

街区における熱環境改善計画の効果に関する 熱収支・エネルギー解析

浦野 明¹ 稲井康弘² 花木啓祐³

- 1 理修 大成建設(株)技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)
2 工修 東京大学大学院工学系研究科(現在国土交通省) (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
3 正会員 工博 教授 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

屋外の人体の体感温度と建築物における消費エネルギーにあたる環境共生計画の効果を定量的に予測することを試みた。このため、放射による熱収支解析と建物内部の伝熱・空調消費エネルギー解析を連成した解析システムを構築した。外壁塗装・街路樹を例にとったケーススタディにより屋外温熱環境と空調用エネルギー消費量との関係について考察を行った。街路樹の配置による熱環境改善効果は屋内外で認められた一方、外壁塗装壁面の短波吸収率を低くした場合は、空調の消費エネルギーが低下するものの、屋外の温熱環境指標が高くなるというトレードオフの関係が定量化された。

Key Words: urban canyon, thermal environment, sensible heat flux,
environment-symbiosis, radiosity method

1. はじめに

地球環境を保全するという観点から、環境負荷の小さな都市システムを実現するための取り組みが近年始まっており、都市の熱環境を緩和し周辺の自然環境と調和した地域環境を創造しようとする試みがなされている。その中で緑化・建物配置計画など建物周辺の街区の熱環境の改善を目的とする提案が様々に出されている。しかしそれらの提案に対して、街区の熱収支、屋外の人体の体感温度の改善のみならず、建築物における消費エネルギーの削減効果を事前に定量的に予測することは容易ではない。このため、環境共生を考慮した実際の開発計画の環境改善効果の予測が定量的なものに至らず、定性的な言葉による表現に留まる例がほとんどである。また、都市のヒートアイランド現象の原因のうちかなりの部分が、人工排熱・建築物による熱容量などマイクロスケール(街区規模)の熱・運動量収支のバランスの変化が主な要因となっている。マイクロスケールの物理過程の水平方向の広がりにより、ヒートアイランド現象発生時のメソスケール(広域～都市規模)の現象の多くが左右されており、街区の熱環境の正確な予測・評価が求められている。

街区の温熱環境の定量的予測には中村・平岡¹⁾による2次元空間の人体の熱負荷の解析をはじめとして、こ

れまでいくつかの研究がなされてきた。吉田ほか²⁾は緑化による屋外の人体の体感温度の変化を予測した。また、上野ほか³⁾は建物の消費エネルギーを解析するモデルにより地域の熱環境を予測した。しかしこれらの研究では壁体内の伝熱が固定値または瞬時定常として扱われ壁体内の蓄熱が無視されており、また上野ほか³⁾では街区規模の気流や放射の分布の影響が取り扱われていない。街区・街路樹の形態による日射の反射の影響の変化が各建物の負荷や体感温度に及ぼす効果や日中に壁体内に蓄積された熱が夜間や翌朝の負荷に及ぼす影響を考慮するためには、蓄熱や放射の相互反射の影響を解析して定量化する必要がある。

亀井川ほか⁴⁾、西岡・松尾⁵⁾は市街地の熱収支を考慮したエネルギーシミュレーションにより街区構造ないし建築形態の違いがエネルギー需要に与える影響を解析している。しかし、同一の街区構造が無限に続くことを仮定した鉛直一次元モデルを用いているため、実際に存在または設計される現実の街区の3次元構造に基づく熱環境を予測・評価することはできない。

実際に街区の開発計画・設計を実施する際には、プロジェクトの水平的広がり、コスト、すでに存在する街路などの都市構造の問題、法規制などさまざまな制約を受けるため、熱環境を改善するための計画に対する改良案

として、鉛直 1 次元モデルなどの簡易的なモデルで表現できるほどの大幅な街区の改変を伴う計画を実施することは現実的ではない場面も少なくない。このような状況では、大幅な街区の改変の影響のみならず、街区の構成体の一部の形状・材質などを若干修正することによる環境緩和効果を定量的に表現するために、街区の形状・物理特性の差異を極力忠実に再現して環境へ与える影響を解析・評価可能なモデルを開発することが、“Think globally, act locally.”と呼ばれる地球環境保全策の一助になると考えられる。

本研究では、実際の街区の環境共生計画に対する定量的な評価を可能にするシステムを開発することを目標に、3 次元的に複雑な形態を有する市街地空間における体感温度・空調消費エネルギーを予測することを目的にした。放射による熱収支過程に着目した数値解析と建物内部の伝熱・空調エネルギー解析を連成することにより、街区構成を変化させた場合の空調消費エネルギーの予測を試みた。外壁塗装・街路樹を利用した環境改善計画が屋外温熱環境と空調用エネルギー消費量に与える効果について考察を行った。

2. 解析手法

(1) モデル全体の概要

本モデルは相互に関連している建物内の室温変動、空調消費エネルギー、建物間の長波・短波の相互反射、屋外の人体の体感温度を解析するものである。モデルは大別して室温モデル、放射モデル、気流モデルの3つからなる(図-1)。

