

都市における熱的環境に関する研究 (その1)

——熱拡散の基礎理論解析——

岡 建 雄

Research on Thermal Environment in Urban Area

Tatsuo Oka

Abstract

The heat discharged from ground surfaces, diffusing into the atmosphere, produces a kind of thermal environment. In urban areas, so-called "heat island" phenomena are seen due to decrease in cooling ability because of construction materials different from green tracts and by large amounts of energy consumption. In this report, thermal diffusion phenomena are examined theoretically, and employing a case study of an imaginary urban area, thermal distribution maps, distribution maps of pollution concentration, and change in wind velocity due to natural convection are described. This is to grasp the thermal environment of municipal activities and their discharge systems, and the studies are made as a part of the theme which is to find out the basic direction of future heat utilization from a long range view.

概 要

地表から廃出された熱は大気中で拡散しつつ、その空間にある種の熱的環境を形成するが、市街化空間においては緑地と著しく異なる構成材料による放熱能力の低下、および膨大なエネルギー消費量により、いわゆるヒートアイランド現象が見出される。本報は熱拡散現象を理論的に考察し、仮想の都市を用いたケーススタディーを行い、熱的環境として温度分布図、汚染濃度分布図、自然対流による風速変位等を描いたものである。これは都市活動とその廃棄系としての熱的環境を把握し、長期的視野に立った今後の熱利用の基本的方向性を見出そうとするテーマの一環として行われたものである。

1. まえがき

上空から東京を見下すと広大なコンクリートでおおわれた人工物であり、その周囲に緑地が広がっている。地表面の変革を第1次破壊系、得られた資源の利用を第2次破壊系と呼ぶことにすれば、都市においては第1次破壊系、第2次破壊系共その規模、強度において頂点に達しているといえよう。すでにテクノロジーアセスメントの時代に入ったといわれる現在、どれ程の環境資源の消費が行われているかは廃棄系がどのようなものであるかによって評価することができようし、現代社会を支えるものが巨大なエネルギー消費であるとすれば、エネルギーを消費する限り廃熱が出るとい

う自明の理から閉鎖系技術では解決できない熱汚染が最終的な公害の形態であると考えられよう。緑地とは著しく異なる構成材料による放熱能力の低下および膨大なエネルギー消費量、すなわち第1次破壊系、第2次破壊系の影響は市街化空間においていわゆるヒートアイランド現象となって現われてくる。本報の研究目的はこれらの地表から廃出される熱が大気中でどのように拡散されていくかを理論的に考察し、巨視的な自然対流による大気の運動を加味した熱拡散構造を把握しようとするものである。

——記号——

T: 温度 (°C) \bar{U} , \bar{V} , \bar{W} : 一般流の x, y, z 方向の風速 (m/s) u, v, w: 自然対流による x, y, z 方

向の風速変位 (m/s) U, V, W: x, y, z 方向の風速 (m/s) D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向の拡散係数 (m²/s) $\omega_x, \omega_y, \omega_z$: x, y, z 方向の渦度 (1/s) \bar{P} : 一般流による圧力 (kg/m²) P: 自然対流による圧力変位 (kg/m²) P: 圧力 (kg/m²) H: 空気1m³中に発生する熱量 (kcal/m³・s) γ : 空気の比重量 (kg/m³) ρ : 空気の密度 (kg s²/m⁴) C_p : 空気の比熱 (kcal/kg °C) g: 重力加速度 (m/s²) T_0 : 絶対温度 (°C) σ : 乱流せん断応力 (kg/m²) U_* : 摩擦速度 (m/s) Z_r : 地表相度 (m) N: 大気安定度パラメータ n: 時間座標 i, j, k: x, y, z 方向の空間座標 i+1 は1格子, i+0 は半格子だけ x 方向に進むことを意味する。

2. 熱拡散における理論解析

都市において熱の拡散現象を支配する因子は都市上空の風向, 風速, 地形や建物等による複雑な風の流れ, 逆転層の有無等非常に多岐にわたっているが, これらはみな拡散に対する外部条件であり, 基本的な拡散現象は次の拡散方程式によって表現することができる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \quad \dots\dots(1)$$

$$Q = \frac{H}{C_p \cdot \gamma} \quad \dots\dots(2)$$

(1)式より拡散現象を支配するものは発生熱量Hのほかに風速U, V, Wおよび拡散係数 D_x, D_y, D_z であることがわかる。従って気象要素や地形要素等の外部条件はすべて風速や拡散係数に作用すると考えられる。

