非定常放射・伝導解析による数値解析と精度検証

非定常な対流・放射・伝導を考慮した3次元の屋外温熱環境予測評価手法の開発 第1報

NUMERICAL STUDY BASED ON UNSTEADY RADIATION AND CONDUCTION ANALYSIS

Prediction of outdoor environment with unsteady coupled simulation of convection,
radiation and conduction —Part 1—

原山和也*, 吉田伸治**, 大岡龍三***, 持田 灯****, 村上周三*****

Kazuya HARAYAMA, Shinji YOSHIDA, Ryoza OOKA,
Akashi MOCHIDA and Shuzo MURAKAMI

The purpose of this research is to develop a prediction method of outdoor thermal environment based on unsteady coupled simulation of convection, radiation and conduction. The prediction method of outdoor thermal environment has been already proposed by the authors based on the steady coupled simulation. However the method based on steady state simulation is obviously insufficient for predicting thermal environment since the heat storage effect of solid material cannot be considered. This paper consists of two parts. In the first part, the unsteady radiation and conduction analysis method is introduced and the heat storage effect of solid material is numerically investigated for simple building model using this method. In the latter part, accuracy of the prediction method developed here is examined by comparing its results with the field measurement data.

Keywords: Outdoor Thermal Environment, Unsteady Analysis Method, Radiation, Ground Surface Temperature

屋外温熱環境、非定常解析手法、放射、地表面温度

1. 序

ヒートアイランドの進行に伴う都市の温暖化により市街地内の温熱環境は悪化の一途をたどり、特に夏季日中の街路空間は、耐え難いものとなっている。そのため、近年では暑熱環境を緩和するための屋外環境設計の重要性が認められつつある。この様な環境設計を十分効果のあるものとするためには、屋外空間を構成する多様な要素の影響を定量的に評価する必要がある。その際、数値シミュレーションを基本とした環境予測は極めて有効であり、多くの研究が行われている^{文1, 2, 3)}。しかし、これらの研究は建物の熱負荷計算モデルや1次元の都市キャノピーモデルを用いた予測手法が多く、市街地内の3次元性が強く極めて複雑な対流、放射による熱輸送現象を正確に解析するものとは言えない。一方、筆者らは既報^{文4)}においてCFD (Computational Fluid Dynamics) を基本とした対流・放射連成解析に基づく屋外の温熱快適性の評価を含んだ3次元の総合的な評価手法を提案しており、これを用いて緑地の種類や規模の違いが夏季の温熱環境に及ぼす影響を詳しく検討している^{文5)}。しかし、筆者らの手法は、各気象要素の空間分布を詳細に評価できる反

面、ある1時刻のみの気象条件を対象とした定常解析であった。屋外空間の流れ場、温度場、放射場、湿度場は太陽位置、風向・風速などの気象条件の時間変化に伴い大きく変化するため、本来は非定常解析を行う必要がある。また、定常解析では、蓄熱の影響は考慮されないため、CFD解析の境界条件となる地表面や建物表面の温度予測に無視し得ぬ誤差を含む場合がある。非定常解析は、このような欠陥を改善する面も併せて有す。本研究は、その点に着目し、屋外空間の流れ場などを日変化程度まで詳しく解析することにより、屋外温熱環境を総合的に評価する手法を開発することを目的としている。

本報では、文献4で示した1時刻のみを対象とした定常の放射解析に基づく屋外温熱環境解析手法を非定常問題へ適用するために行った改良を示す。更に、単純な建物モデルを対象として熱貫流率、アルベドなどを変化させた計算を行うとともに、文献6, 7に示す夏季の屋外温熱環境実測を対象とした計算を行い、本解析手法の予測精度を検証した結果を示す。次報では、文献4に示したCFD解析との連成を示す予定である。

* 東京大学大学院工学系研究科 大学院生・修士(工学)

** 福井大学工学部 講師・博士(工学)

*** 東京大学生産技術研究所 助教授・博士(工学)

**** 東北大学大学院工学研究科 助教授・工博

***** 慶應義塾大学理工学部 教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Eng., University of Tokyo, M. Eng.
Lecturer, Faculty of Engineering, Fukui University, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Graduate School of Eng., Tohoku University, Dr. Eng.
Prof., Faculty of Science and Technology, Keio University, Dr. Eng.

