frac{\alpha_c}{C_{pa}}$

Jürgesの式 $\alpha_c = \begin{cases} (5.3 + 3.6U) \cdot 1.163 & [U \leq 5.0 (m/s)] \\ (6.47 \cdot U^{0.78}) \cdot 1.163 & [U > 5.0 (m/s)] \end{cases}$

Slatyer, MacIlroyの式 $\alpha_c = 3.1 \cdot (1.0 + U) \cdot 1.163 (m/s)$

得られた風速の鉛直プロファイルにおける建物中央高さでの平均風速に、Jürgesの式を適用して求められた熱伝達率と、同様に得られた気温の鉛直プロファイルにおける同高さでの平均気温とを用いて、壁面における熱収支式から算定した。壁面に入射する純放射量は、前面地表面（ここではアスファルトと仮定）からの反射日射、長波放射を考慮した。地中、および壁内の熱伝導計算は、クランク・ニコルソン差分によって非定常的に解いた。これらの熱収支式を解くには、接地境界層上端における気温、および日射量、接地境界層内部の風速分布が必要である。気温、日射量については、図2に示すようにモデルの外力として時間の関数で与えた。日射量は8月1日の晴天時のものに相当し、地上100mの気温は、6時～15時、15時～翌日6時でそれぞれ波長の異なる正弦曲線を連続的に接続したもので表現されている。時間積分は6時から始めて5日間実施した。計算に用いた諸量は、表2～5にまとめてある。一連の計算で得られる顕熱流束は、第3節の3次元気流解析で境界条件として用いられる。

表2 共通設定・各定数

接地境界層高さ	100m
境界層上端風速	2.0m/s
地中不易層深さ	0.5m
地中不易層温度	29.0℃
空気の水蒸気圧	21mmHg
建物内室温	26.0℃

表3 各土地被覆別設定

土地被覆	粗度高さ(m)	アルベド	蒸発比	人工排熱(W/㎡)
アスファルト	0.5	0.1	-	50
コンクリート	0.5	0.3	-	50
裸地	0.1	0.3	0.05	-
芝地(草地)	0.1	0.2	0.2	-
樹木	0.5	0.2	0.25	-

表4 構成材料の物性値(地盤)

土地被覆	構成材料	層厚(m)	熱伝導率(W/mK)	容積比熱(J/㎡K)
アスファルト	アスファルト	0.1	0.73	2.05e6
	砂利	0.2	1.40	2.40e6
	土	0.2	0.92	2.00e6
コンクリート	コンクリート	0.1	1.40	2.00e6
	砂利	0.2	1.40	2.40e6
	土	0.2	0.92	2.00e6
裸地	土	0.5	0.92	2.00e6
芝地(草地)	土(湿)	0.5	2.00	3.00e6
樹木	土(湿)	0.5	2.00	3.00e6

表5 構成材料の物性値(建物)

土地被覆	構成材料	層厚(m)	熱伝導率(W/mK)	容積比熱(J/㎡K)
建物壁面	コンクリート	0.14	1.40	2.00e6
	断熱材	0.04	0.037	2.94e4
	合板	0.02	0.18	7.15e5
屋上	コンクリート	0.2	1.40	2.00e6
	空気層	0.28	0.026	1.16e3
	合板	0.02	0.18	7.15e5

2. 2 日変動計算結果

(1) 各土地被覆上の温度の日変動

計算結果は計算開始後5日目の諸量の日変動について

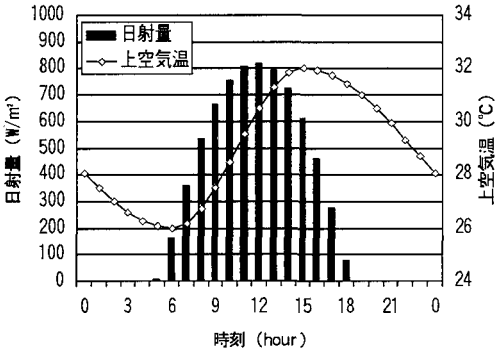


図2 設定日射量・上空気温(接地境界層高さ100m)

