空間平均処理を施した3次元都市キャノピーモデルの開発

都市建築計画における都市気候予測システムの開発 その2

DEVELOPING A THREE-DIMENSIONAL URBAN CANOPY MODEL
BY SPACE-AVERAGEING METHOD

Development of the urban climate simulation system for urban and architectural planning Part 2

足永靖信*, ヴタンカ**

Yasunobu ASHIE and Thanh Ca VU

A numerical model for the simulation of the thermal processes inside the urban canopy layer is proposed. The model is coupled with a turbulence closure model for the atmospheric boundary layer with the purpose of analyzing the thermal effects of urban areas. In the model, the buildings and land uses inside each computational grid mesh are averaged by a lumping space-averaging method. Then, a model for the evaluation of momentum loss and heat exchange between the air and the urban canopy is developed. This model accounts for all processes which can generate heat inside the canopy layer such as the heating of wall, roof and the ground surface, the conduction of heat to buildings through windows, wall and roof, and the discharge of artificial heat due to air conditioners. The coupled numerical model was applied for the analysis of heating characteristics of a housing area and an office area and the influence of a housing area on the thermal climate of surrounding vegetative areas.

Keywords : Heat Island, Urban Canopy, Heat Balance, Air Conditioning System

ヒートアイランド、都市キャノピー、熱収支、空調システム

1 はじめに

既報¹⁾では、ヒートアイランドの数値解析を目的として、レベル2.5相当の $k-\varepsilon$ モデル^{2,3)}を提示すると共に、都市キャノピー層への適用性を検討した。上記モデルにおいて、解析メッシュ内に含まれる建物壁による抗力や都市域の発生熱（顕熱、潜熱）の影響を考慮するためには、空間平均処理から導かれる運動量、熱、水蒸気の輸送方程式の都市キャノピー層関連の付加項を評価しなくてはならない。したがって、都市キャノピー層のモデル化が必要である。

従来の気象モデルでは大気熱循環を解析する都合上、都市表面を粗度面（Roughness）と見なし、都市的効果はアルベド、熱伝導率等の各種パラメータで代表させ、これらを数値モデルの入力条件として設定する方法が一般的である。その場合、地表面境界条件ではConstant Flux Layerが仮定されている場合が多いが、この部分を取り出してツール化することにより、建築的対策による気温影響を調べることが可能であると考えられている。このような考え方に基づくモデルはラフネスモデルと称されている。

建築環境工学においてラフネスモデルを都市域の熱環境評価に適用したのは森山が最初であり、モニン・オブコフの相似則に基づく数値解析結果と観測値との照合によりその実用性が確認されている^{2,3)}。その後、谷本ら⁴⁾、西岡ら⁵⁾によって空調システム排熱の生成と建築

躯体の伝熱のメカニズムがラフネスモデルに組み込まれる等、建物の伝熱系は詳細化が進んだ。さらに、萩島ら⁶⁾はゼロ方程式モデルを用いて大気を多層1次元で解くことにより都市キャノピー層を非定常で扱えるようになった。この方法はConstant Flux Layerを仮定せずに運動量や熱フラックスの輸送方程式から解を求めるものであり、鉛直1次元都市キャノピーモデルと称することが出来る。

このように都市キャノピー層のモデルは精緻化される傾向にあるが、現在抱える課題として以下の2点があげられる。まず第1点目は鉛直1次元に限定された手法であるため、土地利用配置による気温影響等、空間的拡がりの評価できないことである。第2点目は、現行の気象モデルとは乱流の取り扱い等で原理が異なるため都市およびその周辺のスケールとの連成解析が困難であることである。この他、都市キャノピー層の熱的特性として例えば都市キャノピー層の熱収支や空調システム排熱の影響等に関する研究蓄積が少ない点をあげることが出来る。

以上を踏まえ、本研究は、都市大気乱流モデルと連成解析が可能な都市キャノピーモデルを提案することを目的とする。まず、建物群を空間平均処理により粗視化した上で都市キャノピー層における運動量損失や発生熱量を予測するモデルを開発し、都市大気乱流モデルの各種輸送方程式に組み込む。この操作により都市大気乱流モデルは各

* 独立行政法人建築研究所 上席研究員・工博
** 独立行政法人建築研究所 客員研究員・学博

Chief Researcher, Building Research Institute, Dr. Eng.
Guest Researcher, Building Research Institute, Ph. D.