図2 建物モデル

図1 解析全般のフロー図

図3 壁材のモデル [単位: mm]
(左側が屋外、右側が室内)

表1 計算ケース

case1	case2-1	case2-2	case3
基本ケース	内断熱	外断熱	White Painting

表2 建物壁面及び地表面の物性値

	アルベド	長波放射率
モルタル	0.2	0.90
White Painting	0.6	0.90
アスファルト	0.1	0.95

表3 各材料の物性値

	熱伝導率 [W/mK]	容積比熱 [kJ/m³K]
モルタル	1.50	1600
コンクリート	1.40	1900
断熱材	0.04	4
アスファルト	0.73	2100
砂利	0.62	1500
土	1.50	3100

2. 連成解析手法の概要

2.1 既存の連成解析を基本とした非定常解析の概要

本提案手法は最終的には、3次元のCFD解析、3次元の放射解析及び1次元の熱伝導解析を連成させ、屋外温熱環境の非定常解析を行うことを目指すものである。ただし、本論文ではまず第1段階としてそのうちのCFD解析を除いた非定常放射解析と熱伝導解析の連成及びそれを用いた計算結果を示す。図1にその手法の全般的なフローを示す。まず図中左端の各種入力条件より境界条件を設定する。次にモンテカルロ法に基づいた3次元放射計算を実行する^{文4)}。続いて、土壌及び壁体内で非定常1次元熱伝導方程式を解くことにより、土壌及び壁体内の温度分布を求める。これと並行して室内では空調除去熱量計算を行う。更に、得られた土壌及び壁体の表面温度、対流熱伝達率、潜熱輸送量、及び空調除去熱量計算から求められる空調除去熱量を境界条件としたCFD解析を行う。その結果を利用し、再び放射計算を行う。これらの一連の計算を時間発展させて、得られる風向、風速、温度、湿度、MRT (Mean Radiant Temperature) の時間変化を伴った空間分布から温熱快適性指標の1つである新標準有効温度 SET* (Standard Effective Temperature)、空調除去熱量等を算出し、温熱快適性、エネルギー消費に関わる評価を行う。

2.2 3次元放射解析と1次元熱伝導解析の連成解析手法の改良 放射解析と熱伝導解析を連成したモデルとして、HASP^{文8)}を始

めとする建物の各種熱負荷計算モデルが存在する。しかし、これらのモデルは建物の熱負荷を計算することが主な目的であり、建物が受ける日射の解析に関しては、その熱負荷計算という目的に合致する限りにおいて単純化されている。これらのモデルを利用して、建物表面温度や建物からの排熱量を算出し、これを屋外温熱環境の解析のための境界条件として利用することは可能ではあるが、壁面一面の表面温度が一樣として与えられるなど、詳細な温熱環境解析のための境界条件としてはやや精度に劣るといわざるを得ない。従って本論文では、モンテカルロ法に基づく詳細な放射計算に対応する建物側の熱伝導解析手法、並びに建物からの排熱(空調除去熱量を含む)の与え方について新たに計算モデルを構築する。以下に、この計算モデルの概要を示す。

1) 非定常1次元熱伝導方程式の組み込み

図1[2]のシミュレーションにおいて、3次元放射計算における地表面及び建物壁面を構成する面要素毎に(1)式の非定常1次元熱伝導方程式を解き、土壌並びに壁体内及びそれらの表面の温度を算出する。

$$\rho_w C_{pw} \frac{\partial \theta_{wall}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial \theta_{wall}}{\partial x} \quad \dots (1)$$

図4 地表面温度[°C] (case1: 基本ケース) N

図5 3時間毎の土壌断面温度分布(case1: 基本ケース)
(グラフの上部が地表面、下部が地中)