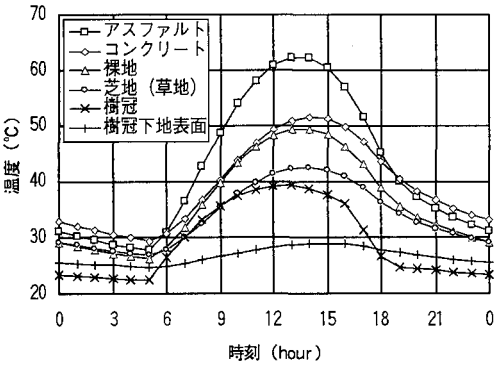


図3 土地被覆別地表面温度の比較

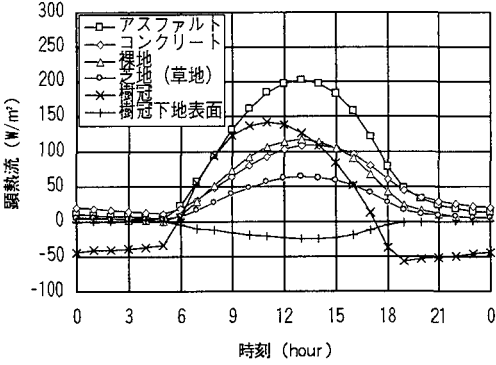


図4 各土地被覆別の顕熱流の比較

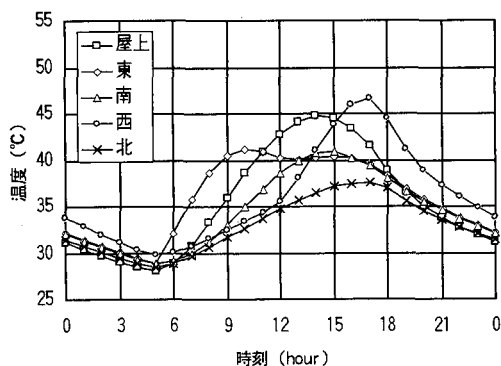


図5 建物壁面温度の日変動

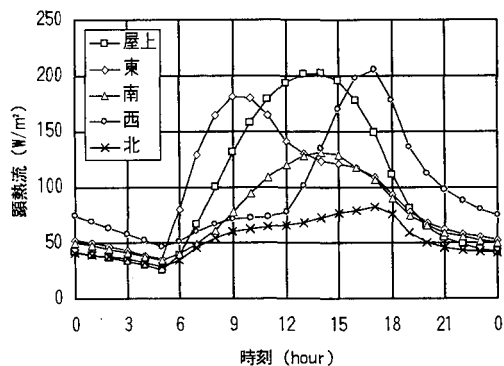


図6 建物壁面における顕熱流の日変動

で示している。図3に各土地被覆上の地表面温度の日変動を示す。アスファルトは日中地表面温度が 60°C を越えている。野外での温度測定に関する文献（例えば、堤ら⁴⁾、西川ら⁵⁾）によれば、夏季日中のアスファルト表面温度の最高値は、 60°C 弱であり、若干本報の方が高めであるが、アスファルト舗装の断面は、用途によって構成材料、層厚が異なるので、妥当な結果であると判断した。コンクリート表面はアスファルト表面よりも約 10°C 低い。これは、アスファルトに比べて、温度伝導率、およびアルベドが大きいためであると考えられる。石野・森山ら²⁾によれば、アルベドは表面温度に大きく影響するため、本研究における仮定（0.3）によるものと思われる。裸地は、比較的乾燥した状態（蒸発比0.05）と仮定したため、日中の最高値は 50°C 近くまで上昇している。

芝地上は最高値が $42\sim 43^{\circ}\text{C}$ と高温となっている。堤ら⁴⁾によれば、草地の表面温度は日中 $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ を推移しており、本研究で得られた値は妥当であろうと考えられる。

樹林に関しては、樹冠と樹冠下地表面の二表面について示す。樹冠表面温度は、日中の最高温度が 39°C であり、他の表面温度と比べて低い。また、樹冠下と比べると 10°C 程度高い。葉の表面積の効果を示す係数（熱伝達率に乘ずる）は、西川ら⁵⁾の実測データを参考にし、樹冠表面温度がほぼ一致するように2とした。夜間は上空気温に対し、樹冠表面温度が 4°C 程度低くなっており、樹冠下地表面温度は、日中を通し、上空気温よりも $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 低い。

(2) 各土地被覆表面上の顕熱流の日変動

図4は各被覆表面上の顕熱流束の日変動を示している。アスファルト上が最も大きく、日最大値は約 $200\text{W}/\text{m}^2$ 、ついで裸地、コンクリートで約 $110\text{W}/\text{m}^2$ 、芝地は約 $60\text{W}/\text{m}^2$ である。顕熱流束は樹冠を除き、午後にピークが現われる。人工排熱を想定してあるアスファルト、コンクリートは夜間も正值であるが、裸地、芝地ではほぼ0となる。樹冠は午前中に約 $140\text{W}/\text{m}^2$ の日最大値を示すが、夜間は負値となり、その絶対値も大きい。樹林下では僅かではあるが、日中負値となっており、気温低減効果を示している。