室温モデルは、街区内の各建物の室温、空調負荷量などを解析することにより、壁体表面の温度を算出する部

分であり、放射モデルと連成して解析している。放射モデルでは街区内の壁体表面を微小領域に分割してその領域間の相互反射を解析している。気流モデルは都市キャンपी内での気流の空間分布を解析するものである。村上ほか⁹⁾による $k-\epsilon$ モデルを等温気流について適用した式を用いており、その結果を人体の体感温度の解析に利用する。以下に各モデルについて述べる。

(2) 室温モデル

室温モデルは建築物内部の温熱環境に影響を及ぼす図-2 に示す各要素を考慮して壁面温度や室温、空調負荷量などを算出している。本研究では、熱負荷・空調システム標準シミュレーションプログラムとして代表的なものである熱負荷計算プログラム⁷⁾(プログラム名: HASP/ACLD/8501, 以下 ACLD)、エネルギーシミュレーションプログラム⁸⁾(プログラム名: HASP/ACSS/8502, 以下 ACSS) を元に改良したモデルを開発した。本モデルでは、ACLD の解析手法に基づき建物壁面の非定常伝熱解析を行って動的熱負荷を計算すると共に、ACSS の解析手法に基づき実際の空調機器の特性等を考慮して消費エネルギー量等を算出する空調システムシミュレーションを行った。解析の時間間隔は1時間である。

なお、西岡・松尾⁹⁾では ACSS を用いず、ACLD のみを元に改良している。また、亀谷ほか⁹⁾では本研究と同様 ACLD, ACSS を用いて建物からの熱環境負荷を解析しているものの、街区形態が壁面の放射収支に与える影響を解析せず熱源機器の特性の違いに着目しているところが、本研究と異なる。

室温モデル内では、都市側と建築内部(以下、室)との伝熱を考える上で両者の境界条件を次のように想定している。

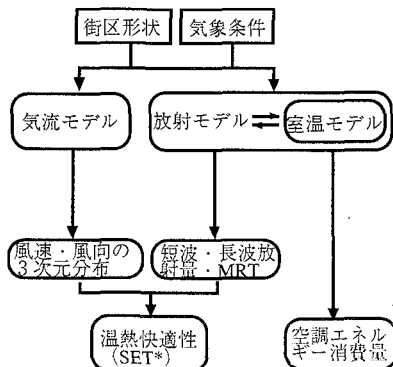


図-1 モデルの全体構成

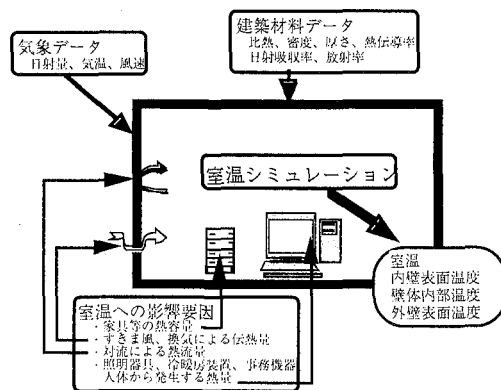


図-2 室温モデルの概略

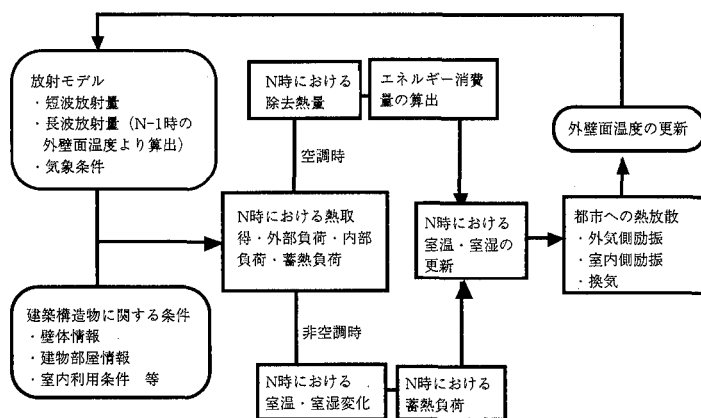


図-3 室温室温および空調除去熱量の計算フロー

- (a) 都市側に位置する外壁表面では気象条件に伴い境界条件は変化する。
 (b) 室では空調等の手段により常に一定の内部温度（以下、室温）に保たれている状態を基準条件とする。

この仮定に基づき、計算される熱量等は (b) で定めた基準条件を室内側で保つための値とみなすことができる。すなわち、この境界条件の下では外気側の表面温度が内壁側の表面温度よりも高い場合には室内側へ熱が流入していき、逆の場合には室内側から熱が流出していく（室内側へ負の熱が流入する）。

壁体内の蓄熱の解析は、松尾ほか⁷⁾による応答係数法による蓄熱を考慮した熱伝導式による。境界条件として、屋外側および室内側の熱取得を考慮する。外壁からの貫流熱取得、窓ガラスからの貫流熱取得、窓ガラスからの透過日射熱取得、換気による熱取得、内部負荷源による熱取得冷房負荷、および蓄熱負荷が考慮される。壁体の熱伝達係数は、対流分と放射分の合計値を一定と仮定しており、外壁表面の係数を $23.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ 、室内側の壁表面の係数を $9.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ とした。