種輸送方程式で都市キャノピーの効果を包有することになり、理論上 2 つのモデルをシームレスに結合出来るようになる。次に、都市キャノピーモデルを実際に都市大気乱流モデルと連成解析を行うことにより、本モデルの数値解析事例を検討する。具体的には、住宅地、業務地がそれぞれ均一に配置された地区を対象にした解析と、緑地および住宅地で構成される地区を対象にした解析を行う。なお、建物の 3 次元形状を精密に再現するわけではなく CFD と区別するため、本研究で提示する数値モデルは空間平均処理を施した 3 次元都市キャノピーモデルと称することにする。

2 モデルの説明

2.1 空間平均処理と 3 次元都市キャノピーモデル

実際の都市は数多くの建物、道路が存在しており、土地利用構成も多様でありその一つ一つを解くには膨大な計算負荷が予想される。そこで、複数の建物・土地利用を地区の代表メッシュで総括して取り扱うことにする。図 1 はその基本的考え方を模式的に示したものである。まず、実際の建物配置・土地利用について均一な配置形態を仮定する。この段階で都市情報はグロス建ぺい率や建物の平均高さ等、地区のグロス値や平均値に集約される。水平方向のメッシュサイズは街区形状や解析領域により異なるが、大体 100m から数 km に設定される。図 1 に示すように都市キャノピー層に相当する解析メッシュにおいては都市構造物と大気が混在した状態になっている。そこで、次式で表される有効体積率の概念を導入する。

$$G = \frac{V_a}{V_0} \quad (1)$$

ここで、 G : 有効体積率、 V_a : 流体体積、 V_0 : 解析メッシュ体積

次に、大気が有する気温や圧力等の関数 f について解析メッシュの空間平均処理を行うことにする。ここで、 $\langle \rangle$ は体積積分を表す。

$$\langle f \rangle = \frac{1}{V_a} \iiint_{V_a} f dV \quad (2)$$

この考え方を水平方向や鉛直方向のメッシュ分割に適用し、各種の輸送方程式を解くことにより都市キャノピー層を 3 次元的に取り扱うことが可能になる。

2.2 各種輸送方程式への組み込み

既報¹⁾ではレベル 2.5 相当の $k-\varepsilon$ モデルに有効体積率 G を適用した定式化を示した。ここでは都市キャノピー層関連の付加項（以降、付加項と称する）の説明を行う。

図 1 空間平均処理を施した 3 次元都市キャノピーモデル

【運動方程式における付加項】

$$-aC_{\beta} \left(\overline{u_j}^2 \right)^{0.5} \overline{u_i} \quad (3)$$

ここで、 a : 面積密度^{注2)}、 C_{β} : 抗力係数^{注3)}

【エネルギー輸送方程式における付加項】

$$\sum H_a + \sum_{i=N,S,E,W,R} A_i H_{s,i} + \frac{Gc_p V_0 \rho_a}{Gc_p V_0 \rho_a} \quad (4)$$

ここで、 H_a : 解析メッシュ内で発生する顕熱量（人工排熱による）、 $H_{s,i}$: 解析メッシュ内の建物表面（面積 A_i ; $i=N, S, E, W, R$ をそれぞれ北、南、東、西の壁面、屋上面とする）から発生する対流顕熱量

【水蒸気輸送方程式における付加項】

$$\sum Q_a + \sum_{i=N,S,E,W,R} A_i Q_{s,i} + \frac{GV_0 \rho_a}{GV_0 \rho_a} \quad (5)$$

