

II-2

都市河川のクーリング効果に関する数値解析

北海道大学 正員 藤田 睦博
北海道大学工学部 学生員 魚本 康弘

1. はじめに

都市域においては、郊外に比べて多くの熱源を持ち、さらに河川のような水体や緑地が減少しているため、高温化し熱環境は悪化するばかりである。近年、都市内河川がその周囲に及ぼす影響について様々な研究がなされており、河川周辺の気温、湿度、風速などの観測結果が数多く報告されている。一方、都市河川の熱環境に及ぼす理論的な解明についても、ペナール・レーリー型の対流を考慮した基礎的研究¹⁾がなされている。本研究は、実現解明のための基礎として実際の現象を理想化した状態で温度場を解析し、それを観測データと比較して今後のモデル改良の基本的条件を得ようとするものである。

2. 実際の河川域におけるクーリング効果

従来の観測としては、ここでは村川ら^{2), 3)}が広島市で行ったものについてとりあげてみる。これから気温の水平、鉛直分布についてどのようになっているのかを把握し、理論解析の基本的条件について考察する。

(1) 水平分布

図-1は川岸からの時期の異なる気温の水平分布の測定を示している。Xは川岸からの距離を川幅の2分の1で割った値であり、Tはその地点での気温と川岸での気温との差である。3つのデータはどれも夏期のもので、これによると川幅の4分の1から2分の1程度の距離までは気温の低下ははっきりと見られ、それ以上離れてしまうと、温度勾配はほぼなくなり市街地の気温に近くなっていることがわかる。^{2), 3)}

(2) 鉛直分布

図-2は河道上の気温の鉛直分布で、Zは水面からの距離を川幅の2分の1で割った値で、Tはその地点での気温と川から十分離れた地点での気温との差である。河川の影響はこれによると川幅近くまで及んでいるのではないと思われる。さらに(C)のような分布も無風状態の時に見られる。²⁾

³⁾ これらのデータを考える時に、風の影響を無視することはできないであろうが、測定が不十分であったり、ある時間内での平均値をとっているデータもあるので、ここでは触れない。

3. ポテンシャル流による熱伝導モデル

ここで、川の流れ方向に垂直な断面内での二次元問題を考える。まず、基礎式として流れの連続式、運動方程式、エネルギー方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

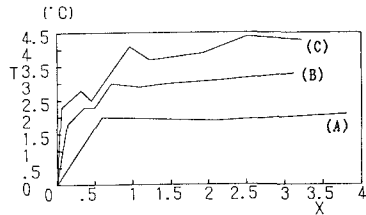


図-1 河川の水平影響範囲

(A) 1985年8月2,3日13-18時の平均値 (川幅100m)
(B) 1987年7月28日12-15時の平均値 (川幅277m)
(C) 1987年7月28日12-15時の平均値 (川幅310m)

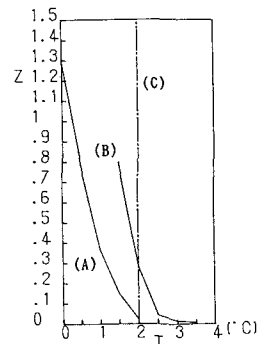


図-2 河川の鉛直影響範囲 (川幅100m)

(A) 1988年6月14日13時
(B) 1986年8月12日12時
(C) 1988年8月2日17時

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} = a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + a_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4)$$

ここで、 ρ : 密度、 u, w : x, z 方向の風速、 F_x, F_z : x, z 方向の質量力、 P : 圧力、 T : 温度、 a_x : x 方向の温度伝導率、 a_z : z 方向の温度伝導率 である。

(1)式は、定常な非圧縮性流体の時、

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

(2)、(3)式は、運動エネルギー $\frac{q^2}{2} = \frac{(u^2 + w^2)}{2}$ を代入し定常を考えると、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} q^2 \right) + w \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2} q^2 \right) - u \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (7)$$

(4)式は定常を考えると、

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} = a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + a_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (8)$$

速度ポテンシャル ψ とすると、 $u = \frac{\partial \psi}{\partial x}$, $w = \frac{\partial \psi}{\partial z}$ であるからこれより(5)、(6)、(7)式は、

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} q^2 \right) = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2} q^2 \right) = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (11)$$

速度ポテンシャルは(9)式を解くことによって得られ、これより流速が求まる。そして温度分布を得るため(8)式を有限要素法によって解く。今、図-3のようなメッシュによる計算領域を考えて、境界条件を次のようにする。