建物の外壁表面における温度は、通常の ACLD、ACSS では直接解析されない。西岡・松尾⁵⁾による方法に従って算出した。ACSS モデルにおいては、詳細な空調機器に関する条件が入力され、ACLD 部と ACSS 部が連成して計算されることにより室温および空調除去熱量が計算される。しかし、これらの空調機器に関する詳細な条件設定を計算毎に、また計算街区内の多数の建築物群に対して個別に行うことは非常に煩雑な作業となる。

そこで次のような仮定を設けて、すべての建物に対して一括して簡便な計算方法を適用することにより室温および空調除去熱量を算出した。

- (a) 空調システムの稼働中は空調負荷がすべて除去され、室温は基準室温に保たれる。
 (b) 空調システムの停止中は室温が自然室温となる。
 (c) 空調負荷は外部負荷と内部負荷から構成される。空調機器から発生する装置負荷は空調対象の室の外で発生すると仮定し、室内に与える負荷としては考慮しない。

図-3 は上記(a)～(c)の仮定をもとに新たに設けた室温・空調除去熱量算出方法の計算フローである。

地表面の温度は、地面の一定深度以下での温度は一日を通して一定であるとの仮定に基づき、建物外壁面温度と同様の解析方法により算出した。土壌の一定深度における地中温度の初期値は、洪田ほか¹⁰⁾による研究に基づき決定した。

風速の空間分布は体感温度には大きな影響を与える一方、壁面温度に与える影響は小さいことが、筆者らが複数の風速条件に基づき実行した室温モデルの結果がほとんど変わらないことにより確認した。このため、室温モデルの解析の際に考慮する壁面近傍の風速は、気流モデルの値を用いずに、建物の空調熱負荷計算を目的に日本の主要都市について整備されている一種の気候値である標準気象標準気象データ⁷⁾の風速の値を各壁面について一様な値として用いた^{付録1)}。

(3) 放射モデル

放射モデルは CG の分野から浦野ほか^{11), 12)} によ

り都市キャノピーの放射解析手法として提案・導入されたラジオシティ法を用いた放射解析手法を改良した。ラジオシティ法は物体表面での反射の角度依存性がない完全拡散反射を仮定しており、幾何学形態が複雑な都市の構造物同士の放射の相互反射を解析することが可能である。なお、西岡・松尾⁹⁾も同様のモデルを用いている。

放射収支における緑化の影響については、植栽の樹冠部を短波放射に関しては半透明、長波放射に関しては不透明の物体と仮定して、解析を行った。短波放射は、放射成分の遮光効果による放射収束計算をラジオシティ法にもとづいて行った。収束計算中で算出される放射熱流束を樹木の存在による放射減衰率により補正することによって樹木による遮光効果を表現した。すなわち、面 i と面 j との間に樹冠が n 個存在する場合、面 i から面 j への放射量は樹冠 1 つを透過する毎に一定割合ずつ減衰していくものとし、総減衰率 $\lambda_{T,ij}$ は(1)式によって求められるとする。ここで、収束計算毎に放射量に減衰率を乗じて計算を行うのではなく、あらかじめ求められている面 i から面 j への形態係数 F_{ij} を(2)式に基づき総減衰率を用いて F'_{ij} に補正することによって遮光効果の導入を図った。

$$\lambda_{T,ij} = (1 - \phi_{trans})^n \quad (1)$$

$$B_{j,i} = \rho_j (\lambda_{T,ij} \cdot B_i) F_{ij} A_i / A_j = \rho_j B_i F'_{ij} A_i / A_j \quad (2)$$

ϕ_{trans} : 樹冠の放射透過率

$\lambda_{T,ij}$: 面 i と面 j の間の樹木による放射減衰率

B_j : 面 j からの放射を受けて面 i で反射した放射束

ρ_i : 面 i の反射率

B_i : 面 i における放射発散度

A_i : 面 i の面積

F_{ij} : 面 j に対する面 i の形態係数

F'_{ij} : 面 j に対する面 i の樹冠による放射減衰を考慮した形態係数

また、長波放射解析における樹木の考慮については、樹冠表面の放射温度は気温に等しいものとして、初期長波放射量の設定を行った。

(4) 気流モデル

気流モデルは風速の空間分布を算出することにより人体の体感温度の解析を行う部分である。人間の体感温度については従来様々な指標が提案されているものの、ここでは村上ほか⁹⁾と同様、比

較的に一般的に用いられている標準新有効温度（以下 SET*）を用いた。SET*は、環境側要素の気温、放射、湿度、風速と人体側要素の着衣量、代謝量を考慮する温熱環境の評価指標であり、解析手法は Gagge et. al.¹³⁾に基づいた。上記要素のうち、放射は放射モデルにより、風速は気流モデルにより求められる。

