

都市の熱環境と植生効果のLESシミュレーション

LES Simulation on Thermal Environment and Vegetation Effect in Urban Area

日野幹雄・横須賀政史

by M. Hino and M. Yokosuka

Central regions of big cities are becoming warmer and wamer due to the construction of tall buildings and paved roads and the reduction of green and water area ; i.e. the formation of "HEAT ISLANDS". In order to evaluate the effects of vegetation in the thermal environment of urban region, numerical simulations of air flow and thermal condition have been performed, applying LES turbulence model to show the mitigation effects by the evapotranspiration of plants.

Key Words : LES, numerical simulation, heat islands, vegetation, latent heat, thermal environment, park, evapotranspiration

1. 序論

1. 1 水理学で何故大気を取り扱うか？

極く最近まで水理学研究者(hydraulic engineers)は、河川湖沼や海岸の水の流れを取り扱って来た。それが、あたかも生物が海から陸へ上陸し進化発展したように、いつの間にか水から大気へと活動の場を広げて来た。この点について現在活躍中の人々の間には違和感はないようであるが、水理学研究が「水」の研究に限定されないのは何故か、を後学の方々のために、一応整理しておきたい。

a) 水文学研究の要請とその延長

歴史的経緯からすれば、水文学研究の必要から、われわれは自然と土壌・植生・降雨の研究へとすすんで来た。土木工学分野での水文学では、初めは(降雨の問題は気象学者に任せて)降雨が与えられた場合の洪水予測に重点がおかれていた。ところが一方において、降雨流出機構解明がすすみ様々な降雨-流出モデルが提案されてこの問題が解決に向かうにつれて、降雨の浸透過程やその生成場としての土壌の条件、植生、蒸発散過程の研究、そして降雨過程そのものの研究へと水文研究者の意欲が高まって行った。他方において、水需要の増大、気象条件の変化にともない洪水のみではなく渇水の問題、したがて、降雨(予測)も重要な課題となって行った。水文学研究は元々水の循環を取り扱う学問で定義されているが、水理学研究者はこのようにして、水圏・土壌圏・気圏・植生圏のすべてを研究対象と考えるようになって来た。

b) 本四連絡橋の架橋と風工学

水文研究者が気象学的研究を目指す以前から、土木技術者には風の研究をすることが要請されていた。すなわち、1960年頃から本格化する本四連絡橋の建設に伴う風荷重や風と構造物(吊橋)の振動との相互作用の研究である。1940年の有名なタコマ旧橋(米)の風による落橋以来、これは構造工学での重要な課題であり、本四架橋調査委員会の発足を契機に風の乱れの性質と構造、風による吊橋の振動および両者間との相互作用の研究がすすんだ。丁度このような時期、正確に言うところこれよりやや先だってイギリスにおいて Wind Effects on Buildings and Structures に関する最初の国際会議が開かれ、風工学が産声をあげた。

*) 正員 中央大学総合政策学部

**) 中央大学総合政策学部

c) 土木工学への社会的要請

水理学は本来、土木工学が対象とする infrastructure の建設に伴う「流れ」の問題を取り扱って来たのであり、従来は、橋や堤防を造る際の河の流れや港湾建設あるいは海岸保全のための海の流れと波を研究対象として来た。しかし、人間の活動の規模が広く大きくなり、その影響が局所的な範囲に止まらなくなるにつれて、またその結果として地域的さらにすすんでは地球規模での環境が問題となるようになると、当然のことながらこれらの課題に対しては、「流れ」を取り扱う土木技術者、つまり水工技術者が責任を負わなければならないという社会的要請が生じた。例えば、道路の整備が交通量を増やし大気汚染を変化させる、水域や緑地を潰しての宅地開発・都市開発が都市のヒートアイランド化をもたらすなどである。

1. 2 目的

環境の問題の評価・解決には、これまで水工学の常套手段であった模型実験の方法はあまり期待できない。というのは、この問題には、流れの他に、熱や生物・生態系などの要素が加わり、単純に縮尺模型で置き替えることが難しく、また、相似律という考えも簡単に成立しないためである。