図6 建物屋上面温度の時間変化

壁面の屋外側境界及び地表面境界では、面要素毎の熱収支式において熱伝導以外の項を求め、各項の和が0となるように伝導熱量を逆算し、それを境界条件に用いる^{注1)}。一方、室内側境界では壁表面温度と1質点とみなした室内空気温度より対流熱伝達量を求めて、それを境界条件として与えている。この場合、対流熱伝達率は微小面要素毎に一定値を与える。また、地中境界では地表面に流入する熱の影響が及ばない深さにおいて断熱条件または温度一定条件が利用できるようにプログラムの設定を行う。

2) 窓面からの透過日射の取り扱い

図1 [1] の Input Data4 で外壁面を構成する面要素毎に窓面の占有率(窓面積率)を与え、これと壁の面積率による重み付けを行い、面要素全体の吸収率、反射率、透過率を与える。窓面の吸収率、反射率、透過率は、直達日射については窓への入射角の変化による影響を考慮した値を与え、拡散日射である天空、反射日射は入射角60°の値で一定と仮定する^{文9)}。窓面より室内に透過した日射成分は後述する(4)式、(7)式に従い空調負荷または室温変化に寄与する。ただし、室内へ透過した後、室内壁面間での相互反射の結果、窓面から屋外へ放出されることはない^{と仮定している}。また、室内の壁面間での長波放射量は全体の合計として0となるので放射計算は行わない。

3) 空調除去熱量計算の組み込み

放射・伝導解析により、室内空気全体への貫流熱負荷、日射負荷等を算出し、空調除去熱量 Q [W] を次式より求める。

$$Q = Q_C + Q_S + Q_A + Q_H \quad \dots (2)$$

①貫流熱負荷

$$Q_C = \sum_{i=1}^m \alpha_{ti} A_i (\theta_{si} - \theta_r) \quad \dots (3)$$

②窓面透過日射熱負荷

$$Q_S = \sum_{i=1}^m A_i \eta_i S_i \tau_i \quad \dots (4)$$

③換気熱負荷

$$Q_A = \rho \Delta i q_a \quad \dots (5)$$

④内部熱負荷

$$Q_H: \text{想定した値}$$

冷房空調時は上記の空調除去熱量 Q と空調機の成績係数 COP を用いて (6) 式に示す室外機からの排出熱量 A_G を算出する。この値は CFD 解析の際の熱流境界条件となる。

$$A_G = \left(\frac{1 + \text{COP}}{\text{COP}} \right) Q \quad \dots (6)$$

非空調時は室内空気を1質点とみなし、(7)式に示す室内空気についての熱収支式を解いて室温を算出する。

$$\rho C_p V \frac{\partial \theta_r}{\partial t} = Q \quad \dots (7)$$

4) 雲量を考慮した長波放射量の減衰

夜間放射による地表面及び建物壁面温度の低下の過大評価を防ぐため、図1 [1] の Input Data1 で雲量を設定する。この場合、仮想天空温度 T_{sky} を (8) 式により与える^{文9)}。

$$T_{sky} = T_a \left\{ \left(0.526 + 0.208\sqrt{f} \right) + \left(0.474 - 0.208\sqrt{f} \right) (1 - k) \frac{c}{10} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad \dots (8)$$

図7 3時間毎の屋根断面温度分布
(グラフの上部が屋外面、下部が室内面)

3. 単純な建物モデルを対象とした非定常解析

計算対象の選定として単純なモデルから徐々に複雑な形状のモデルに移行していくことが妥当である。そこで、先ずここでは非定常解析の第一歩として立方体単体モデルを対象とした。