ここで、 Q_a : 解析メッシュ内で発生する水蒸気量（人工排熱による）、 $Q_{s,i}$: 解析メッシュ内の建物表面から発生する蒸発量

【乱流エネルギー輸送方程式における付加項】

$$+aC_{\beta} \left(\overline{u_j}^2 \right)^{3/2} \quad (6)$$

【粘性消散率輸送方程式における付加項】

$$+aC_{pe} \varepsilon \sqrt{k} \quad (7)$$

ここで、 C_{pe} : 係数^{注3)}

都市キャノピー層の発生熱には顕熱と潜熱があり、前者はエネルギー輸送方程式、後者は水蒸気輸送方程式で取り扱われる。また、都市キャノピー層の発生熱には建物表面から対流で大気に放出される熱と空調機他から大気に直接放出される人工排熱があるが、本モデルではこれらの和をソース項として一括している。

2.3 放射交換の解析方法

(1) 短波の放射交換熱量

街路空間の短波、長波の放射交換量の予測において、建物の壁表面や地表面を精緻に分割してモンテカルロ法⁷⁾、ラジオシティ法⁸⁾等により収束計算を行う方法が提案されている。これらの方法で高精度に計算するには多数のエネルギー粒子を追跡・積算することが必要とされるため、3 次元都市キャノピーモデルでは計算コストが過大になる。そこで、都市キャノピー内の詳細な放射分布は取り扱わず、建物壁面、地表面および天空の間で交換されるトータルの放射熱量を以下の要領で取り扱うことにした。

北、南、東、西の壁面をそれぞれ N, S, E, W 、地表面を G 、屋上面を R として、多重反射を考慮した各面の短波入射熱量は次式で表される。

$$SR_{i=N,S,E,W,G,R} = (1-\eta_i) S_{d,i} + \Omega_{i \rightarrow sky} S_s + \sum_{j=N,S,E,W,G,R} SR_j \Omega_{i \rightarrow j} \left[\sum_{k=1,n} \rho_k F_{k,j} \right] \quad (8)$$

ここで、 η_i は対象とする面の平均的な日影率である。均一街区を想定している本ケースでは屋上の日影率は常時ゼロとし、建物壁面や地表面では日影率を時間毎に見積もった(日影率の計算方法は後述)。建物壁面では窓面の影響を考慮するため、窓面積率を設定して外壁と窓の日射反射率を面積加算して放射計算に反映させている。式(8)の右辺には対称とする面以外の短波入射熱量が入っているため、繰り返し計算を行うことにより各面の短波入射熱量を算出する。

(2) 長波の放射受熱量

長波の放射受熱量については、建物壁面、地表面および天空の面対面形態係数を考慮して次式により計算した。

$$LR_i \Big|_{i=N,S,E,W,G,R} = \varepsilon_i [\Omega_{i \rightarrow sky} L - \sigma T_{s,i}^4 + \sum_{j=N,S,E,W,G,R} \Omega_{i \rightarrow j} \{ \varepsilon_j \sigma T_{s,j}^4 + \frac{1-\varepsilon_j}{\varepsilon_j} (LR_j + \varepsilon_j \sigma T_{s,j}^4) \}] \\ \equiv \varepsilon_i [\Omega_{i \rightarrow sky} L - \sigma T_{s,i}^4 + \sum_{j=N,S,E,W,G,R} \Omega_{i \rightarrow j} \sigma T_{s,j}^4] \quad (9)$$

(3) 形態係数

天空率の計算方法は以下の通りである。①区画内に同一形状(直方体)の建物が格子状に一定間隔で配置されていると仮定する。②対称性を考慮してある建物とその建物に面する地盤面を1つのユニットとする。地盤面を分割し各分割面から建物壁面を望んだ形態係数を算出する。③地表面の各分割面の形態係数を面積で加重平均したものが、この区画において地盤面から建物壁面を望んだ形態係数となる。この区画の地面から見た天空率は、地盤面から建物壁面を望んだ形態係数を1から差し引いた値になる。建物壁から見た形態係数の場合、建物壁を縦方向に分割し、建物壁面同志の場合は、計算する分割壁面の中央点から、相手の壁の見える範囲を計算した上で形態係数を算出する。分割壁面から地面を見た形態係数の場合は、地盤面をメッシュ分割し、分割壁面と地盤メッシュの可視・不可視を判定しながら形態係数の総和を取る。この区画における建物壁から見た平均天空率は、地面を望んだ形態係数と等しい。図2に建物の分割壁面から見た建物壁、地面の範囲を模式的に表す。