一方、実際の状況を実測によって掴もうにも、こんどは対象が広すぎ大きすぎて「群盲象を撫でる」ことになり兼ねない。

この点、数値シミュレーションは最も有効と思われる。しかし、その場合にも、乱流モデル・植生生理の基本など素要因をキチンと解明しておく必要がある。これらの素要因についてのわれわれの理解もかなりすすんだので、それらを組み込んで都市の熱環境と植生効果についてのシミュレーション実験を試みた。その結果、植生効果を有効たらしめるためのいくつかの指針が得られた。

2. 基礎方程式と計算条件

2. 1 流れ場の基礎方程式

流れ場の基礎方程式には、格子平均のレイノルズ方程式、気流場の乱流モデルには、LESを用いた。植生層流れの乱流計算にもLES概念を拡張して導入した（稲垣他, 1992）。

(i) 大気系の基礎方程式

$$\frac{D}{Dt} = -C_p \theta_M \frac{\partial \Pi}{\partial x} + \Omega v + D_u \quad (1)$$

$$D_{ui} = \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j}, \quad R_{ij} = K_m \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} E \quad (2), (3)$$

ここに、 C_p ：定圧比熱、 θ_M ：基準温位（ポテンシャル温度）、 q_v ：水蒸気量、 Ω ：コリオリ・パラメータ、 q_v ： q_v の基準の状態の為、 E ：乱れのエネルギー。また、圧力（エクス関数 Π ）は次式で記述される。

$$C_p \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] (\theta_M \Pi) = \frac{\partial Q_i}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] \quad (4)$$

$$Q_i = -u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + D_{ui} + \delta_{is} q \left(\frac{\theta}{\theta_M} + 0.6(q_v - \bar{q}_v) \right)$$

(ii) 乱れのLESモデル

$$\begin{aligned} \frac{DE}{Dt} = & -R_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[K_m \frac{\partial E}{\partial x_j} \right] - \frac{C_\epsilon}{L} E^{\frac{2}{3}} - C_m s(2E)|U| \\ & + \alpha C_m s|U|^3 + gw \left[\frac{\theta}{\theta} + 0.61(\overline{q_v} - \overline{q_v}) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、s : 葉面積指数 (LAI=leaf area index) .

$$K_m = C_m LE^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$L = (dx dy dz)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

R : SGSレイノルズ応力, K : 渦粘性係数, E : SGS乱流エネルギー,
dx, dy, dz : 格子間隔, C_m : LES定数.

2. 2 植生系の基礎

(i) 植生系の基礎方程式

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] - c_m s U^2 \frac{u}{|U|} \quad (8)$$

(ii) 水分量の拡散方程式

$$\frac{DH}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_{H_x} \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{H_y} \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{H_z} \frac{\partial H}{\partial z} \right] + \kappa_H U(H_s - H) \quad (9)$$

ここに,

$$\kappa_H = \text{fn}(U, H_s - H, T_L) \quad (10)$$

C_m : 植生抵抗, κ_H : 気孔よりの水分蒸発散のバルク係数,

H_s : 葉温T_Lにおける飽和水蒸気量.

(iii) 葉温変化の方程式 (T_L)

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_L}{\partial t} = -\sigma T_L^4 + R_{\text{eff}} - c_p \rho \kappa_T \mu (T_L - T) - L \rho \kappa_H \mu (H_s - H) \quad (11)$$

ここに、R_{eff}は周囲のセルとの放射の授受を考慮した有効放射量（一次元の場合（近藤,1994）の拡張）.

(iv) 日射量変化の方程式

$$\frac{\partial R_n}{\partial l} = -\lambda s R_n \quad (12)$$

ここに、l : 入射距離, λ : 入射光の減衰係数.

土壌系の方程式：本モデルは元来土壌系の水分・熱の変化も連立して解くものであるが、今回は実時間にして10～20分程度の間の現象であるので、この部分の計算は切り離して行った.

2. 3 計算領域と境界条件など

計算領域：Case I : 平坦地に建物が1個ある場合. x, y, z軸方向のメッシュ数は、49×41×22で建物壁

面近傍で間隔を密にした不等間隔直交格子.

Case II: 平坦地に長さ×幅×高さが40m×20m×20mのビルが幅20mの道路を挟んで碁盤目状に配置されている. 計算領域のメッシュ数は, Case Iと同じく49×41×22の不等間隔直交格子である.