3.1 計算対象及びケース

図2に示すような単純な単体建物モデル(1辺9mの立方体)を設置した領域を解析対象とする。図3に壁体のモデル、表1に計算ケースを示す。今回は単純化のため、屋上も床スラブも同じ構造とする。case1(基本ケース)は建物壁体内に断熱材を含まずコンクリートのみで構成(表面被覆はモルタル仕様)。これに対し、case2-1は内断熱、case2-2は外断熱、case3はcase1の外表面にWhite Paintingを施してアルベド(日射反射率)を増加したケースである。断熱材としてグラスウール相当のものを想定。各種物性値は表2,3を参照。また、ここでの計算ではプログラムの性能を検討することを主眼にしているため、窓面、換気量、建物内部発熱のない単純な建物を想定した。さらに、全時間帯で空調を作動し、室温は設定温度26℃で一定とした。

3.2 気象条件

東京の7月22日0時~23日24時の48時間を計算し、23日0時~24時を検討対象とした。この場合、太陽位置は計算^{文10)}により求めたものを使用(快晴時を想定)。気温は1991年~95年7月の東京のアメダスデータのうち晴天日のみのデータ^{注2)}を時刻別に平均

図8 空調熱負荷の時間変化

表4 日積算空調熱負荷

	空調熱負荷 [MJ]
case1 (基本ケース)	4.3×10^2
case2-1 (内断熱)	0.6×10^2
case2-2 (外断熱)	0.6×10^2
case3 (White Painting)	2.6×10^2

(1)実測対象領域とその周辺

(2)実測対象領域の写真

図9 測定対象地域（東京都北区、赤羽台団地）

表6 建物壁面及び地表面の物性値

	アルベド	長波放射率	蒸発効率 ^{文6,7)}
建物壁面 (モルタル相当)	0.5	0.90	0.0
アスファルト	0.1	0.95	0.0
草地	0.2	0.95	0.5
コンクリート	0.3	0.90	0.0

表5 壁体及び土壌の物性値

	熱伝導率 [W/mK]	容積比熱 [kJ/m³K]
土	0.43	2500
アスファルト	0.73	2100
砂利	1.60	1500
粘土層	2.10	2100
モルタル	1.50	1600
コンクリート	1.40	1900

図10 解析領域（領域A）（網掛部は樹木帯）

(1) 全天日射量 [W/m²]
(実測値は10分間平均値) (2) 外気温 [°C]
(実測値は瞬時値) (3) 相対湿度 [%]
(実測値は瞬時値)図11 建物屋上の実測結果及び計算条件
(実測値は測定点1：高さ22.5m)

した値を使用した。また、大気中の水蒸気分圧は2.8kPa（絶対湿度17.7g/kgに相当）一定とし、相対湿度は気温の時間変化に従って変化するものとした。

3.3 計算条件

室内側境界は熱伝達のための熱移動とする。室内、室外側対流熱伝達率をそれぞれ4.6W/m²K、11.6W/m²Kとした。また、土壌の構成については全ケースともに地表から地中方向にアスファルト（100mm）、砂利（100mm）、土（800mm）と設定し、その最深部（地中1000mm）で下部への顕熱フラックスを0、つまりその深さにおいて土壌から更に地中下向きに熱の流出がない断熱条件とする。

3.4 計算結果

本稿では計算開始から2日目（7月23日）の結果を示す。

1) 地表面温度分布

図4に8:00～16:00までの2時間毎の地表面温度分布を示す。太陽位置の変化に伴う日影の変化に概ね対応して、低温領域が表れるが、局所的には若干遅れて変化している領域も存在する^{注3)}。これは、前時刻までの日照条件の影響（時間履歴）によるものであり、非常解析の結果で予測可能となったものである。

2) 土壌内の温度の時間変化

図5にcase1（基本ケース）の3時間毎の土壌内温度の鉛直分布を示す。6:00～15:00は土壌内の地表に比較的近い領域では正の温度勾配が生じ、地表から地中へ流入する伝導熱が見られるが、その後日射吸収量の減少に伴い18:00には温度勾配が負となり、地表から大気へ熱が流出する状態となる。地中深さ500mmではほとんど日変動は見られない。