都市においてヒートアイランドが形成され, 気温分布が不均一になった場合, 大気其自然対流による風速分布の変化が生じることは充分予想される。しかしながら一般に大気の運動は極めて複雑なものであるから本報においては巨視的な対流現象を把握し, それらを加味した熱拡散理論について述べていく。

一般に風速分布は水平方向には均一であり, 一般流により運動量の方程式は満たされていると考えれば, 自然対流による風速変位 u に関して次式が導かれる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + U \frac{\partial u}{\partial x} + V \frac{\partial u}{\partial y} + W \frac{\partial u}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\partial p}{\rho \partial x} \quad \dots\dots(3)$$

同様にして v, w に関する運動量の方程式が導かれる。これらは摂動法の考え方を取り入れてはいるもの

の後述の数値計算法を用いれば, 摂動法の条件である $\bar{U} \gg u$ 等の制限を必ずしも必要としない。一方, x 方向の渦度を次のように定義する。

$$\omega_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \quad \dots\dots(4)$$

y 方向, z 方向の渦度も同様に定義し, 消去法を用いれば運動量の方程式から圧力項が消去され, 次の渦度方程式が導かれる。

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial t} + U \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + V \frac{\partial \omega_x}{\partial y} + W \frac{\partial \omega_x}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial z^2} + \frac{g}{T_0} \frac{\partial T}{\partial y} \quad \dots\dots(5)$$

連続の式は大気を非圧縮性の流体と考えると次式で示される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots(6)$$

(3)~(6)式までが対流現象を表現する基礎式であるが, これらを直接解くことはできない。3次元領域では流れ関数を導入して解を見出すことが困難であるため, 消去法によりこれらの式を順次整理していくと次の速度に関する方程式が導かれる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial \omega_y}{\partial z} - \frac{\partial \omega_z}{\partial y} \quad \dots\dots(7)$$

渦度方程式および速度に関する方程式は3次元領域では各々3方程式になる。従って大気其自然対流を加味した熱拡散現象を考察するために解くべき方程式は(1)式熱拡散方程式, (5)式渦度方程式, (7)式速度に関する方程式となるわけである。

3. 風速分布および拡散係数

地表から300m 前後までの風速, 拡散係数等は大気の乱流境界層内の現象としてとらえることができる。乱流境界層内における平均風速は古くから種々の提案がなされているが, 一般に建物高さ以下を除けばベキ乗法則で近似できるとされている。すなわち地上 Z_0 m での風速を U_0 m/s とすれば地上 Z m での風速 U m/s は次式で示される。

$$U = U_0 \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{\frac{1}{N}} \quad \dots\dots(8)$$

Nは一般に2~7の値をとり, 大気安定度が増す程小さくなる。

一方, 拡散方程式中において風速分布と共に支配的役割をもつ拡散係数は一括して渦拡散係数としてとらえることができ, 風速分布および乱流せん断応力を用いて次式で表現できる。

$$D_z = N \times \left(\frac{0.4}{\log_e \left(\frac{z+z_r}{z_r} \right)} \right)^2 \times z_r^{\frac{1}{N}} \times z \left(1 - \frac{1}{N} \right) \times U_0 \dots\dots\dots(9)$$

(9)式で示される拡散係数は建物以上の高さの大気に適用できるものである。建物高さ以下の拡散係数は一般に理論から導くことは難しく、本報では次式で表わされる拡散係数を用いている。

$$D_z = 3.6 + 0.18 \times z + 0.5 \times |U| \dots\dots\dots(10)$$

4. 数値計算

与えられる風速分布や拡散係数等を用いて、熱拡散式のような非線型方程式を解く方法として差分法があるが、ここでは最も簡明な陽解法を用いた数値計算法について述べていく。