<速度の境界条件> $x=0(\text{m}) \rightarrow \phi = \phi_0(\text{m}^2/\text{s})$
 $x=600(\text{m}) \rightarrow \phi = 0(\text{m}^2/\text{s})$
 $z=0, 200(\text{m}) \rightarrow \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0$

<温度の境界条件> $x=0(\text{m}) \rightarrow T=35(^{\circ}\text{C})$
 $x=600(\text{m}) \rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = 0$

$Z=0(\text{m}) \rightarrow \begin{cases} 0(\text{m}) < x < 275(\text{m}) \rightarrow T=35(^{\circ}\text{C}) : 275(\text{m}) < x < 325(\text{m}) \rightarrow T=25(^{\circ}\text{C}) \\ 325(\text{m}) < x < 600(\text{m}) \rightarrow T=25(^{\circ}\text{C}) \end{cases}$

$Z=200(\text{m}) \rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} = 0$

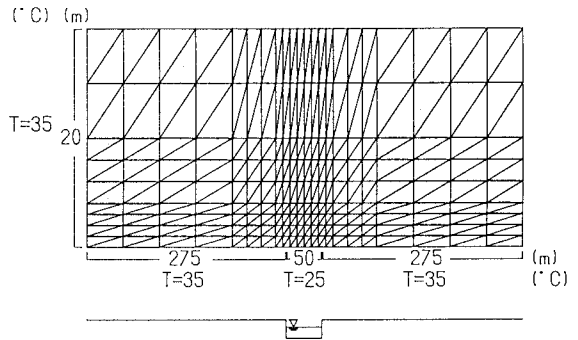


図-3 有限要素法における計算領域とメッシュ

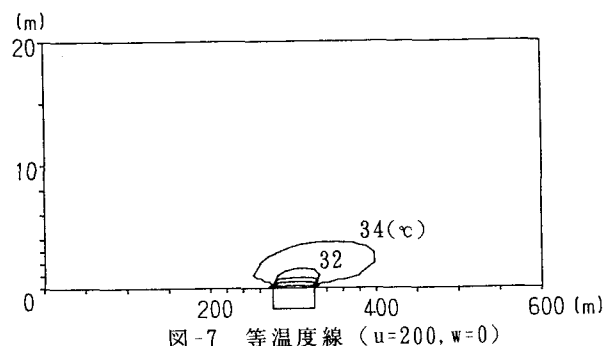
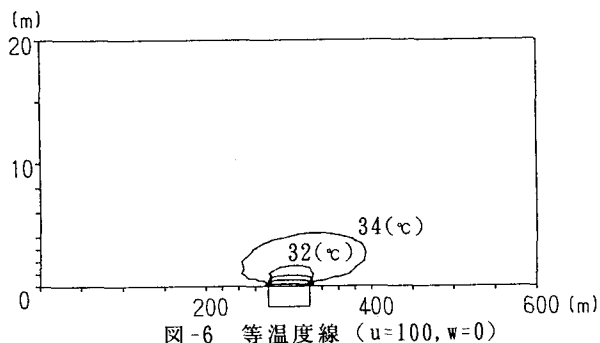
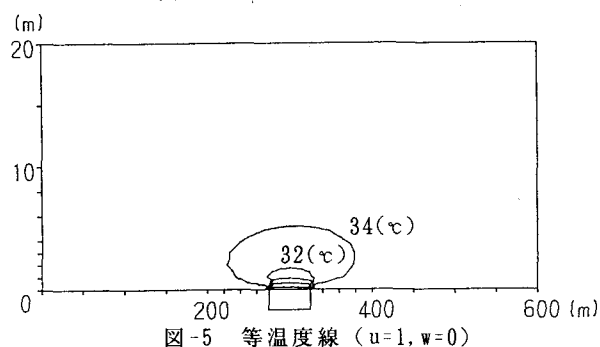
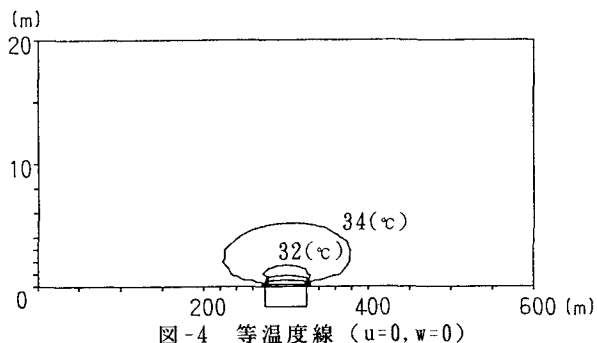
実際の気流は層流ではなく乱流であるので、その効果を考慮して a_x, a_z を渦温度伝導率として考えることにした。渦動粘性係数 $\nu_x = 10^4 \text{ (m}^2/\text{s)}$ 、 $\nu_z = 10 \text{ (m}^2/\text{s)}$ 、プラントル数 $Pr = 0.8$ 、とすると、
 $a_x = \nu_x / Pr = 12500 \text{ (m}^2/\text{s)}$ 、 $a_z = \nu_z / Pr = 12.5 \text{ (m}^2/\text{s)}$ となる。

