

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

Modelling of sensible heat flux from urban canopy to atmosphere for urban climate prediction

浦野明*

花木啓祐**

粉川大樹**

Akira URANO

Keisuke HANAKI

Hiroki KONAKAWA

ABSTRACT : It is modelled that sensible heat flux from urban canopy to atmosphere with models of radiation, computational fluid dynamics, and room air temperature. The target of the model is not only modeled or simplified urban canopy, but also complicated and existing canopy. The model and database of radiation and wind velocity distribution are introduced through neglecting air temperature distribution inside urban canopy. The annual radiation and wind velocity distribution would be calculated with the database and standard climate data made for planning building HVAC system. The output of the model of this study is going to be used for setting sensible heat flux in urban climate prediction model.

KEYWORDS : urban climate, latent heat flux, urban canopy, radiosity method

1 序論

従来、都市気候モデルにおける建築物の壁面からの顕熱流の取り扱い、水平な地面と同様に取り扱うか、1時刻のみの熱平衡状態を対象とした計算を行なう場合が多く、数日程度の時定数を有する建築物の駆体への蓄熱過程を考慮した非定常解析を行なうことは一般的ではなかった。都市キャノピーから大気への伝熱モデルに関しては今までいくつかの提案があり、榊原(1994)は東西方向に無限に長い単体の2次元建物を仮定したモデル、西岡・松尾(1998)および谷本ほか(1998)はそれぞれ単体建物またはその無限繰り返しの形状を仮定したモデルを提案している。さらに梅干野ほか(1996)はGISデータに基づく任意形状を対象とした顕熱フラックスの解析手法として、都市キャノピーの内部とその上空のエクマン層の2層に分けたモデルを提案しているものの、都市キャノピー内部の気流解析については今後の課題としている。

本研究ではモデル化された単純な都市キャノピーのみならず、既存ないし今後新規に計画される街区・建物群の大気に与える顕熱流の評価を行うために、解析対象とする都市キャノピーの形状の自由度が大きく、さらに数日から最大で年間に及ぶ時間スケールの解析が可能なモデル開発を目標とした。

2. モデルの構成

本モデルは建物内の室温変動、建物間の長波・短波の相互反射、建物間の気流分布による建物表面における顕熱収支を連成して解析するものである。モデルは大別して放射モデル、気流モデル、室温モデルの3つからなる(図-1)。放射モデル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、気流モデルは都市キャノピー内の気流の空間分布、室温モデルは街区内の壁体表面の温度をその固体内部の温度と共に解析する。

建物の外壁表面における顕熱収支は

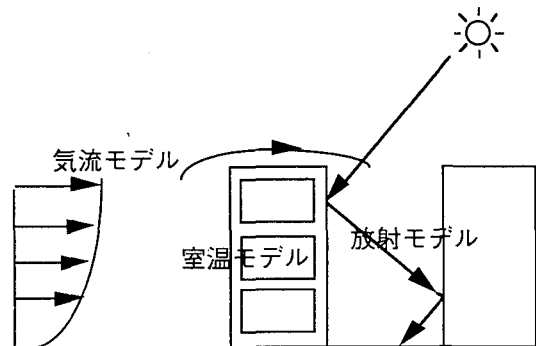


図-1 モデルの概要

* 大成建設(株): Taisei Co. Ltd., ** 東京大学大学院工学系研究科: Graduate School of Eng., Univ. of Tokyo.

$$R_s + R_l = h_o(t_s - t_a) + q_{con} \quad (1)$$

と表される。ここで R_s は建物外表面における短波放射フラックス、 R_l は長波放射フラックス、 h_o は外表面の顕熱の熱伝達率、 t_s は外表面の温度、 t_a は大気温度である。 R_s 、 R_l は放射モデル、 h_o は流体モデル、 t_s 、 q_{con} は室温モデルにより解析される。また、 t_a および放射モデルの入力データとなる日射量・大気放射量および流体モデルの結果を室温モデルの境界条件にする際に用いられる風向・風速については、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年間の標準気象データ（松尾ほか（1980））から必要な日時について該当要素を用いる。一ノ瀬ほか（1997）、浦野ほか（1997）における都市のメソスケールの解析では、建物からの人工廃熱を当該高さの解析格子における顕熱輸送の式に与えていたが、同様に（1）式における $h_o(t_s - t_a)$ を顕熱発生量として与えることにより、街区を構成する建物からの顕熱流をメソスケールモデルの中で考慮することが可能である。各モデルの概要は以下のとおりである。

3. 放射モデル

放射モデルはCGの分野から浦野ほか（1993）により都市キャノピーの放射解析手法として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ものであり、その概要は以下のとおりである。

Kajiya（1986）および中村（1987）は射出・反射特性が共に方向に無関係の場合の放射輸送方程式を次式で示した。

$$B(\vec{p}) = E(\vec{p}) + \rho(\vec{p}) \int_{\Omega} B(\vec{p}') dF(\vec{p}', \vec{s}') \quad (2)$$