(4) 日影率

日影率を算出する場合は、壁面・地盤面分割は形態係数算出時とは異なり、建物1棟と、その建物に割り当てられる敷地を計算対象のユニットと見なし、その4方向の壁面および地盤面をメッシュ分割する。そして1つの周辺建物が当該ユニットの建物および地面に落とす影の線を予測し、地盤面のメッシュごとに日影か日向かを判定していく。この処理を全ての周辺建物について行くと、重なり合

(a) 分割壁→壁

(b) 分割壁→地面

図2 建物の分割壁面から見た建物壁、地面の範囲

った日影部分の割合を壁面(東西南北)、地盤面別に算出することが出来る。日影の影響を考慮する周辺建物の範囲は、当該ユニットの建物を中心に取り巻くように4方向に各々ユニット10列分を見込んだ。

2. 4 建物の伝熱解析方法

(1) 室内熱負荷

室内熱負荷(顕熱)は次式により算出した。

$$\text{メッシュ単位面積・単位高さ当たりの室内熱負荷} \left[\frac{W}{m^3} \right] \\ = \{ \text{壁の放熱} \} + \{ \text{窓の貫流熱} \}^{(注4)} + \{ \text{窓の日射侵入熱} \} \\ + \{ \text{室内発生熱} \} + \{ \text{換気による熱交換} \} \\ = \left\{ \frac{bldr}{B} \sum_{i=N,S,E,W} \alpha (T_{w,i} - T_{room}) (1 - F_{window,i}) \right\} \\ + \left\{ \frac{bldr}{B} \sum_{i=N,S,E,W} F_{window,i} K_{window,i} (T_{air} - T_{room}) \right\} \\ + \left\{ \frac{bldr}{B} \sum_{i=N,S,E,W,R} (1 - \rho_{window,i}) F_{window,i} SR_i \right\} \\ + \{ bldr \cdot H_{floor} \} + \{ bldr \cdot c_p \rho_a V_{floor} (T_{air} - T_{room}) \} \quad (10)$$

(2) 壁、屋根の伝熱

建物の壁、屋根の伝熱については多層の1次元非定常熱伝導解析を行った。建物用途として住宅とオフィスを想定し、各々の構造を図3に示す。壁(4方位)、屋根をそれぞれ厚さ方向に7分割して各メッシュの温度を差分による陰解法で求めた。

(3) 空調システムの設定

PAL 基準や住宅調査事例を参考として、室内の発生熱の時間変化を住宅とオフィスについて図4のように設定した。

空調の冷熱源機器として、オフィスはビル用マルチ、住宅はエアコンを用いた。各々のCOP特性を図5、図6に示す。これらは電算処理に活用するため、メーカーのカタログ値を入手して気温、部分負荷率で近似関数化したものである。空調システム排熱は冷房負荷、電力2次消費量(=冷房負荷/COP)および換気に伴う熱交換の和とした。ビル用マルチの場合、空調システム排熱は屋上で集中的に放熱、エアコンは壁面から均一に放熱とし各メッシュに割り当てた。

2. 5 境界条件

地表面における運動量、顕熱および水蒸気の流束は各々次式で表される。

	RC造	木造
屋根	外 7スファルト10 コンクリート120 空気10 グラスウール50 石膏ボード10 内	外 瓦30 木板10 7スファルト10 空気50 グラスウール50 石膏ボード10 内
壁	外 コンクリート100 グラスウール60 石膏ボード10 内	外 ブライウッド20 空気10 グラスウール50 石膏ボード10 内