気流モデルは村上ほか⁹⁾による $k-\epsilon$ モデルを等温気流について適用した式を用いた。風速に与える樹木の効果については吉田ほか²⁾と同様に Yamada¹⁴⁾によるモデルを用いて、樹冠の葉面積密度に比例する樹木の風速に対する流体力学的抵抗と乱れの増大の効果の項をそれぞれ平均流および乱流エネルギーの輸送方程式に付加して解析した。本研究で輸送方程式を解析しているのは、平均流、乱流エネルギー、乱流の散逸である。側面方向の流入境界条件に、標準気象データに基づく風向・風速値を与えて定常計算を行うことにより、1 時間毎の空間の風速分布を求めた。

村上ほか⁹⁾では熱量に対する輸送方程式も解いており、熱量に対する輸送方程式を室温・放射モデルと連成させて解くことにより、空気温度の空間中の 3 次元分布を求める手法も考えられる。しかし街区内では大気の影響が活発であるため、水平方向に数 100 m の空間スケールの範囲内では、空気温度は多くは 1℃以内、最大でも数℃前後の空間分布しか持たないことが多い一方、特に日中は壁面温度が 10～20℃程度の分布を持つことが多い。

街区の空間スケールで熱量に対する輸送方程式を解析する場合は、解析領域の風上側に与える側面境界条件の空気温度分布と実際の分布の違いによる誤差と、解析結果による空気温度の空間分布の偏差が、ほぼ同等の絶対値を有することが予想され、計算結果の空気温度分布の妥当性に疑問が残る。吉田ほか²⁾では同じ街区が無限に連続していると仮定して、街区モデルの解析領域を側面で周期境界により接続することにより、上記の側面境界条件の問題を解決しているものの、この仮定の元では、同じ建物形状が連続していないことが一般的である、実在の街区を解析することができない。

したがって本研究では壁面温度の正確な再現に重点をおく一方、屋外の空気温度の空間分布は無視し、解析領域について一様な値として標準気象データによる当該日時の気温の値を用いて解析し

た^{付録2)}。湿度についても空気温度と同様に標準気象データを用いた。

3. モデルの有効性の検討

室温モデルの蓄熱計算部分の検証については、松尾ほか⁷⁾、西岡・松尾⁵⁾などにより検討が行われているものの、蓄熱を無視しているモデルも提案されている^{2), 3)}。ここでは、環境要因となる物理要素の計算結果に対する、壁体の蓄熱の影響を検討するために、実測データを取得し壁体の熱容量を考慮しないモデル（モデルA）と比較計算を行った。なお、室温モデルのうち空調システムシミュレーションの部分の妥当性については、松尾ほか⁸⁾などにより多くの検討が行われているため、本研究では、室温モデルにより解析された結果と屋外の環境の物理要素が相互作用するつなぎの部分の要素として、建物の外壁面温度に着目して実測および比較解析をおこなった。

一般に、空調時の室温が空調システムにより一定にされている場合よりも、非空調時の室温が熱的バランスにより変動している場合の方が熱的環境の予測が困難である。また夜間など空調していない時間帯に壁体に蓄熱された熱が、屋外の体感温度、朝方など空調の立ち上がりの時間帯の空調負荷に大きな影響を与えることを考慮し、検証対象は非空調時とした。ただし、モデルAでは壁体の温度を計算しないので、壁体の室内側の表面温度の影響を受けた室内の室温の変化を解析することができない。このため同モデルでは室温を境界条件として既知の値を与える必要があるため、時間的に一定の温度として20℃を与えて解析した。

室温モデルは壁体を複数層に分割し、各層間で非定常熱伝導による伝熱計算を行っている。その伝熱過程において、一部の熱量は壁体に蓄積される。分割された壁体層kにおける熱流束（フラックス）を q_k 、比熱を C_{pk} 、密度を ρ_k 、厚さを Δx_k 、壁体層前後の温度差を $\Delta \theta_k$ 、時間間隔を Δt とすると、各壁体について、下記の式に基づき解析した。

$$q_{k-1} - q_k = c_{pk} \rho_k \Delta x_k \frac{\Delta \theta_k}{\Delta t} \quad (3)$$

モデルAは定常熱伝導を仮定した。壁体を一様に扱い室温 t_i 、壁面温度 t_s と壁面入射量を境界条件として、壁体の熱コンダクタンス C および壁体の屋外側、室内側の表面熱伝達率 α_s 、 α_r を用いて熱流束 q を求める(4)式を用いた。

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{\alpha_r} + \frac{1}{C}} (t_s - t_r) \quad (4)$$

実測概要を表-1に示す。実測期間のうち、晴天にめぐまれた10月27～28日をモデルの検証対象日時とした。室温モデルとモデルAの計算条件を表-2に示す。蓄熱の時間的影響を考慮して、室温モデルの場合、対象日時の日1日前から計算を開始した。なお、対象壁面は地表面・前面の建物壁面より十分に高く、放射の照り返しの影響は少ないとして、放射モデルは用いていない。また、室温モデルに与える気温は気象庁東京管区気象台による観測値を用いた。

