

建設省土木研究所 正会員 橋本 宏
建設省土木研究所 正会員 宇多 高明
建設省土木研究所 新行内利隆

1. まえがき 夏の砂浜の温度状態について考えると、砂の比熱は海水に比較して小さいために、日中日射が強ければ海温より砂浜の温度が高くなり、逆に夜間は熱の放射、冷却が強いため海温より低くなる。このため汀線近くではこの温度差による熱拡散が生ずると考えられる。本研究は、天然状態で生ずるこの温度差を利用した熱拡散係数の算定法について検討したものである。ところで、著者ら¹⁾は沿岸流の卓越する場合の定常熱拡散について理論解を求め、実測値との比較を行うことによって熱拡散係数の算定を行ったが、ここで対象とするのは、陸温が周期的に変化する場合である。

2. 熱拡散の理論解 水温を T 、時刻を t とし、汀線より沖向きに x 軸、鉛直方向に z 軸をとったとき、現象が沿岸方向には一様であるとすれば、基本式は式(1)のように表わされる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここに k_x 、 k_z は各々 x および z 方向の熱拡散係数とする。式(1)を鉛直方向に積分すると、

$$\int_{-h}^0 \frac{\partial T}{\partial t} dz = \int_{-h}^0 \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) dz + k_z \frac{\partial T}{\partial z} \bigg|_{-h}^0 \dots\dots\dots (2)$$

式(2)において k_x は一般には x の関数であるが、ここでは平均的な拡散係数を求めるために、 $k_x = k$ (定数) とおく。式(2)の右辺第2項は水面および水底における熱の移動を表わす。しかし夏期日射が強い場合、陸上部と海水の温度差の方が、大気と海水または海底面と海水の温度差よりはるかに高くなると考えられるため、第一近似としては第2項は第1項に対して省略しても良いであろう。また式(2)はライプニッツの公式によって積分・微分の順序を交換すると、

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^0 T dz = k \frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_{-h}^0 T dz + k \frac{\partial}{\partial x} \left[-\frac{\partial h}{\partial x} (T)_{-h} \right] - k \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{-h} \dots\dots\dots (3)$$

となる。式(3)の右辺第2、3項は水深変化がある場合 0 とはならないが、水深変化が緩やかであると仮定し、これらの項を無視する。一方、次節で述べる水温観測では深さ方向の温度分布を測定することはできず、したがってその分布形については何も議論することはできない。よってここでは水温が一定厚まで一様に分布していると仮定することにする。この場合、基本式は式(4)となる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \dots\dots\dots (4)$$

境界条件、初期条件は次の通りである。

$$x = 0 \quad : \quad T = T_0 \sin \omega t \dots\dots\dots (5)$$

$$x \rightarrow \infty \quad : \quad T \rightarrow 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$T(x, 0) = 0 \dots\dots\dots (7)$$

式(5)~(7)を満足する式(4)の解は、Laplace 変換によって求めることができる。まず式(4)の両辺の Laplace 変換をとって一般解を求め、境界条件を考慮すると、

$$\widetilde{T}(s, x) = \frac{T_0 \omega}{\omega^2 + s^2} \exp(-\sqrt{s} / \sqrt{k} \cdot x) \dots\dots\dots (8)$$

となるから、convolution によって逆変換を行うと、

$$T/T_0 = \frac{x}{2\sqrt{\pi k}} \int_0^t \frac{1}{\tau^{3/2}} \sin \omega(t-\tau) \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4k\tau}\right) d\tau \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。更に $\frac{x^2}{4k\tau} = \zeta^2$ という変換を行うと式(10)となる。

$$T/T_0 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{x}{2\sqrt{k\tau}}}^{\infty} e^{-\zeta^2} \sin \omega\left(t - \frac{x^2}{4k\zeta^2}\right) d\zeta \quad \dots\dots\dots (10)$$

十分大きな t に対しては、式(10)の積分の下限は 0 となる。また、 $x = \sqrt{\frac{4k}{\omega}} x^*$ という変換を行うと、

$$T/T_0 = \int_0^{\infty} e^{-\zeta^2} \sin(\omega t - x^{*2}/\zeta^2) d\zeta \quad \dots\dots\dots (11)$$