(3) 建物壁面

建物の東西南北壁面、および屋上面の地表面温度の日変動を図5に示す。東面は午前中最高温度を示すが、その値はそれほど高くない。それに対し、西面は午後に最高温度を示し、その値は大きい。南面は太陽入射角が小さいので、小さな値となっている。

図6は各壁面の熱収支のうち、顕熱流束について日変動を示したものである。日変動の仕方は壁面温度のそれと類似しており、その値は全壁面で日中を通し正值である。ただし、屋上冷却塔から排出される顕熱流束は、ここでは考慮していない。それに関しては、次節の3次元気流計算において、建物の屋上の計算格子に熱源として付加される。

3 地域開発計画における広域熱環境評価

3. 1 対象地区の概要

対象地区の概要を図7に示す。開発対象の基本モデルとして、水辺に立地する東西約2km、南北約700mの地区を想定した。中央街区の容積率を600%として中層建物（50m）を配置、東西街区を容積率200%として低層建物（25m）を配置した。中央と北側には地区を東西にまたぐ道路を配置した。背後の既存市街地は、容積率200%、建物高さ12mの一様な街区の連続であると設定した。また地区の両端には入り江を配した。

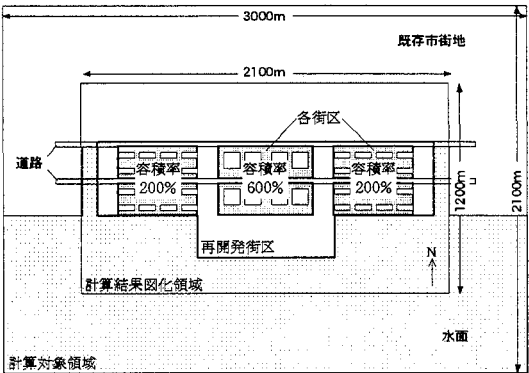


図7 3次元気流計算領域と街区設定

3. 2 3次元気流計算

(1) 計算概要

計算にはSIMPLE法⁶⁾による3次元非定常解析法を用いた。移流項には1次精度の風上差分を用い、乱流補正には標準k-ε型2方程式モデル⁷⁾を用いた。計算条件を表6に示す。計算領域は対象再開発地区を含む東西3km×南北2.1km×高さ500mの3次元直方体領域である。メッシュサイズはx, y方向には30mである。z方向は上空ほど粗いが、建物高さ境界付近は細かく設定した。8月1日(晴天日)の正午を開始時間として実時間約50分に相当する時間積分を行った結果、流れ、および温度場はほぼ定常に達した。

風向は対象地区への斜めからの卓越風を想定して南西とし、風速は高さ100mにおいて2.0m/sで、1/4乗のべき乗則に従うと仮定した。流入気温は熱収支モデルの上空気温における正午の値30.5℃と設定した。

建物、樹木の扱いに関しては、メッシュ間隔が30mと粗いために、これらを物体としては配置せず、(6)、(7)式で示すように、対応する計算格子に抵抗として与えた。このとき建物の流体占有率は0.01、樹林は0.9とした。

建物：Δp = 1/2 ρ_a C_f U |U| (6)

樹冠：Δp = ρ_a C_d a_f U |U| Δx (7)

建物の抵抗係数C_fは建物高さ、形状によって異なるが、建築物荷重指針⁷⁾の風荷重から、風力係数の値を用いている。樹冠は抵抗係数C_d = 0.2、葉面積密度a_f = 2 m²/m³である。

境界条件として用いる各土地被覆別の熱流発生条件を表7に示す。これらの値は、前節の熱収支計算の結果の5日目正午における値である。水面に関しては、小宮⁹⁾によって渦相関法によって東京湾で測定された結果から、夏季の顕熱流はほとんど0に近いことから0.0とおいた。熱流の与え方を図8に示す。アスファルト、コンクリート、裸地、芝地、および樹冠下地表面のように地盤面の場合には、最下層計算格子に発熱を、樹冠の場合には、樹冠部の計算格子 (z=4~7m) に発熱を与えている。樹冠下地表面は負値であるので、熱が奪われ

表6 3次元気流計算の設定条件

計算領域	3000m × 2100m × 500m
メッシュ分割	100 × 70 × 15 = 105000 (x,yは30mメッシュ, zは上空ほどメッシュ間隔が大)
設定日時	8月1日(晴天日), 正午
流入風向	南西
流入風速	2.0m/s (高さ100m), 1/4乗則
流入気温	30.5℃
流出	自由流入
上空境界	フリースリップ
地表面応力	対数則