ここで B は放射発散度、 E は放射能、 ρ は反射率、 F は形態係数、 $\int_{\Omega} dF$ は F について半球で積分することを示す。壁面の微小要素 i の放射発散度を B_i 、放射能を E_i 、反射率を ρ_j として（2）式を離散化すると

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^n B_j F_{ji} \quad (3)$$

となる。（2）式は各微小要素からの放射の影響を受けた微小要素 i からの放射束を求めるものであり、直接解くと行列式の演算の負荷が大きいが、Cohen et. al.（1988）は逆に微小要素 i からの放射がほかの微小要素 j ($j=1 \sim n$) に対して与える影響を以下の式で示した。

$$B_{ji} = \rho_j B_j F_{ij} A_i / A_j \quad (4)$$

ここで B_{ji} は i からの放射を受けて j で反射した放射束、 F_{ij} は j に対する i の形態係数、 A_i 、 A_j はそれぞれ i 、 j の面積である。（4）式の B_{ji} は未吸収の外向き放射束であると考えて、以下の作業を行う。

(a) 全ての微小要素の中から未吸収の外向き放射束が最大の要素 i を選び出す。

(b) (4) 式を用いて i からの放射が各微小要素 j

($j=1 \sim n$) で反射した放射束を算出する。

(c) B_{ji} を当該微小要素の未吸収の放射束に加えた後に、新たな i を選び出す。

Cohen et. al（1988）によるラジオシティ法のアルゴリズムは、(a) - (c) の作業を繰り返し行なうことにより、未吸収の放射束の値が実用上無視できる値にまで収束させ、合理的な計算量により壁面における放射量が求めるものである。

ここで短波放射量の解析を行う場合は、浦野ほか（1997）では、(a) の解析を行う前の当初の外向き放射束は、当該時刻の直達・天空日射量により求めた値をそのまま入力していたが、本研究では当該時刻の全天日射量 E_a で除して正規化した値を用いて解析する。すなわち（3）、（4）式はそれぞれ

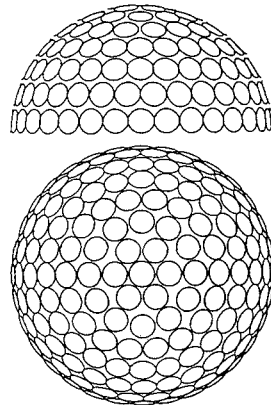


図-2 天空の分割

$$B_i/E_a = E_i/E_a + \rho_i \sum_{j=1}^n (B_j/E_a) F_{ij} \quad (5)$$

$$B_{ji}/E_a = \rho_j (B_i/E_a) F_{ij} A_i / A_j \quad (6)$$

となり、ラジオシティ法による解析結果として B_i/E_a が出力される。解析当初に用いる (5) 式における E_i/E_a は特定の日に依存せず、太陽の位置のみに依存する値であるため、天空を図-2のように151等分し、解析対象の期間内に太陽の通過する位置に該当する箇所についての E_i/E_a に基づく B_i/E_a を解析する。その出力に標準気象データにおける解析対象の日時における E_a を乗じることににより各時刻での B_i が求められる。以上により、高々151ケース以内、通常は数十ケース程度の放射収支計算結果をデータベース化し、その結果を標準気象データと組み合わせることにより、年間の短波放射収支が解析可能である。

一方長波放射解析では、 σ をステファン・ボルツマン定数とすると

$$E_a = (1 - \rho_i) \sigma T_s^4 \quad (7)$$

と表され、 T_s は当該時刻における室温モデルの結果を用いるため、(5)、(6) 式ではなく、(3)、(4) 式を用いて各時刻毎に室温モデルと連成させて解析を行う。

4. 気流モデル

気流モデルは村上ほか (1994) 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る。 i 方向の平均流 U_i および乱流エネルギー k 、乱流の散逸 ϵ の輸送方程式は、それぞれ

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = - \frac{\partial}{\partial X_i} \left(P + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ v_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right\} \quad (8)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\frac{v_i}{\sigma_i} \frac{\partial k}{\partial X_j} \right) + (P_k + G) - \epsilon \quad (9)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\frac{v_i}{\sigma_2} \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_1 P_k + C_3 G) - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (10)$$

と表される。建物の外表面に直近の流体セルの運動量の各方向成分から風速の絶対値 U を求め、それに $urgess$ の式による対流熱伝達率 α を用いて

$$F_s = h_o (t_s - t_a) = \alpha U (t_s - t_a) \quad (11)$$

により顕熱フラックス F_s が求められる。村上ほか (1994) では (8) ~ (10) 式のほか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 (8) ~ (10) 式と共に室温・放射モデルと連成させて解くことにより、 t_a 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、流体解析の際の数値積分の際の時間きざみは1秒以内になることがあるため、数時間程度の時間積分を行う際にも計算量が膨大になる。街区内では大気との混合が活発であるため、 t_a は1℃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 t_s が10~20℃程度の分布を持つため、本研究では t_a の空間分布は無視し、標準気象データによる当該日時の気温の値を空間について一様な値として用いた。