拡散方程式を適用する対象範囲を Δx, Δy, Δzで、対象時間を Δt で分割すると、熱拡散方程式は次の差分方程式で近似される。

$$\begin{aligned} n_{+1}T_{i,j,k} = & nT_{i,j,k} + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \{ D_{xi+o,j,k} (nT_{i+1,j,k} - nT_{i,j,k}) \} + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \{ D_{i-o,j,k} (nT_{i-1,j,k} - nT_{i,j,k}) \} + \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \{ D_{yi,j+o,k} (nT_{i,j+1,k} - nT_{i,j,k}) \} + \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \{ D_{i,j-o,k} (nT_{i,j-1,k} - nT_{i,j,k}) \} + \frac{\Delta t}{\Delta z^2} \{ D_{i,j,k+o} (nT_{i,j,k+1} - nT_{i,j,k}) \} + \frac{\Delta t}{\Delta z^2} \{ D_{i,j,k-o} (nT_{i,j,k-1} - nT_{i,j,k}) \} + \frac{\Delta t}{\Delta x} A_T + \frac{\Delta t}{\Delta y} B_T + \frac{\Delta t}{\Delta z} C_T + q \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

ここで A_T, B_T, C_T は格子周囲の風向、風速により次式で表せられる。

$$C_{i+1} = 0.5 \times (nU_{i+1,j,k} + nU_{i,j,k}) \dots\dots\dots(12)$$

とすると IF(C_{i+1} ≥ 0) A' = 0
IF(C_{i+1} < 0) A' = C_{i+1} × (nT_{i,j,k} - nT_{i+1,j,k})

$$C_{i-1} = 0.5 \times (nU_{i-1,j,k} + nU_{i,j,k}) \dots\dots\dots(13)$$

IF(C_{i-1} > 0) A'' = C_{i-1} × (nT_{i-1,j,k} - nT_{i,j,k})
IF(C_{i-1} ≤ 0) A'' = 0
A_T = A' + A''

同様に B_T, C_T が求められる。但し熱発生量 q は

$$q = \Delta t \times H / C_{p\gamma} \dots\dots\dots(14)$$

渦度方程式も同様に差分方程式に変換するが、u, v, w の風速に関する方程式は D_x = D_y = D_z = 1, U = V = W = 0 とした定常状態の差分方程式に変換し、充分一定値に近づくまで反復収束計算を行うことになる。

5. ケーススタディ

差分方程式の応用範囲は非常に広いものではあるが、あらゆる場合に解が求まるというものではない。これは差分方程式に関する有用な研究が困難であることに起因するものであり、常に実際的な数値実験を並行して行うことが必要である。

5.1. モデル設定

熱拡散式を用いて考察する範囲を7500m × 7500m × 400m とし、この考察範囲内に 150kcal/m²・h の発熱強度をもつ 2500m × 2500m の仮定の都市が存在するとした。(図-1) 拡散式に必要な気象条件は拡散係数、一般流の風速分布であるが、これらは図2に示される値を用い、境界条件を設定し差分方程式に組み入れた。

5.2. 計算結果とその考察

図1のモデルにおいて温度、渦度、風速変位等の初期条件をすべて0として非定常計算を行った場合の1時間後の値を図3～図6に示すが、本モデルにおいてはほぼ定常状態に達していると考えてさしつかえない。図3、図4に水平温度分布、断面温度分布を示すが、風速が弱いにもかかわらず熱は風向に対し横方向にはほとんど拡散されずに上空へ拡散する熱と風下へ移動する熱が大部分である。最高温部は発熱領域の風下側に現れ、その上昇温度は約1.5℃である。一般流に対し中央部がその左右の領域に比べてやや低温になり、等温線図が歪んでいるのはヒートアイランドによる対流現象のためである。

対流現象が拡散にどの程度影響するかを考察するために全領域から 100g/m²・h の強度で物質を地表から廃出させた場合の水平面物質濃度分布を図5に示すが、発熱領域の風下に物質濃度が約1.5倍の高濃度地点が生ずる結果となった。

風速変位の断面図を図6に示すが、考察範囲の中央部に生じたヒートアイランドにより大気は循環運動を起こし、その最大値は地表付近に現われ約 0.17m/s の値となる。ベクトルで表現すれば x 方向の最大風速変位は 0.07m/s, y 方向では 0.16m/s, z 方向では 0.016m/s であった。一方、連続の式により計算結果のチェックを行うと各格子に対する全流量に対しての誤差は全格子の平均で3%であり、境界付近の第1層は他に比べ誤差は大きいものとなっている。