3) 建物屋上面温度の時間変化

図6に建物屋上面における表面温度の時間変化を示す。天井を構成するスラブがコンクリートとモルタルで構成されたcase1では、約26～50℃の値を示しており、13:30に最高値となる。これに対し、スラブの室内側に断熱材を挿入したcase2-1（内断熱）では、11:00以降でcase1より1～3℃高温となる。さらに、壁体構成を外断熱型としたcase2-2（外断熱）では、日中の最高温度が約60℃となり、そのピークの時刻も他のケースより1時間も早まる。また、このケースが夜間の表面温度が各ケースの中で最も低くなる。これら一連の差異は断熱材の設置による熱伝導率の低下によるものであり、日射の流入面に近い外壁側に断熱材を挿入したcase2-2でその効果が大きくなった。また、case1の壁体表面をWhite Paintingしたcase3では、壁体外表面のアルベドの増加（0.2→0.6）により日射吸収量

が減少するため、case1 より最高 12°C 程度表面温度が低下する。

4) 建物屋上のスラブ温度分布

図 7 に 3 時間毎の屋上のスラブ温度分布を示す。当然のことであるが case2-1、case2-2 共に断熱材の部分で温度勾配が大きい。特に、外断熱の case2-2 では壁体内部での変動が少ない。また、case3 は case1 と同じ傾向であるが、全般に低温となっている。

5) 空調除去熱量

図 8 に空調除去熱量の時間変化、表 4 に日積算空調除去熱量を示す。日中、断熱材を使用した case2-1、case2-2 は case1 の 15% 程度の値を示し、case3 は 60% 程度の値である。最高値となる時刻は case2-1 (内断熱) だけ他のケースより 1 時間ほど早い 17:40 となった。日積算空調除去熱量でも時間変化の結果と同様に基本ケースに比べて小さい値を示した。内断熱 (case2-1) と外断熱 (case2-2) の比較では、外断熱の方が変動幅が小さい。この変動の差は非定常計算に移行して予測可能となったものである。

4. 非定常屋外温熱解析手法の精度検証

本節では文献 6、7 に示す夏季の屋外温熱環境実測を対象として解析し、本解析手法の予測精度の検証を行う。

4.1 計算条件

解析は図 9 に示す東京都北区の赤羽台団地内の 1 区画を対象と

図 13 表面温度分布の計算結果 [°C]

(8月4日 14時)

図 14 実測温度画像 (図 2 測定点 1 より撮影) [°C]

(8月4日 14時)

する。筆者らは 1998、99 年に図 9 (1) 中の測定領域 A において夏季の屋外温熱環境実測を行っている。本解析ではこの領域 A (図 9 (1)) を含む領域を対象とした。数値解析は 8 月 3 日 6 時～4 日 24 時までを対象に行い、後半の 8 月 4 日の 24 時間の計算結果と実測結果を比較した。建物壁体は設計図書を参考に壁部ではコンクリート (150mm) と内外表面のモルタル (5mm×2)、窓部では厚さ 3mm の普通ガラスにより構成した。A 棟南東側壁面 (図 10 参照) には窓占有率 0.5 の壁と通常の壁 (窓占有率 0) が、また B 棟北西側壁面には窓占有率 0.17 の壁と通常の壁が並んでいると設定した。土壌は地表から地中に向かってアスファルト面ではアスファルト (50mm)、砂利 (50mm)、粘土層 (900mm)、草地面では表面の蒸発効率を 0.5 として土 (100mm)、粘土層 (900mm) と設定した^{注 4)}。地中境界は土壌最下部で断熱条件とした。壁体、土壌の物性値を表 5、建物壁