図3 建物の構造

図4 室内発生熱の設定

図5 ビル用マルチのCOP特性

図6 エアコンのCOP特性

$$\tau_0 = \rho_a u_*^2 \quad (11)$$

$$H_0 = -\rho_a C_p u_* \theta_s \quad (12)$$

$$Q_0 = -\rho_a u_* q_s \quad (13)$$

u_* , θ_s , q_s はGarraat and Hicks(1973)とYamada and Bunker(1988)により次式で与えられる⁹⁾¹⁰⁾。

$$u_* = \frac{\kappa \sqrt{u_1(z_1)^2 + u_2(z_1)^2}}{\ln \frac{z_1 + z_0}{z_0} - \Psi_m} \quad (14)$$

$$\theta_s = \frac{\kappa}{P_{rt}} \frac{\theta(z_1) - \theta_s}{\ln \frac{z_1 + z_{0t}}{z_{0t}} - \Psi_h} \quad (15)$$

$$q_s = \frac{\kappa}{P_{rt}} \frac{q(z_1) - q_s}{\ln \frac{z_1 + z_{0v}}{z_{0v}} - \Psi_h} \quad (16)$$

Ψ は密度成層に対応して運動量、熱・水蒸気輸送を調整するパラメータであり、ここではDyer and Hicks(1970)の関数を用いた¹¹⁾。建物外表面の熱伝達率の予測には建物壁にはユルグスの式、屋上面ではルイス・スキームを用いた¹²⁾。

3 住宅地、業務地を対象にした解析

3.1 計算条件

住宅、業務建物がそれぞれ均一に配置された地区を対象にした解析を行った。両者に共通する計算条件を以下に示す。

- ①日射量 夏期の快晴日を想定した(太陽軌道は8月27日とした)
- ②上空境界条件 アメダス観測値にべき乗則を適用して上空100mの風速を推定しナッジング処理を行った^{注5)}
- ③初期温位 24℃
- ④鉛直方向の分割数 最小1mメッシュで35メッシュ
- ⑤解析領域 上空5,000m
- ⑥助走計算 18時間の助走計算を行い2日目の結果を採用した

住宅地、業務地の諸条件を表1に示す。建物表面および地表面のアルベドは0.2、放射率は0.95とした。オフィスの空調時間帯は8時-21時、室温設定値は27℃とし、住宅は日中29℃、夜間27℃となるように8時-24時の時間帯で空調を行うとしている。

3.2 温度変動と熱収支

住宅地の表面温度の時間変動を図7に示す。午前中に東向きの壁面温度の上昇が著しく、正午には屋根面温度が最も高く午後には蓄熱を伴った西向きの壁面温度が最も高温になっている。図8には同様に業務地のものを示した。日中における壁面温度の上昇は比較的緩やかである。これはRC造の熱容量の影響であると考えられる。業務地の気温は住宅地のものよりも高く両者の差は夜間において広がる傾向にある。住宅地と比べて建物が高い業務地では地表面に日影がもたらされるが、弱風の効果が効いて地表面温度の値は住宅地のものより高くなっている。

表1 計算条件

用途	住宅地	業務地
グロス建ぺい率	30%	30%
建物幅	10m	20m
建物高さ	8m	20m
建物構造	木造	RC造
空調システム	エアコン	ビル用マルチ
地表面被覆	人工被覆	人工被覆

図9、図10は住宅地、業務地の熱流束を都市キャノピー全体で総和をとり単位土地面積で各々表したものである。図中の「熱伝導」は建物壁面、地表面の伝導熱流束の総和を土地面積で割った値である。午前中に吸熱のピークを示し夕方以降に放熱に転じるが、業務地の日変動が住宅地より大きいことが解る。業務地では建物の表面積が大きく、その影響が考えられる。また、床面積に対応して空調システム排熱の値は業務地の方が住宅地より大きい。対流顕熱は地表面、壁面共に住宅地の値が業務地を上回っている。これは熱伝達率の風速依存によるものである。