境界条件: 両ケースとも計算領域の上面はdamping boundaryとし, 上下面間の間隔は, Case IでZh=30m, Case IIでZh=60mである.

水平方向の境界条件は流れ場については周期境界とし, 熱・水蒸気に関しては, 後流の影響が再び上流境界となることを避けるために, 吹き抜けとした.

初期条件: 計算は場全体に一般風方向に一定の圧力勾配を与え, 無風速状態から計算を始め, 流れが定常化するまで計算を続けた. 流れの場がほぼ定常化するまでの計算ステップ数はCase Iで約5000, Case IIで約15,000であった. その後, 日射を与え場がほぼ定常化するまで計算をすすめた. 一般風速は Case Iで約6.5(m/s), Case IIで約2(m/s)である.

時間刻み: 計算の時間間隔 Δt の初期値としては, $\Delta t=0.1s$ を与えたが, 計算途中で計算安定性の条件から自動的に調製され, Case Iでは計算過程の大部分において $\Delta t=0.01\sim0.02s$ であった. これは, (Δt は風速の最大値に関して決まるが,) 建物近傍で生じる強風のためである. この Δt の値は必要以上に余りにも細かいので試みに安定条件から決まる Δt の2倍の値に固定して計算をすすめてみたが, 計算は間もなく不安定化した.

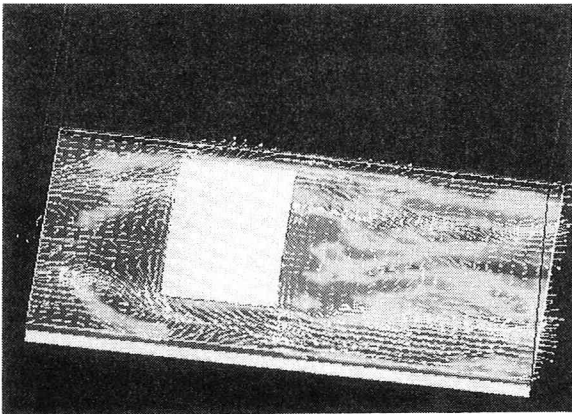
Case IIの場合は $\Delta t=0.1s$ で計算は進行した. これは(建物高さと同じ幅の道路を挟んではいるが)建物がびっしり並んでいて最大風速が孤立した建物の場合のように大きくならなかったためである.

2. 4 プログラム上の問題点・工夫点

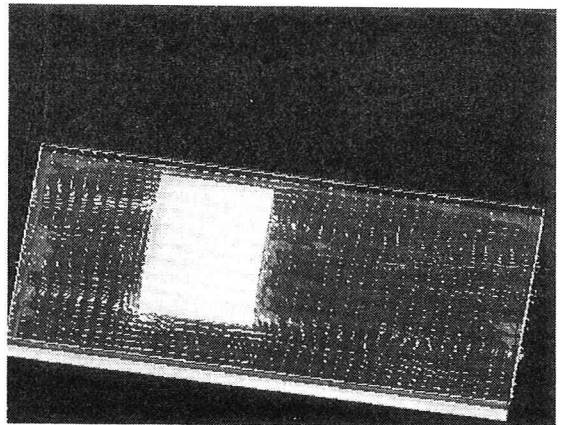
本計算のビル街に囲まれた中央公園の計算は, 原理的にはこれまで行って来た広場の中に建物一つある場合の拡張であって, この基本プログラムを前後・左右に接続すれば良い. しかし, ビル群の間の4本の道路が走り, 中央区域もビルとした場合とこれを中央公園とし, そこが裸地の場合, 中央公園を緑とした場合と様々なケースを計算できるようにしたので, プログラムは思いの外複雑化した. また, 建物数が多くなり, その壁面で流れや熱輸送の境界条件を与えなければならないので, その分計算ステップ数は急増した.