面及び地表面の物性値を表6に示す。ここに示す物性値は草地については実測で測定した土壌の物性値を計算条件として使用できたのに対し、アスファルト面においては土壌の物性値の測定が行えず、文献9に示す代表的な数値を与えている^{注5)}。樹木は図10に示す領域内の網掛部にあり、そこでは文献5で示した3次元樹木モデルを用いた。ここで樹木の樹高、葉面積密度、消散係数などの各設定については、文献6、7に示す実測での測定結果を基に樹木帯毎に分布を与えた。気象条件は測定点1(図9(1))の実測結果を参考に図11のように与えた。日射量は1時間毎に快晴時の日射量に対して曇天による日射減衰を考慮した補正を加えた分布を用いた(図11(1)、実線)。また、日射量の直達成分と天空成分の分離については、快晴時における法線面直達日射量をブーガの式より、天空日射量をペルラーゲの式より算出した^{注9)}。外気温は実測結果の1時間毎の値を使用した(図11(2)、実線)。大気中の水蒸気分圧は時間変化のない一定値を与えており、ここでは実測時の相対湿度と最も対応する3.03kPa(絶対湿度27.9g/kgに相当)とした(図11(3))。これら1時間毎のデータ間の時刻においてはその測定データを内挿することにより与えている。室内、室外側対流熱伝達率は実測結果^{注6,7)}を参考にそれぞれ4.6W/m²K、11.6W/m²Kとした^{注6)}。室内は空調なしを想定し、室温は室内空気の熱収支式((7)式)に従って変動する。草地の蒸発効率も実測結果^{注6,7)}を参考に0.5として与えた(表6)。

4.2 計算結果と実測結果の比較

1) 地表面温度の時間変化

図12に棟間に位置する測定点2(草地面日影部)、測定点3(草地面日影部)及び測定点4(アスファルト面日影部)(図10参照)における地表面温度の時間変化を示す。測定点2では計算値、実測値ともに日中は最高42℃程度、夜間は26℃程度の値を示しており、両者は全般によく一致している。測定点3では日中、測定点が日向となる時刻では実測値の方が高温となるが、それ以外はよく対応している。また、測定点4では日中の最高値は60℃程度とほぼ同じであるが、夜間は約3℃計算値の方が低い。一致しなかった理由の1つとして、アスファルト面(測定点4)では実際の土壌の物性値と対応しなかったためと推察される。土壌の物性値を正確に与えることのできた草地(測定点2)で実測とよく一致することが確認され、本解析手法の妥当性が確認されたものと考えられる。

2) 土壌及び壁体の表面温度

図13に8月4日14時における測定領域Aの地表面及び建物壁面温度分布の計算結果を、また図14に図13と同じ時刻における測定領域Aの赤外線放射温度計で撮影した実測温度画像を示す(撮影方向は図10参照)。計算結果では、団地棟間南東側のアスファルト面日照部で50~60℃、団地棟間北西側の草地日照部で35~42℃、草地日影部で28~35℃であり、実測結果に比べて草地日向部でやや高い値を示しているものの、全般的には概ね対応した結果となった。また、A棟南東壁では地表近傍で37℃、上層で38℃と高さが高くなるに従い表面温度が上昇するのに対して、B棟北西壁では地表付近で41℃、上層で40℃以下の値となり逆の変化を示す。この両壁面温度の変化の傾向の違いは、地表面の土地利用が影響しているものと考えられる。A棟南東壁近傍の地表面は草地であり、表面温度が40℃程度であるため、地表面からA棟壁面へ流入する長波放射が比較的小さい。これに対して、B棟北西壁近傍の地表面はアスファルトであるためその表面温度が

55℃と高くB棟壁面へ流入する長波放射量も大きな値となり、結果として高温となると考えられる。また、A棟南東側壁面の一部では木陰の影響により36℃以下の低温となる領域が確認できる。