3. 3 冷房負荷・COP

図11には業務地の冷房負荷とCOP、室温の日変動を示した。冷房負荷は13時-16時に最大を示し、床面積当たり約80W/m²である。この時間帯にはCOPの値が低く表れており午前中と比べると約2割効率が低下する。空調運転が停止すると、室温が上昇し外気温を上回る。そのため、夜間の換気はわずかではあるが外気を暖める方向に作用する。なお、今回の解析では換気回数は1日を通じて1回/hrとしている。

3. 4 気温、風、乱れの鉛直分布

鉛直分布の計算結果について述べる。図12は気温の鉛直分布を住宅地と業務地で比較したものである。業務地の気温は住宅地のものより高い。日中では業務地の建物高さ(20m)以下で気温差が大きいが上空では明確な差は見られなくなる。夜間における住宅地の気

温は下方が冷却されているのに対して、業務地では不安定状態を維持している。

図13はスカラー風速について同様に表したものである。建物高さ以下で風速が大きく減衰しており、建物抗力の影響が極めて大きいことが解る。

図14は14時における k と ε の鉛直分布である。 k の値は上空に向かうにつれて大きくなる傾向がある。また、業務地においては風速と同様、建物高さ付近で変局点を有する。Caughey and Palmer (1979)は対流混合層ではある高さ以上で乱れがほぼ一定になることを観測から示した¹³⁾。地上50mまでの解析範囲で k が増加す

図11 業務地の空調負荷、COP、室温

図7 住宅地の温度変動

図8 業務地の温度変動

図9 住宅地の熱収支

図10 業務地の熱収支

る傾向は特異な結果ではない。一方、 ε は建物高さでピークを示しその上空及びキャノピー内では徐々に小さくなる。

4 3次元都市キャノピーモデルによる緑地と住宅地から構成される地区の熱環境解析

4.1 計算条件

緑地と住宅地から構成される20km四方の地区を対象にして3次元都市キャノピー解析を行う。解析領域を水平方向に1kmメッシュで20×20に分割し、解析領域の中央部分(10×10)を住宅地、その周辺は緑地とする。解析の基本条件や住宅地の設定は3.1と同様である。緑地はアルベド0.2、蒸発効率0.15を設定した。解析領域の側方には気温、湿度、風速、 k 、 ε に関してゼロ勾配の境界条件を与えた。

4.2 熱環境解析結果

図15は14時における解析結果を示したものである。緑地の冷気が住宅地に進入することによる冷却効果が表れている。地上付近とその上空において住宅地の気温は下流に向かって上昇し、一旦ピークを示した後、住宅地を過ぎる前に温度低下が始まる。そして、住宅地で加熱された空気は下流の緑地に至ると再び温度が低下してい

く様子が解る。風速については図中四角で囲った建物がある領域で減衰している様子が示された。

以上のように、住宅地は周囲の緑地と熱的相互関係を有しており、風向により気温分布は変化する。本論で示した都市キャノピーモデルの3次元解析は、建築土地利用配置による熱環境影響を広域で評価することを可能とする手法である。しかしながら、地区内の気温、風の分布性状や都市境界層の再現性に関するモデル検証は現段階では十分とは言えず、今後の検討課題としたい。

5. 結論

本論の結論を以下に示す。

- (1) 複数の建築・土地利用に対して空間平均処理を施すことにより都市キャノピー層の熱・運動量輸送の効果を大気乱流モデルの輸送方程式の付加項に反映させ、都市キャノピーの3次元解析を行う方法を提示した。
- (2) 住宅、業務建物がそれぞれ均一に配置された地区を対象にした解析を実施した結果、オフィスの壁面温度は住宅に比べて日中の温度上昇は緩慢であること、その理由として熱容量の影響をあげた。一方、業務地の伝導熱流束は住宅地のそれと比較して