3. 建物周りに植生を配する効果

長さ×幅×高さが12m×20m×6mの建物がある場合, 夏の強い日射のもとの熱環境に植生がどんな効果を果すかを, 様々な条件についてシミュレートした. 日射強度はすべての場合 $W=600w/m^2$ としたが, 日射の



(a) 植生なし



(b) 全域植生

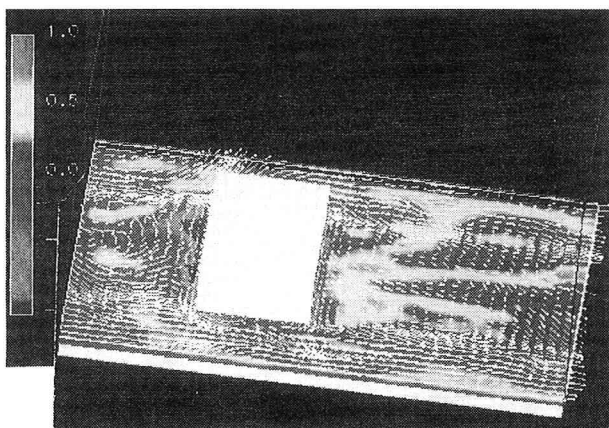
方向は建物の前面に射す場合と、逆に建物の背面に射す場合との2種の場合を考えた。後背の場合の方が熱せられた建物の背面壁からの放熱が流速の遅い建物のwake域にいわば綴じ込められるようになるので、より厳しい条件となる。植生の配置としては

- ・ 建物周り全体に配する場合、樹高は建物と同じ場合と建物高さの1/2の場合の2通り。
- ・ 建物の屋上に建物高さの1/2の植生を配する場合。
- ・ 建物の前面あるいは背面、ないしは両方に生垣を配する場合。

など様々なケースについて計算した。そのそれぞれの場合について述べることは煩雑であるので、代表的な例として次のケースについて記する。

(Case Ia) 植生なし、(Case Ib) 建物の周りをすべて植生で囲む場合、(Case Ic) 建物の前後に生垣を配する場合

植生なしの場合には、後流域および日射を受けるビル背面壁が熱源となり、後流域の高温化した気流がストリーク状にかなりの後方にまで延びている。しかし、たった一重の生垣を配するだけで、建物前面の生垣周辺が低温化するだけでなく、日射の当たる建物背後の流域の高温化も押さえられている。建物の周囲を植生で囲む場合は全域が低温化するのはもちろん、乱れの構造も細くなっている。



(c) 前面植生

図-1：建物まわりの植生効果

4. ビル街ストリート・キャニオンの小公園

風速零の初期状態から始めた流れ場の計算がほぼ定常状態に達した時点で、風向とは逆の、建物の背後から強さ $W=600\text{W/m}^2$ の日射を与え、次の3つのケースについて更に8,000~20,000ステップの計算をすすめた。すなわち、ビル街の一区画を運動公園(植生なし)などにする場合(Case IIa)と、樹木を植えた小公園とする場合(Case IIb), 中央森林小公園および街路樹を植えた場合(Case IIc), について、熱環境のシミュレーションを行った結果の比較を図-2 a, b, cに示す。得られた結果は、われわれの経験を裏打ちするものであるが、この事はこのシミュレーションの方法を都市の設計、公園・緑地や森林の最適配置のために活用することを期待させる。

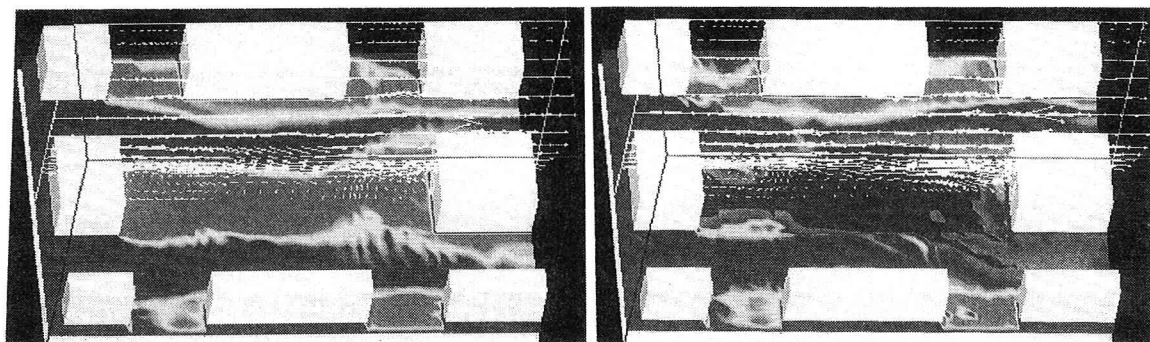
スペースの関係上、計算結果の極く一部を載せるに止ったが、植生が全くない運動公園の場合、道路面・ビル屋上それに背に日射を受ける後流側ビル壁面が熱源として流れ場全域が高温化するが、中央ブロックを森林公園とする場合には、植生密度が粗であるにもかかわらず、中央公園ブロックとその後方が数度低温化する。さらに、道路に高さ6mの街路樹を植えた場合には高温域はほとんど消滅する。