5. まとめ

- (1) 既存の定常状態を対象とした3次元連成数値解析手法を改良し、蓄熱を考慮した非定常放射・伝導解析を可能とした。
- (2) 単純な建物モデルを対象とした数値解析により、断熱材の有無、壁面のアルベドの違いによる建物の熱負荷や屋上スラブ内の温度分布の時間変化の差異を調べた。建物表面温度の時間変化について、基本ケース(断熱材なし)に対し内断熱のケースではほぼ同じような変化であるが、外断熱のケースでは最高値が10℃程度高くなり、更にその時刻が1時間ほど早まる結果となった。また空調負荷に関して、壁体がコンクリートのみ基本ケースに比べ、アルベドを0.2から0.6に増加することにより約40%、断熱材を設置することにより約85%の削減となった。
- (3) 夏季の団地棟間の温熱環境を対象とした本解析手法の精度検証を目的として、地表面温度、建物壁面温度の計算結果と実測結果を比較した。境界条件、構成部材の物性値を的確に与えることができれば本解析手法が高い予測精度を持つことを確認した。
- (4) 今後は文献4に示すCFDと連成させた非定常な3次元屋外温熱環境予測手法の開発を行う予定である。

注1) 微小面要素*i*において、(9)式に示す熱収支式を用いて伝導熱量 C_i を算出している。土壌及び壁体の表面に向かう方向を正としている。

$$C_i = -(S_i + R_i + H_i + LE_i) \quad \dots (9)$$

ここで、 S_i : *i*面へ入射する正味の日射取得量 [W/m²]

R_i : *i*面へ入射する正味の長波放射取得量 [W/m²]

H_i : *i*面へ流入する対流熱伝達量 [W/m²]

LE_i : *i*面の蒸発散による潜熱放散量 [W/m²]

注2) 晴天日の判定は9時~15時までの日照率を時間平均し、その値が0.8以上(つまり1時間あたり48分の日照がある)場合に晴天日とした。

注3) 例えば12:00では対象が東京であるため、太陽は真南より若干西側に位置しているため建物の影は南北軸に対して若干東側になる。しかし図4(3)の建物の影に伴う地表面温度の低温部は西側にずれた形となっている。それは土壌内の蓄熱の効果によるものである。

注4) 草地の蒸発効率については、文献6、7に示す実測において草地日照部における日中の測定で得られた値を空間一様に与えている。しかし、実際の草地の蒸発効率は、日中~夜間まで含めた時間変化が生じると共に、日照部、日影部など、周囲の環境によってもその値が異なるものと考えられる。この点については今後、検討する必要があると考えられる。

注5) アスファルト面の物性値については表面温度、伝導熱量を測定し、これを条件として与えて土壌の熱伝導率、熱容量を逆問題として推定する方法も考えられる。しかし、文献6、7に示す実測では、土壌の性質の問題で地中50mmまでしかコア抜きができず、その深さまでしか温度測定ができなかったため、上記のような検討は行っていない。

注6) 実際の対流熱伝達率の値は全ての時刻、同じ土地被覆地点で同じ値を利用することには問題があり、その算定式については多くの研究が行われている^{注11~15)}。しかし、現在利用可能な対流熱伝達率の測定結果は少なく、今回の実測においても時刻や場所によって分類された値は得られなかった。今後、この対流熱伝達率の値については、より深い検討を行う予定である。

記号表

添字*i* : 微小面要素*i*

A_i : *i*面の面積 [m²]

A_G : 屋外機からの排出熱量 [W/m²]

C_i : *i*面の地中及び建物内部からの伝導熱量 [W/m²]

c : 雲量 [-]

COP : 空調機の実績係数 [-]

C_p : 室内空気の比熱 [J/kgK]

C_{pw} : 土壌、壁体の比熱 [J/kgK]

f : 地表付近の空気の水蒸気分圧 [kPa]
 k : 雲高によって決まる修正定数^{※9)} [—]
 q_a : 外気導入量 [m^3/s]
 Q : 空調除去熱量 [W]
 Q_a : 換気熱負荷 [W]
 Q_c : 貫流熱負荷 [W]
 Q_H : 内部熱負荷 [W]
 Q_s : 窓面透過日射熱負荷 [W]
 S_i : i 面へ入射する正味の日射 (短波放射) 取得量 [W/m^2]
 t : 時間 [s]
 T_a : 地表付近の空気の絶対温度 [K]
 T_{sky} : 仮想天空温度 [K]
 V : 室容積 [m^3]
 α_{li} : i 面の室内側対流熱伝達率 [W/m^2K]
 Δi : 内外エンタルピー差 [J/kg]
 η_i : i 面の窓面積率 [—]
 θ_{si} : i 面の室内側壁面温度 [$^{\circ}C$]
 θ_r : 室温 [$^{\circ}C$]
 θ_{wall} : 土壌、壁体内の温度 [$^{\circ}C$]
 λ : 土壌、壁体の熱伝導率 [W/mK]
 ρ : 室内空気の密度 [kg/m^3]
 ρ_w : 土壌、壁体の密度 [kg/m^3]
 τ_i : i 面の窓面の日射透過率 [—]