図12 気温の鉛直分布

図13 風速の鉛直分布

図14 k 、 ε の鉛直分布(14時)

図15 14時における気温、風の解析結果
(左図中の□部分は住宅の範囲を示す、右図のA B断面)

日変動が大きいが解った。

- (3) 緑地と住宅地から構成される地区に対して3次元都市キャノピー解析を実施した結果、上流に位置する緑地の影響を受けて住宅地の気温上昇が抑制されること、住宅地では建物高さの領域で風速が減衰する様子が確認された。

記号

a :面積密度[1/m]、 A :解析メッシュ内の建物表面積[m²/Mesh]、 $bldr$:建物面積割合[-]、 B :建物幅[m]、 c_p :定圧比熱[J/kgK]、 C_{fi} :抗力係数[-]、 C_{pe} :キャノピーモデル係数[-]、 F_k :素材kの面積割合[-]、 G :有効体積率[-]、 H_0 :地表面の対流顕熱[W/m²]、 H_a :解析メッシュ内で発生する顕熱量(人工排熱による)[W/Mesh]、 H_{floor} :床面積・単位高さ当たりの発熱量[W/m² of floor/m]、 H_s :建物表面の対流顕熱[W/m²]、 k :乱流エネルギー[m²/s²]、 K_{window} :窓の熱貫流率[W/m²K]、 L :大気放射量[W/m²]、 LR :長波放射受熱量[W/m²]、 P_{fi} :乱流プラントル数[-]、 q :混合比[kg/kg]、 q_s :摩擦湿度[kg/kg]、 Q_0 :地表面の蒸発量[kg/m²s]、 Q_a :解析メッシュ内で発生する水蒸気量(人工排熱による)[kg/s/Mesh]、 Q_s :建物表面の蒸発量[kg/m²s]、 S_0 :直達日射量[W/m²]、 S_d :拡散日射量[W/m²]、 SR :短波入射熱量[W/m²]、 T_{air} :気温[K]、 T_{room} :室温[K]、 T_s :表面温度[K]、 T_w :室内の壁表面温度[K]、 u :風速[m/s]、 u_s :摩擦速度[m/s]、 V_a :解析メッシュ体積[m³]、 V_s :流体体積[m³]、 V_{floor} :床面積・単位高さ当たりの換気量[m³/s of floor/m]、 z_0 :幾何的粗度[m]、 z_{0t} :熱に関する粗度[m]、 z_{0v} :水蒸気に関する粗度[m]、 α :熱伝達率[W/m²K]、 ϵ :粘性消散率[m²/s³]、 ϵ_i :面iの放射率[-]、 η :日影率[-]、 θ :温位[K]、 θ_s :摩擦温度[K]、 κ :カルマン定数[-]、 ρ_a :密度[kg/m³]、 ρ_k :素材kの日射反射率[-]、 σ :ステファンボルツマン定数[W/m²K⁴]、 τ_0 :地表のせん断応力[kg/ms²]、 Ψ_a ・ Ψ_b :安定度関数[-]、 $\Omega_{A \rightarrow B}$:AからBを見た形態係数[-]

注記

注1) 本研究で用いるレベル2.5相当の $k-\epsilon$ モデルとは、渦粘性表現で現れるモデル係数 C_ϵ 、乱流プラントル数 P_{fi} について大気安定度の影響を考慮し、気象分野で提案されているレベル2.5と同様の改善を工学系の $k-\epsilon$ モデルに施したものである。都市建築計画における都市気候予測システムの研究を実施する上で、1) 気象分野で実績のあるレングススケールを用いたモデルを都市空間まで延長する方法、2) 都市空間の評価実績を伴う $k-\epsilon$ モデルを局地気象スケールの問題にも適用する方法、3) 異種モデルのネスティング、の3つの方法が考えられる。本論は、2番目の立場から、都市空間の評価実績を重ねながら工学的手法の拡張可能性を検討するものである。