図-1は、 $\omega = 7.3 \times 10^{-5}$ (1/sec) , $\Delta\zeta = 0.001$ において数値計算によって求めた式(11)の分布形である。図中の数字(n)は $\omega t = \frac{n\pi}{12}$ における分布形を示す。温度変化は沖方向に次第に減少するが、最高温度に達する時刻については、場所的はずれ、すなわち位相差が生じている。

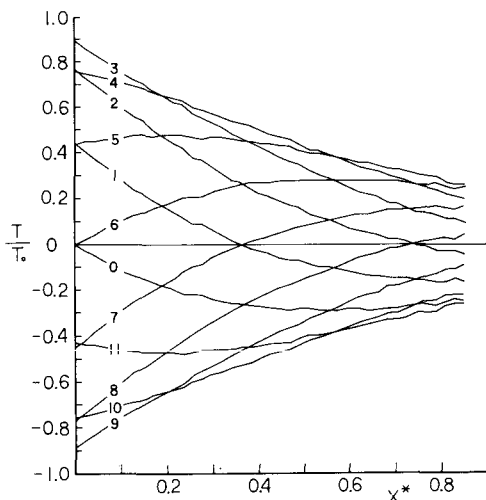


図-1 水温の岸沖分布(理論値)

3. 水温の現地観測 観測は昭和56年10月10, 11日に阿字ヶ浦海岸で行った。測温は約2時間おきに栈橋上よりサーミスタを用いて行った。ただし測定点は栈橋の橋脚近傍の7地点である。図-2はこのうち代表4地点の水温気温の変化を示したものである。水温は日変化が生じているが、日中、陸に近い P_2 は沖合の P_8 よりも温度が高くなっている。このような水温変化は、全体的な変化に変動が重なっているものと考えられる。このため沖合の P_8 地点の水温を基準として変動分を算出した。また、この測定中潮位が83cm変化したため、汀線位置は刻々と変化したが、海浜形状は測定されているので、これを用いて各測点の各時刻における汀線位置を求め、離岸距離(x)を算出した。図-3はこの結果をまとめたものであり、横軸は離岸距離 x , 縦軸は変動温度を示す。また測定値は10日10時より11日の8時までの値が示されている。この結果は、図-1の理論値と比較するとその変化の状態は相当良好に対応していることがわかる。測定値と理論値との対応が得られたので、熱拡散係数を試算してみる。まず測定値では $x=0$ の振幅は約 1.0°C であるが、例えば振幅が 0.3°C となるのは、 $x \div 110\text{m}$ である。一方理論値では $x^* \div 0.85$ で同様な対応関係が得られる。これらのことから k を求めると、 $k = 3.1 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となる。

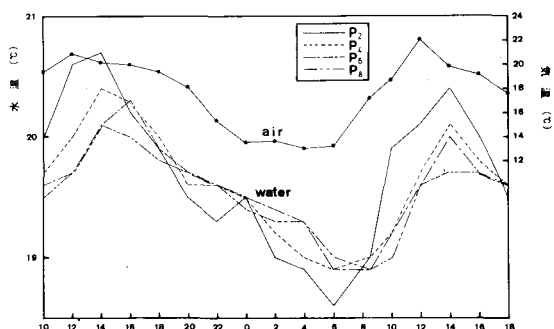


図-2 水温・気温の経時変化(10月10日~11日)

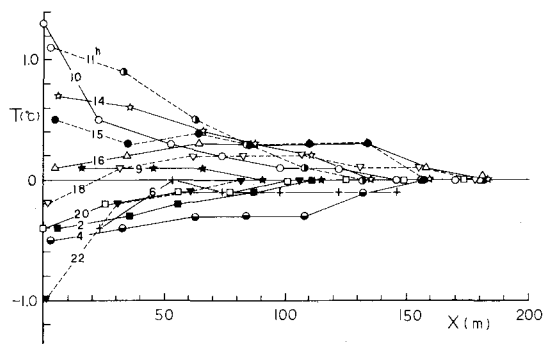


図-3 水温の岸沖分布(実測値)

参考文献

- 1) 橋本 宏・宇多高明・田中邦一：熱映像による碎波帯の熱拡散係数の測定法，第26回海講演文集，pp. 119~123, 1979.