表7 各土地被覆別の熱流条件

土地被覆	顕熱流(W/㎡)	土地被覆	顕熱流(W/㎡)
アスファルト	197.7	建物壁面(東)	141.3
コンクリート	102.2	建物壁面(南)	119.8
裸地	113.8	建物壁面(西)	77.7
芝地	61.1	建物壁面(北)	65.5
樹冠	137.6	屋上面	193.5
樹冠下地表面	-24.1	人工排熱(延床面積1㎡当たり)	
水面	0.0		50.0

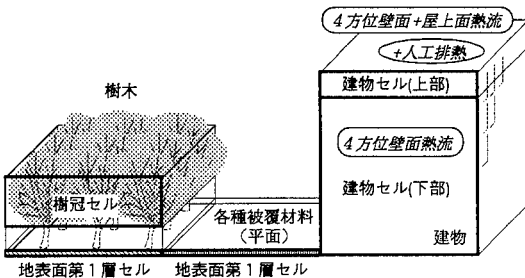


図8 3次元気流計算における熱境界条件の与え方

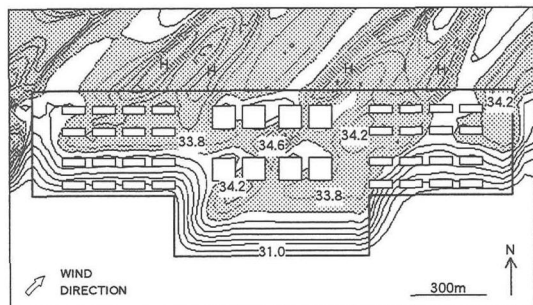


図9 緑被率0%時の高さ2mでの気温分布

*ハッチは33.4℃以上（数値は極値を示す）、等値線は0.4℃きざみ
*植生は均等に分布

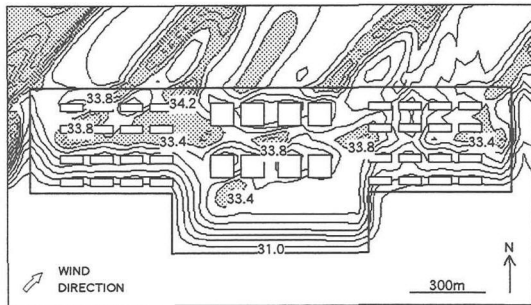


図10 緑被率30%時の高さ2mでの気温分布

ることになる。建物に関しては、東西南北4壁面の熱流積算値を最上部を除く建物セルに、また最上部のセルには4壁面の他に延床面積分の人工排熱量（50W/m²）を積算した値を発熱として与えている。

(2) 計算結果

図9は基本モデルの建物配置において、街区内に緑被が全く無い状況（緑被率0%）に対する地上2m気温分布を示す。被覆は道路部分のアスファルトを除き、全てコンクリートであるとしている。海岸線から遠くなるにつれて昇温し、北側の街区、および背後の既存市街地の大部分で流入時の気温に対し3℃以上の上昇が見られる。既存市街地には熱の相対的な高温部が帯状に現われている。また、海岸線の隅角部や入り江、海岸突出部の後背部に低温部が見られる。

図10は街区全体の緑被率を30%に上昇させた場合の気温分布である。この場合の植生は樹木を設定しており、樹木は街区内に均等に配置されている。図9と比べて高温域（ハッチ部、33.4℃以上）の面積の減少が見られる。また風下の市街地にもその効果が及んでいる。高温域はアスファルト道路に沿って現われ、道路の暑熱対策の重要性が示唆される。

図11は図10の場合と容積率を同じに保ったまま、建物配置と高さを変えた例である。ただし、建蔽率が下がった分だけ、植生の面積を増やしており、緑被率は32.7%となっている。ただし、緑の密度としては変化していない。図10の建物配置の場合と比べて高温域の分散が図られ、さらなる気温低下が見られる。

図12は樹冠を持つ植生（樹木）と持たない植生（芝生）の気温低減効果の差異と、緑被率との関係を示したものである。ここに示してある温度は、基本モデルの配置において、開発地区全体の地上0～1m、および2～4mの気温を平均して求めたものである。まず、地表面第1層（z=0～1）の平均値で見ると、芝生の場合、緑被率の上昇による気温低減効果は非常に小さく、建物、道路以外を全て芝生で覆っても、1℃弱の低減効果しか現われない。一方樹冠を持ち、樹陰を形成するような樹木の場合は、緑被率約30%までは緑被率の上昇にとともに平均気温が比較的低下している。30%以上では気温の低下の割合がやや小さくなるが、緑被率が最大に