室温モデルの計算結果と実測値の比較を外壁表面温度について図-4に示す。最大値の値が実測値より小さくでているものの、最大値の出現時間（8～10時）など室温モデルと実測値の壁面温度の絶対値及び経時変化は概ね一致しており、ほぼ現象の再現が図られていると言える。一方、モデルAはピーク時を過ぎた11～14時は計算値が実測値より3℃程度高い一方、夜間は2℃以上実測値より低

表-1 実測概要

測定地点	東京大学工学部14号館7階一室（東向） 幅3.6m×奥行8.1m×高さ2.7m
測定日時	1997年10月26日～11月4日
測定項目	外壁面・内壁面表面温度、室温
測定機器	T型熱電対（直径0.3mm）
測定間隔	1分

表-2 計算概要

	室温モデル	モデルA
対象日時	1997年10月27～28日	
初期壁体温度	20℃	
気象データ	気象庁東京管区気象台データ	
外表面日射吸収率	70%	
外表面長波放射率	90%	
外表面総合熱伝達率	20W/m ² K	
室温	計算により算出	20℃（一定値）
計算時間間隔	1時間	

表-3 検証対象建物の建築素材（室内側から順に示す）¹⁵⁾

	厚さ [m]	熱伝導率 [W/mK]	比熱 [J/kgK]	密度 [kg/m ³]
ウレタン	0.015	0.025	1250	30
気泡コンクリート	0.1	0.17	1130	710
中空層	0.095	0.3	1000	1.17
アルミ板	0.005	210	880	2310

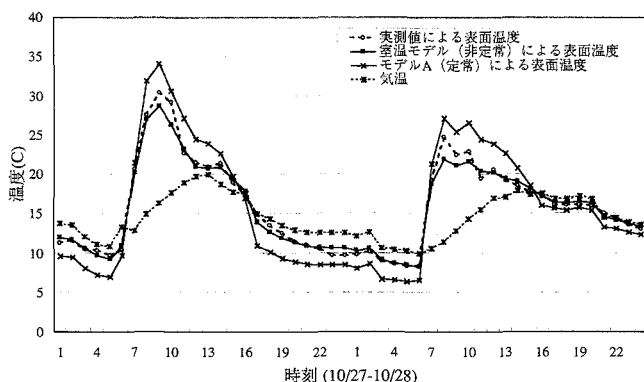


図-4 各モデルと実測値の外壁表面温度の比較

い値を示している。モデル A では壁に熱容量を与えていないために、壁面に入射した放射量が全て当該時刻の表面温度に還元されているため、各時刻の表面温度の振幅が実際より大きく解析されている。以上の結果より、室温モデルの有効性が確認された。

4. 環境改善計画の効果についての解析

前章までに開発・検証されたモデルを用いて、街区の計画に対する熱環境の定量化を行った。図-5に示す5階建て事務所系建築物を仮想的な解析対象とし、東京の気象条件で8月8日から10日の1時間毎の標準気象データの値に基づき解析を行い、10日の解析結果を考察対象とした。各階の床面積は900m²、外壁面の長波吸収率は90%と設定した。短波吸収率は特に変更がない解析ケースでは標準値として80%とした。人体からの発熱照明、器具からの発熱空調システムや発熱源は9時から18時まで稼働し、この時間外では稼働していないものとしている。また空調時の基準室温・湿度はそれぞれ26℃、50%とした。なお、空調システムは、空気熱源パッケージエアコンを仮定した。

図-6、表-4、5に示した街区形態を想定し、SET*および建築物の空調エネルギーを算出し評価を行った。なお、放射モデルでは対象街区の表面を一辺3m四方の均等な格子に分割した。気流モデルは街区の範囲を鉛直方向には地表面付近で1m間隔、上空では最大60m間隔、水平方向では建物近傍では1.5m間隔、最大で6m間隔の32×32×24の不均等な格子に分割し、解析対象時刻の標準気象データの風向・風速値を側面境界条件に与えて計算を行った。なお解析の安定性を図るため、気流モデルでは水平方向の解析領域は図-6の街区範囲より外側に50mずつ拡大して解析した。

解析ケースとして、外壁面の塗装を変更した場合およ

び街路樹の配置の有無について比較を行った。

(1) 外壁面の塗装を変更した場合

外壁面の塗装を変更することにより外壁表面の短波

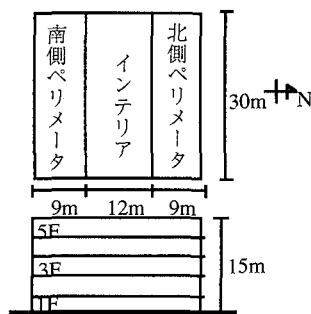


図-5 計算対象建築物

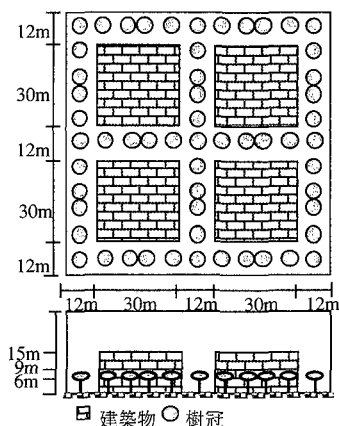


図-6 街区と街路樹の設定 (上：水平断面、下：鉛直断面)