風速 U は正規化された値として考え、解析領域の側面境界に与える接近風の風向は16方位についてそれぞれ別個に流体解析を行い、その結果をデータベースに記録する。解析対象日時の標準気象データの風向と同一の風向を接近風速とした風速の空間分布のデータを取り出し、そのデータに標準気象データの風速の値を乗することにより、任意の日時での風速の空間分布が求められる。なお、解析領域は側面および天井の境界が都市キャノピー内の構成物の近傍の気流分布に影響を及ぼさない程度に取ればよいので、領域の高さは解析対象の建物最高高さの数倍程度とする。

さらに簡易解析として、風速の空間分布を無視して標準気象データの風速の値をそのまま U の値として用いることにより、流体モデルを用いなくても近似的な顕熱フラックスが解析できるようにした。

5. 室温モデル

宿谷 (1993) によると、室温変動の微分方程式は以下で表される。

$$Q_{ra} \frac{dt_{ra}}{dt} + \sum_{j=1}^N A_j h_{cj} (t_{ra} - t_{sj}) + Q_{va} (t_{ra} - t_a) = H_r - H_{out} \quad (12)$$

ここで、 Q_{ra} は室内空気と家具などの熱容量の合計、 t_{ra} は室温、 dt は時間微分、 A_j は壁面 j の表面積、 h_{cj} は壁面 j の対流熱伝達率、 t_{sj} は壁面 j の表面温度、 Q_{va} はすきま風・換気により室を出入りする空気の熱容量、 H_r は室内で発生する熱量(人工廃熱のうち対流により室内空気に直接伝えられる成分)、 H_{out} は空調装置により室外に除去される熱量である。なお、(13) 式における壁面は室内側の表面を指す。また、 t_{sj} は壁体の非定常熱伝導の式

$$\frac{dt_k}{dt} = \frac{\lambda_k}{c_{pk} \rho_k} \cdot \frac{\partial^2 t_k}{\partial x_k^2} \quad (13)$$

による。ここで壁体を各構成材料毎に表面に垂直方向に数点ずつに分割してその質点を k とすると、各質点について t_k は壁体の温度、 λ_k は熱伝導率、 c_{pk} は比熱、 ρ_k は密度、 x_k は質点間の距離である。街区内の各建物の各階室について (14) 式を (1) 式、(13) 式と連成して解析することにより、壁体の外表面および室内側の表面温度がそれぞれ求められる。

道路・土壌などの建物以外の都市キャノピー構成材料については、 t_{ra} を一定値とすることにより、上記と同様に解析可能である。

6. まとめ

本研究により、都市キャノピーを構成する表面の熱収支を解析して顕熱フラックスを求める手法が示された。

本モデルを用いて、モデル化された街区を対象とした解析を行なうことと、実際の街区を対象とした実測結果と解析結果の照合をおこなうことが、今後の課題として残されている。

<参考文献>

- Cohen, M.F., et al : A progressive refinement approach to fast radiosity image generation, Computer Graphics, Vol.22, Number 4, pp75-84, 1988.
- 梅干野ほか：都市の熱・空気環境の評価手法の提案 その1，日本建築学会学術講演梗概集，587-588,1996.
- 一ノ瀬ほか：細密地理情報にもとづく都市気候数値シミュレーション-地表面境界条件の高精度化，天気，44，785-797, 1997.
- Kajiya, J. T. : The rendering equation, Computer Graphics, Vol.20, Number 4, pp143-150, 1986.
- 松尾ほか：空調設備の動的熱負荷計算入門，建築設備技術者協会，pp170, 1980.
- 村上ほか：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気空間の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.
- 中村泰人：建築都市空間内の放射熱伝達問題における放射輸送関数について，日本建築学会計画系論文報告集，第372号，pp51-58, 1987.
- 西岡ほか：都市キャノピーにおける建築の放散熱とその影響 その1 建築の熱放散に関する伝熱モデル，日本建築学会計画系論文集，508，29-34, 1998.
- 榊原保志：夏季、屋上貯水・換気・エアコンが都市大気・室温に与える影響の数値実験，地理学評論，67A-8 575-587, 1994.
- 宿谷昌則：数値計算で学ぶ光と熱の建築環境学，丸善，pp302, 1993.
- 谷本ほか：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，504，87-93, 1998.
- 浦野ほか：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.
- 浦野ほか：都市活動の立体的再配置による都市熱環境の制御に関する研究，環境システム研究，25，463-467, 1997.