参考文献

- 1) 伊藤宏、洞田浩文、森川泰成、西村正和、屋外環境計画手法に関する研究 (その4 市街地における緑化効果の検討)、日本建築学会学術講演会梗概集 (環境1)、pp.957-958、1996.9
- 2) 小栗健、梅干野晃、白井一義、奥田知康、蒸発冷却機能を持つ孔あきレンガ壁体により形成される微気候の予測に関する研究、日本建築学会計画設計論文集、No.532、pp.101-108、2000.6
- 3) 萩島理、谷本潤、片山忠久、大原健志、二相系熱水分同時移動方程式による数値実験に基づく土壌物性値の同定、都市熱環境評価のための地表面からの蒸発量の簡易計算手法に関する研究 第2報、日本建築学会計画設計論文集、No.540、pp.67-74、2001.2
- 4) 吉田伸治、村上周三、持田灯、大岡龍三、富永禎秀、金相璣、対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析、日本建築学会計画設計論文集、No.529、pp.77-84、2000.3
- 5) 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、日本建築学会計画設計論文集、No.536、pp.87-94、2000.10
- 6) 磐田靖子、村上周三、高橋岳生、吉田伸治、成田健一、持田灯、富永禎秀、金相璣、原山和也、対流・放射・湿気連成解析による屋外環境共生空間の研究 (その11) 団地内キャニオン空間における樹木周辺環境の実測、日本建築学会学術講演梗概集 (環境1)、pp.1137-1138、2000.9
- 7) 吉田伸治、村上周三、成田健一、高橋岳生、大岡龍三、持田灯、富永禎秀、団地内キャニオン空間内における夏期の屋外温熱環境の実測、日本建築学会計画系論文集、No.552、pp.69-76、2002.2
- 8) 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、社団法人建築設備技術者協会、1980.3
- 9) 田中俊六、武田仁、足立哲夫、土屋喬雄、最新建築環境工学 (改訂版)、井上書院、1985.1
- 10) 宿谷昌則、数値計算で学ぶ光と熱の建築環境学、丸善、1993.7
- 11) 吉田伸治、村上周三、大岡龍三、加藤信介、金泰延、(1方程式+WET型)Two layer modelによる建物外壁面の対流熱伝達率の解析、日本建築学会学術講演梗概集 (環境1)、pp.1149-1150、2000.9
- 12) 成田健一、野々村善民、小笠頭、自然風下における窓面對流物質伝達率の実測、都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究 (その1)、日本建築学会計画系論文集、No.491、pp.49-56、1997.1
- 13) 成田健一、野々村善民、小笠頭、都市表面における対流物質伝達率に関する風洞実験、都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究 (その2)、日本建築学会計画系論文集、No.527、pp.69-76、2000.1
- 14) 大塚順基、中村泰人、風洞実験による建物群模型の屋根面の熱伝達率、日本建築学会計画系論文集、No.520、pp.83-90、1999.6
- 15) 尾崎明仁、渡辺俊行、龍有二、長谷川敬一郎、熊添有一、片山忠之、浦野良美、建物外表面の熱・水分伝達に関する実験的研究—風洞実験による水平試料上面の熱・水分伝達について—、日本建築学会計画系論文集報告集、No.407、pp.11-25、1990.1

(2001年9月7日原稿受理、2002年3月4日採用決定)