5. 効果的な植生効果

数値シミュレーションと昨年・今年の夏の実測から、次の指針が得られる。

(1) 葉の密生する樹種を植えることや樹木の密植は避けなければならない。なぜならば、密生する葉は、ことに弱風の場合には気流を妨げ植生からの顕熱・潜熱の輸送を低下させる。従って、周囲に対する気候緩和効果は少なく、また植生層内は高温となるであろう。

(2) 葉の密度の粗な樹種や疎らな植樹の気候緩和効果も少ない。というのは、葉面積が少ないため日傘効果と蒸発散効果が低く、貯熱作用の大きい地面や建物壁面が植生層を透過した日射を吸収し、高温化するからである。



(a) 植生なし

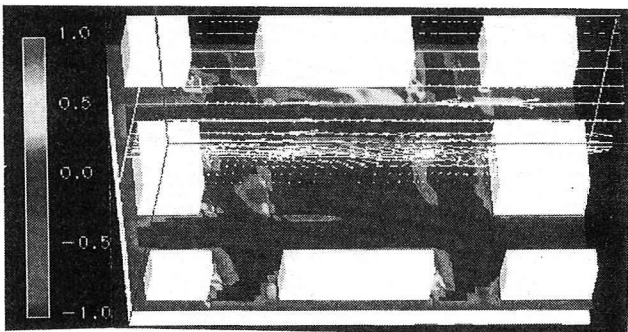
(b) 中央森林公園

また、日射が強い場合に蒸散が急速に起こる結果、葉の水ストレスが急上昇し、反作用的に気孔が閉じ、蒸散が低下ないし停止する（いわゆる「葉っぱの昼寝」）現象が生じるから。

(3) 植生の効果を高めるためには、

- ・ 樹種、樹高、植樹密度等の植樹配置を十分検討しなければならない。
- ・ 当然のことながら、土壌からの水の補給が十分なければならない。

経験的にも樹高がある程度ある闊葉樹は夏の日射を極めて大きく緩和するようである。



(c) 街路樹・中央森林公園

図-2：ストリート・キャニオン，中央空地における植生効果

謝辞

本研究は、文部省科学研究費 基盤研究(B)「街路樹およびツタ科植物の都市気候緩和に果たす気象水文的研究」課題番号07455200（研究代表者 日野 幹雄）の補助により行われたものである。また、本研究に先立つ前段階の研究においては、文部省科学研究費重点領域研究（「乱流の数値モデル」，研究代表者 大宮司 久明）の補助および東京電力（株）環境部および尾瀬林業（株）の協力を受けた。ここに、厚く謝意を呈する。

参考文献

- 日野幹雄・横須賀政史(1996)：日射を受ける建物周りの流れ場と植生効果／数値シミュレーション，日本流体力学会，'96 講演論文集，427-428。
- 稲垣聡・神田学・日野幹雄(1992)：植生－大気境界面での運動量輸送に関するLESモデルによる検討，水工学論文集，36，689-692。
- 神田学・日野幹雄(1990)：大気－植生－土壌系モデル(NEO SPAM)による数値シミュレーション。(1)植生モデリング，水文・水資源学会誌，第3巻，37-46。
- 近藤純正(1994)：水環境の気象学，朝倉書店。
- Shaw, R. H. and Schumann, U. (1992)：Large-Eddy Simulation of turbulent flow above and within a forest, B.-L. Met., 61, 47-64。