4. 計算結果と考察

$w=0\text{(m/s)}$ で $u=0\text{(m/s)}$ (図-4)、 $u=1\text{(m/s)}$ (図-5)、 $u=100\text{(m/s)}$ (図-6)、 $u=200\text{(m/s)}$ (図-7)の4通りの計算結果を示す。等温度線は 2°C 毎に引いてあり、最も外側に引かれている線は 34°C のものである。

図-5、6、7と順に見ていくと、風速が大きくなるにつれて鉛直方向の影響範囲が狭くなっていくのが確認できる。一方、水平方向の影響範囲は風速が大きくなるにつれて左側が狭くなり、右側に広がっている。これは実際の観測とも一致する傾向である。しかし、図-4から図-5にかけては水平、鉛直方向共にほとんど変化はなく、 $u=5\text{(m/s)}$ まで計算しても同様であった。このことは熱伝導が風による熱伝達よりもその効果が大きいことを意味するが、これは乱流の効果を温度伝導率の値を変えることだけによって処理しようとしたことに問題があると思われる。またその影響範囲が、実測値に比較して鉛直方向に関しては明らかに狭いのは、実際には温度差によって起こる対流により河道の中心から周囲に向かう流れが生じるはずであり、その流れが周囲の加熱域の熱伝導の影響を遠ざける効果を持つと考えられるからである。

さらに、実際の現象を考えた時に問題であるのは、境界条件である。今、図-3で示してある第一種の境界条件である $T=25, 35^\circ\text{C}$ といった値は、それぞれ河川、地面の表面温度を想定したものである。その少し上の大気温度については、温度境界層を考えると違ったものになり、実際には水面上と市街地とではこれほどの温度差は生じないと思われる。以上のことを今後モデルに考慮する必要がある。



5. 今後の展望

前節で指摘したように、温度差によって生じる圧力差による流れが一様な強制流れの他に生じることになり、水平対流を考慮したモデルが必要になると思われる。水平対流については、区域のうちのある一部分が加熱域となって起こるヒートアイランドについて解いた例がある⁴⁾が、今問題となっているのは区域のうちのある一部分が冷却域となっている場合のもので、クールアイランドと呼ばれるものである。この時冷却域からその周囲に向かう流れが生じ、それによって対流が生じてくる。ブシネスク近似による運動方程式とエネルギー方程式から以下のような式が導かれる。

$$\varepsilon_s \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \psi' = - \frac{\partial T'}{\partial x} + E_s \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)^2 \psi' \quad (12)$$

$$\varepsilon_s \frac{\partial T'}{\partial x} = \frac{E_s}{Pr} \left(\frac{\partial^2 T'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T'}{\partial z^2} \right) \quad (13)$$

ここで、 T' 、 ψ' ：温度、流関数の変化量、 ε_s 、 E_s ：定数

(13)式で温度分布を求め、それによって(12)式より流速を決定することができる。現在、オーダー比較により、式(12)、(13)を簡略化して扱うか、直接、数値解析をするかを検討中である。

【参考文献】

- 1) 武若聡, 池田駿介：広い加熱域の中に狭い冷却域が存在する場の熱対流に関する数値計算, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, 第2部, pp. 256-257, 1991
- 2) 村川三郎ほか3名：都市内河川が周辺の温熱環境に及ぼす効果に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第393号, pp. 25-34, 1988
- 3) 村川三郎ほか3名：同上（続報）, 日本建築学会計画系論文集, 第415号, pp. 9-19, 1990
- 4) 木村竜治：地球流体力学入門, 東京堂出版