表-4 解析対象街区の素材（地面を除き室内側から順に示す）

壁体種別	素材名	厚さ[mm]
外壁	ラスボード	3
	硬質スチレン発泡材	50
	P Cコンクリート	150
屋根	石棉吸温材	19
	中空層	50
	普通コンクリート	150
	スチレン発泡材	20
	シンダーコンクリート	100
地面	タイル	50
	PCコンクリート	50
	土壌（ローム質）	100

表-5 各素材の熱物性値¹⁵⁾¹⁶⁾

素材名	熱伝導率[W/mK]	比熱[J/kgK]	比重[kg/m3]
石棉吸温材	0.641	837	300
硬質スチレン発泡材	0.350	921	38
スチレン発泡材	0.035	1260	30
シンダーコンクリート	0.840	960	1605
タイル	1.300	840	2400
普通コンクリート	1.400	879	2200
ラスボード	0.152	1130	910
PCコンクリート	0.175	765	2400
土壌（ローム質）	1.050	2302	1450
保水層	17.9	0	-
芝等の熱抵抗	0.33	0	-

放射吸収率が変化した場合の屋内外熱環境への影響を計算し考察を行った。塗装を変更することにより、短波放射吸収率以外への物理量への影響はないものと仮定した。なお、本ケースでは街路樹はないものとして解析した。短波放射吸収率を次の3種類に定め計算を行った。

- (a) 暗色系塗装； 短波放射吸収率 = 80%
- (b) 明色系塗装； 短波放射吸収率 = 40%
- (c) 中間色塗装； 短波放射吸収率 = 60%

なお、長波吸収率は一律90%とした。

図-7 に建物3階南向き外壁面全体を平均した外壁面温度変化、式(3)で示した熱流束（フラックス）について、外壁側の壁体層の単位面積当たりの値（内向きを正とする）の経時変化を示した。日中の外壁面温度は吸収率80%（暗色）の壁面温度が最も高くなり、短波放射吸収率が低くなるほど壁面温度は低下している。図には示さないが、長波収支の変化は短波に比べて小さい一方、夜間における外壁面温度の差は日中に比べて小さい。図-8 には SET*の空間平均値の推移を流入風向が南の場合について示した。なお、平均対象の空間は、地上高1.5mの位置における街区中央を縦横断する幅12m十字路部分とした。

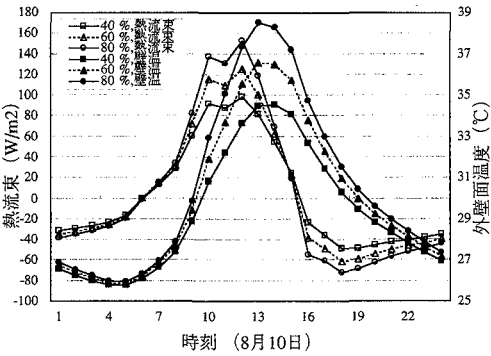


図-7 壁面の熱流束（内向きを正とする）・壁面の時間変化に対する壁面短波放射吸収率の影響

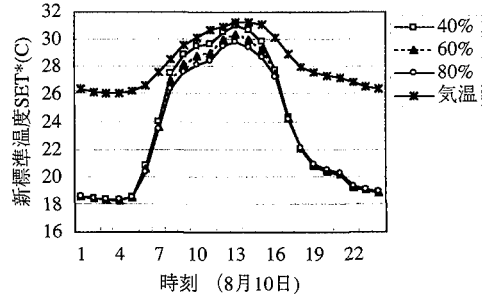


図-8 SET*の時間変化に対する壁面短波放射吸収率の影響

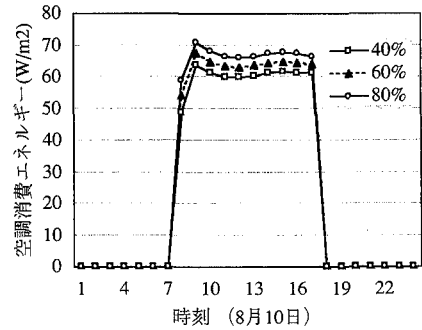


図-9 空調エネルギー消費量の時間変化に対する壁面短波放射吸収率の影響

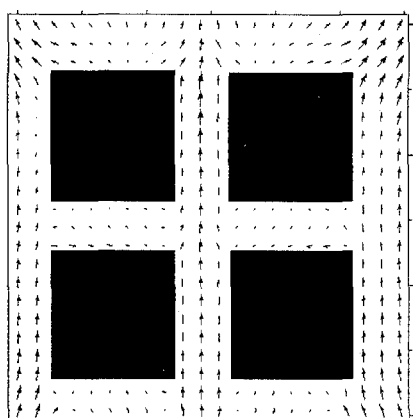
吸収率 40% (明色) の場合が SET* が高く、日中の 8 時から 15 時までの時間帯に吸収率 80% (暗色) に比べて 1℃を上回る差を示している。図-9 には床面積当たり建物内空調消費エネルギー量の推移を示した。吸収率 80% (暗色) に比べて吸収率 40% (明色) の場合の方が 1 時間当たり最大 8 W/m²、吸収率 60% (中間色) の場合でも最大 4 W/m² 消費エネルギー量が減少している。空調始動時の削減量の違いは、前日からの壁体への蓄熱による影響を受けているためであると考えられる。