注2) 面積密度 a は、建物群の場合次式で評価した。

$$a = \sqrt{bldr} \quad (A.1)$$

ここで、 $bldr$ は建物面積割合(=グロス建ぺい率[%]/100)である。

注3) 本論では $C_{fi}=0.875$ 、 $C_{pe}=0.5$ とした。

注4) 窓の熱貫流率については、住宅の次世代省エネルギー基準¹⁵⁾等を参考として一定値($K_{window}=5.8$ W/m²K)を与えた。

注5) 水平方向に均一な状態で観測値 U_0 とのナッジング項を付加した運動方程式はYamada and Bunker(1989)より次式で表される¹⁴⁾。ここで、 f_c はコリオリ係数、 f_n はナッジング係数、 U_g は地衡風である。なお、本論ではコリオリ力を考慮した解析を行った。基礎方程式の詳細は既報¹⁾を参照されたい。

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = f_c(u_2 - U_{g2}) + f_n(U_{o1} - u_1) \quad (A.2)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = -f_c(u_1 - U_{g1}) + f_n(U_{o2} - u_2) \quad (A.3)$$

参考文献

- 1) ユタンカ、足永靖信、浅枝隆：都市大気境界層の乱流モデリング(都市建築計画における都市気候予測システムの開発 その1)、日本建築学会計画系論文集、第536号、pp.95-99、2000.10
- 2) Moriyama, M. and M. Matsumoto: Control of Urban Night Temperature in Semitropical Regions During Summer, Energy and Buildings, 11(1988), pp.213-219
- 3) 森山正和、竹林英樹、宮崎ひろ志：一次元熱収支モデルによる夏季の都市気温シミュレーションにおける蒸発効率と人工排熱成分の推定に関する一手法、日本建築学会計画系論文集、第519号、pp.85-91、1999.5
- 4) 谷本潤、林徹夫、片山忠久、大濱淳司、笠間幹雄：建築-都市-土壌連成系モデルによる都市高温化要因の定量的比較に関する研究(第1報 理論構成手法と基本解)、日本建築学会計画系論文集、第504号、pp.87-93、1998.2
- 5) 西岡真稔、松尾陽：都市キャノピーモデル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、第521号、pp.73-80、1999.7
- 6) 萩島理、谷本潤、片山忠久、大原健志：改良・建築-都市-土壌連成系モデル(AUSSSM)による都市高温化の構造解析(第1報 モデルの理論構成及び標準解)、日本建築学会計画系論文集、第550号、pp.79-86、2001.12
- 7) 吉田伸治：連成数値解析による屋外温熱環境の評価と最適設計法に関する研究、平成12年度東京大学大学院博士論文、2000.12
- 8) 萩島理、谷本潤、片山忠久：周辺街区状況が壁面入射熱量に与える影響に関する系統的数値実験、日本建築学会計画系論文集、第554号、pp.7-13、2002.4
- 9) Garrat, A. J., and B. B. Hicks: Momentum, heat and vapor transfer to and from natural and artificial surfaces, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 99 (1973), pp. 680-687
- 10) Yamada, T. and S. Bunker: Development of a nested grid, second-moment turbulence closure model and application to the 1982 ASCOT brush creek simulation, J. Appl. Meteorol., 27 (1988), pp.562-578
- 11) Dyer, A. J., and B. B. Hicks: Flux gradient relationships in the constant flux layer, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 96 (1970), pp. 715-721
- 12) Louis, J. F.: A Parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, Boundary Layer Meteorology vol. 17 (1979), pp. 187-202
- 13) Caughey, S. J. and S. G. Palmer: Some aspects through the depth of the convective boundary layer, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 105 (1979), pp. 811-827
- 14) Yamada, T. and S. Bunker: A numerical model study of nocturnal drainage flows with strong wind and temperature gradients, J. Appl. Meteorol., 28 (1989), pp.545-554
- 15) 財団法人住宅・建築省エネルギー機構(当時)：住宅の次世代省エネルギー基準と指針、1999.11

(2004年2月10日原稿受理、2004年8月23日採用決定)