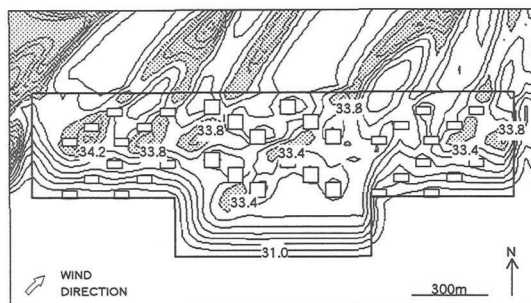


図11 緑被率32.7%時の高さ2mでの気温分布

*建物配置を分散、高層化（中央90m、サイド50m）
*植生密度は図10と同じ（高層化で空いたスペースを緑化）

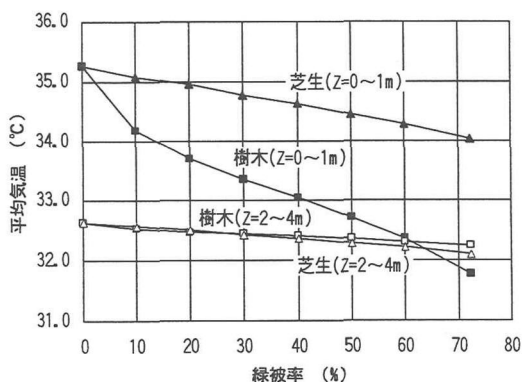


図12 街区内の断面平均気温

*樹木と芝生の違い、および地表高さの違い

近づくにつれ、その効果が再び大きくなる傾向が見られる。緑被率30%の時、芝生の場合との平均気温の差は約1.5℃に達する。高さ2～4mでは、樹木と芝生による平均気温の差はあまり見られず、値の低下もあまり見られない。このように、一概に緑被率といっても、植生の種類によって熱環境は大きく変わることが分かる。

街区全域の気温を下げるためには、緑被率を大幅に上昇すれば良いことだが、現実には10～30%程度が実現可能な値である。したがって、少なからず高温域が生じるものと考えられるが、高温域を作るべきではない場所の優先性を考慮した計画が、建物、植生等の配置を考えることによって可能である。

4 まとめ

数km四方の地域開発における夏季の熱環境に対する建物配置、植生の影響を調べた。解析では、各被覆の熱条件を、大気安定度を考慮した1次元熱収支計算によって計算し、それを境界条件として3次元気流計算に適用した。対象地区として、水辺に立地する地域開発を選び、被覆材料の違い、緑被率、植生の形態の違い等によるモデルケースを設定し、夏季日中の卓越風向のもと気温分布を評価した。以下得られた知見を示す。

1) 熱収支の日変動計算によって、同時刻の地表面の各被覆、建物壁面、屋上面、および樹木の樹冠からの顕熱流束の推定値が得られた。

2) 樹冠を持つような樹木の場合、緑被率30%程度でその気温低減効果が大きいことが分かった。

3) 緑被率が高くても、その気温低減効果は植生の形態によって異なる。樹冠を持ち、樹陰を形成するような樹木は、芝生や植え込みのような背の低い植生に比べ、日射を遮り、熱を上方へ拡散する効果があるので、歩行レベルの気温低下に効果的である。

4) 建物群の配置は、高温域の分布状態に大きく影響を及ぼす。したがって、風の通り易さと熱の分散効果とを合わせて配置を決めることが望まれる。

今後は、小街区の熱環境評価を、人間の快適性、および建物のエネルギー負荷の軽減等を考慮した要素技術の開発と関連させて行うことが課題である。

謝辞 熱収支計算をするにあたり神戸大学の森山助教授には、親切的な御助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松本, 森山, 他: 大気安定度を考慮した地表面熱収支の計算法について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 589 ~ 590, (1985)
- 2) 石野, 森山, 他: 1次元熱収支モデルによる数値計算と地表近傍環境の観測による都市熱環境解析に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 469, p. 45 ~ 51, (1995)
- 3) Businger, J. A. *et al.*: Flux-profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer, *J. Atmos. Sci.*, 28, p. 181 ~ 189, (1971)
- 4) 堤, 津村: 植栽と人工日射遮蔽物近傍における熱環境の実測調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 603 ~ 604, (1995)
- 5) 西川, 成田, 他: 緑のアトリウムによるクールスポットの形成手法に関する研究 (その5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 619 ~ 620, (1995)
- 6) Patankar, S. V.: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, (1980)
- 7) Launder, B. E. and Spalding, D. B.: *Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, London and New York, (1980)
- 8) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, (1993)
- 9) 小宮, 岡, 他: 都心と東京湾における地表面上の熱流の測定, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 463, p. 65 ~ 73, (1994)