今回のケーススタディによると大気自然対流による風速変位はほとんど測定不可能に近い程微小なものであるが、拡散現象に与える影響は決して少なくないと推定された。

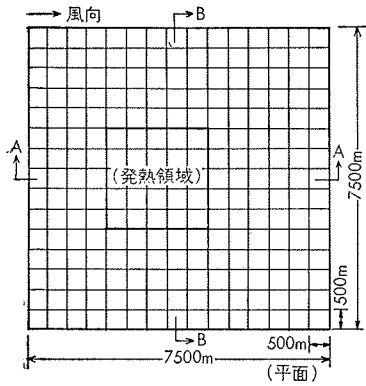


図-1 モデル設定

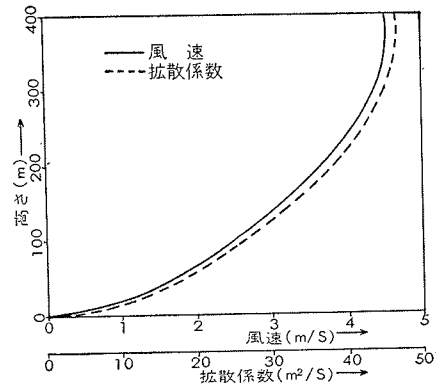


図-2 風速と拡散係数の垂直分布図

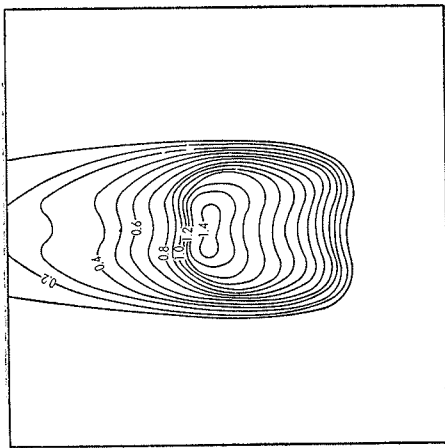


図-3 水平面温度分布図(Z=10m) 単位: °C

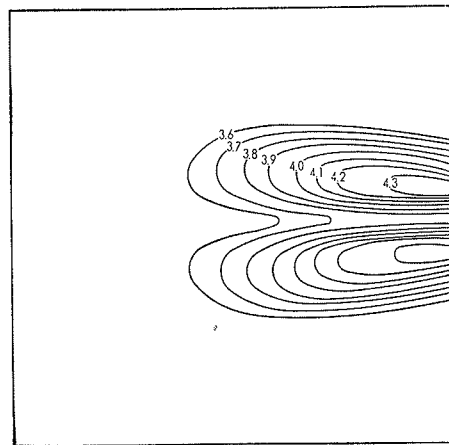


図-4 A-A 断面濃度分布図 単位: °C

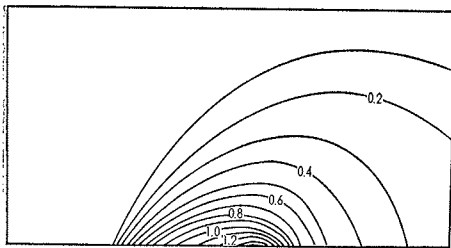


図-5 水平面物質温度分布図(z=10m) 単位: °C

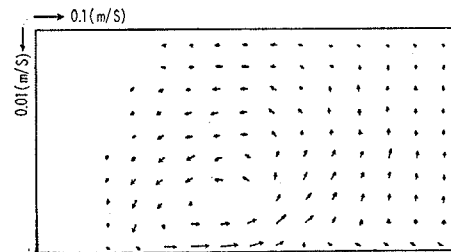


図-6 A-A 断面風速変位分布図 単位: m/s

参考文献

- 1) 尾島俊雄「サーマルシステムモデルの作成 No. 1 ~No. 15」(大会学術講演梗概要)
- 2) 通産省産業エコロジー熱グループ資料
- 3) 自動車排出ガスによる大気汚染の研究(機械学会)
- 4) J. E. Fromm (IBM Research)
- 5) Man's Impact on Environment (McGraw-Hill)