以上の点より、壁面の短波放射吸収率を低くした場合は、空調の消費エネルギーが低下する一方、屋外の温熱環境指標が高くなるというトレードオフの関係を定量化することができた。

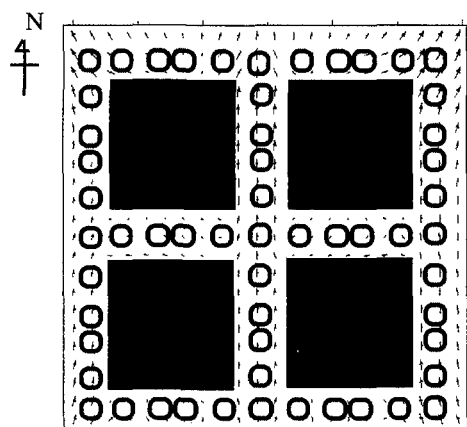
(2) 街路樹の有無による効果

街路樹は地上高 3 m～6 m の位置に高さ・幅・奥行きが 3 m の樹冠を持つ樹木を図-6 の位置に配置した。吉田ほか²⁾と同様に樹幹における葉面積密度は 2.0 m²/m³、抵抗係数は 0.2 とした。図-10 には街路樹のない場合とある場合の南風が卓越する場合の風速分布を示す。地上 1.5 m でも街路樹により若干の風速の低下が見られることがわかる。

図-11 では建物 5 階および 1 階南向き外壁面全体を平均した外壁面温度変化を示す。5 階は下層の階に比べて日の出後に日射が当たる時刻が早く、日中の温度の上昇が顕著である。樹冠と各面との位置関係については、樹冠部が 3 階部分にあるとして計算を行っているため、5 階南向き外壁面は樹冠の上方にあり、1 階



(1) 街路樹がない場合



(2) 街路樹がある場合

図-10 気流解析結果の例 (南風、地上 1.5 m)

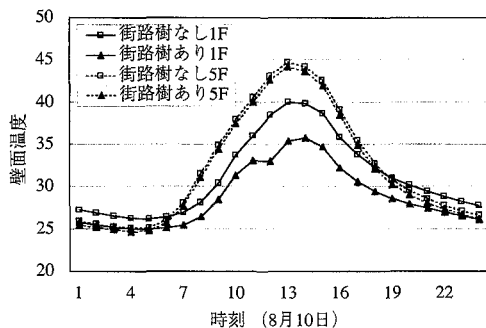


図-11 壁面温度の時間変化に対する街路樹の影響

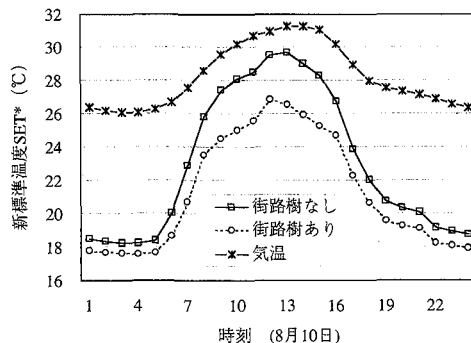


図-12 SET*の時間変化に対する街路樹の影響

南向き外壁面は樹冠の下方にある。1 階壁面では街路樹の有無により一日を通して壁面温度が異なり、日中では 4℃、夜間では 2℃程度低い値を示しているのに対して、5 階壁面での表面温度はほとんど変わらない。

さらに、図-12 では SET*が日中は最大 3.5℃程度、夜間は約 1~2℃程度低くなっており、図には示さないが空調消費エネルギーは、日中は 2.0W/m² 以上の削減効果が認められた。

以上のことから街路樹による屋内・屋外面方に対する環境緩和効果が示された。

5. おわりに

本研究により、複雑形状を有する街区における環境改善効果を解析するシステムが提示され、壁面の放射吸収率の変化および街路樹の有無が環境に与える影響の定量化が試みられた。壁面の短波放射吸収率を低くした場合は、空調の消費エネルギーが最大 8W/m² 低下する一方、屋外の温熱環境指標が 1℃以上高くなるというトレードオフの関係を示すことが分かった。一方、街路樹の効果は SET*は日中で最大 3.5℃程度低下する結果が示された。

【謝辞】

本研究は、科学技術振興事業団・戦略的基礎研究推進事業「都市ヒートアイランドの計測制御システム」（代表者：三上岳彦・東京都立大学教授）の補助を受けた。流体解析の実施にあたり、村上周三東京大学教授（現慶応義塾大学教授）および東京大学生産技術研究所村上・加藤研究室の皆様（当時）からプログラムの提供をいただいたものを筆者らが改変して利用しました。記して感謝の意を表します。

付録 1) ここでは風速の空間分布が壁面温度に与える影響は大きくないとする一方、壁面の熱収支の値を街区における発生顕熱量として用いる際には、系統的な誤差を生じる可能性がある。本研究では体感温度および空調消費エネルギーを評価対象とし、壁面における発生顕熱の街区への放出量は評価対象としていないために、簡略化されたモデルを用いた。

付録 2) 本研究では壁面における発生顕熱の街区への放出がマイクロスケールにおける気温の空間分布に与える影響を無視しているが、筆者らは街区における熱収支の変化が水平方向に連続して広範囲に分布した場合、メソスケールの気温・風速に与える影響は大きいと考えている¹⁾。一方、浦野ほか¹²⁾では風速の空間分布を上空風向の方位毎にデータベース化して街区の発生顕熱量を算出するモデルを提案しており、同モデルと本研究のモデルを統合した解析は、今後の課題とする。

【参考文献】

- 1) 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集, NO.369, 12-20, 1986.
- 2) 吉田伸治, 大岡龍三, 持田灯, 富永禎秀, 村上周三: 樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討, 日本建築学会計画系論文集, NO.536, 87-94, 2000.
- 3) 上野賢二, 柴田学, 谷川寛樹, 井村秀文: 都市熱環境モデルを利用した空調エネルギー需要の空間分布推計, 環境システム研究, Vol.27, 165-170, 1999.
- 4) 亀井川幸浩, 玄地裕, 吉門洋, 近藤宏昭: 都市冷房エネルギー需要への波及効果を考慮したヒートアイランド対策評価モデルの開発, 環境システム研究論文発表会講演集, Vol.28, 357-364, 2000.
- 5) 西岡真稔, 松尾陽: 都市キャノピーにおける建築の放散熱とその影響 その 2 都市キャノピーモデル, 日本建築学会計画系論文集, No.521, 73-80, 1999.
- 6) 村上周三, 持田灯, 大森敏明, 富永禎秀: 日射の影響を考慮した市街地の風環境の予測・評価法に関する基礎的研究(第1報) 対流・放射シミュレーションによる夏季の外部空間の SET*分布の算出, 空気調和・衛生工学会講演会講演論文集 B, 1245-1248, 1994.
- 7) 松尾陽, 横山浩一, 石野久彌, 川元昭吾: 空調設備の動的熱負荷計算入門, 建築設備技術者協会, pp.170, 1980.
- 8) 松尾陽, 猪岡達夫, 横山浩一: 空調システムのエネルギーシミュレーションプログラム その 1, 空気調和・衛生工学会講演会学術論文集, 425-428, 1985.
- 9) 亀谷茂樹, 葛原浩美, 水野稔, 西隆良, 下田吉之: 空調システムを持つ建物からの熱環境負荷に関する研究 第1報 空調システムの相違による建物からの廃熱特性の検討, 空気調和・衛生工学会論文集, No.62, 1-11, 1996.
- 10) 渋谷玲, 高俣俊, 李海峰, 尾島俊雄: 地中温度および地中面温度の算定に関する研究: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 907-908 1999.
- 11) 浦野明, 森川泰成, 斉藤正文: 建築・都市環境における放射シミュレーション その 1, 空気調和・衛生工学会講演会講演論文集, 305-308, 1993.
- 12) 浦野明, 花木啓祐, 粉川大樹: 都市気候予測のための街区から大気への顕熱流のモデル化, 環境システム研究, Vol. 26, 483-486, 1998.
- 13) Gagge, A.P., J.A.J. Stolwijk, Y. Nishi: A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment, ASHRAE Transactions 92-2B, 709-731, 1986
- 14) Yamada, T.: A Numerical Model Study of Turbulence airflow in and above a Forest canopy, J. Meteorol. Soc., Japan, 60, 439-454, 1982.

- 15) 日本建築学会, 建築学便覧 I, 丸善, 1980. 197-210, 1999.
- 16) 白井一義, 梅干野晃, 大塚修弘, 堀口剛, 岩村和夫: 薄い盛土層を持った木造建築物の屋上植栽の熱的特性 その2 数値計算による屋根構造・室内条件の影響の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 119-120, 1996.
- 17) Urano A, T. Ichinose, K. Hanaki: Thermal environment simulation for three dimensional replacement of urban activity, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 81,

A COUPLING SIMULATION OF URBAN BLOCK HEAT BALANCE AND ENERGY CONSUMPTION TO IMPROVE URBAN THERMAL ENVIRONMENT

URANO Akira, INAI Yasuhiro, and HANAKI Keisuke

A simulation system was developed to estimate the thermal effects of an environmental symbiosis plan quantitatively. This system employed the sensible temperature of outdoor human body and the energy consumption in urban block buildings for its indexes in estimation. Radiation heat balance, the heat transfer of building wall and the cooling energy of building's interior were coupled in this system.

The relationship between the outdoor thermal environment and the energy consumption for air conditioning was examined by case studies. One case study showed that street trees improved the thermal environment. However in another case study where the absorption ratio of short waves by the external wall is decreased, a conflicting relationship was found quantitatively between the two indexes. Namely the energy consumption for air conditioning decreased while the outdoor thermal index increased.