

東京工業大学大学院 学生員 渡辺明英

東京工業大学工学部 正 員 日野幹雄

東京工業大学工学部 正 員 雅岡和夫

1. はじめに

湖沼の近くでは気温が安定化する事が知られている。このような湖沼の存在による気温緩和効果を定量的に評価するためには、有限な水域上での温度境界層の発達過程を知る事が必要となる。しかし、従来の研究では、有限な水域上での温度境界層の発達を具体的に計測した例はほとんどない。そこで本研究では、風洞を用いた室内実験により温度・風速及び湿度の測定を行い、特に境界層の発達を直接支配すると考えられる温度の鉛直拡散係数と水面からのフラックスの特性について検討した結果について述べる。

2. 実験装置及び測定条件

実験は図-1に示す風洞水槽を用いて行い、風速をピトー管、温度をサーミスタ型温度計、湿度を電気伝導度型湿度計により測定した。測定条件としては、風速が流入部で4・5・6・8 (m/s) の4ケースで、温度に関しては、水温が11~13℃、空気が16~19℃である。風速が6 (m/s) 以下の場合には、水面での境界条件を簡単化するために界面活性剤を混入し、風波の発生を抑えた。

3. 実験結果及び考察

a) 風速と温度の鉛直分布特性と鉛直拡散係数について

まず最初に、温度境界層の発達を直接支配する一つの重要な要素である温度の鉛直拡散係数に関して検討した結果について示す。図-2は、流下距離が3 mでの風速及び温度の鉛直分布を無次元表示したものである。これを見ると温度の鉛直分布特性と風速のそれとの間にかなり類似性がある事がわかる。この事から熱量と運動量の鉛直輸送が類似の機構により行われているものと推察できる。そこで、この風速分布特性をより詳しくみるため、分布形を片対数紙上にプロットしたのが図-3である。これより、風速分布形が水面上1.5 cmの高さで折れ曲がる形になる事がわかる。このような分布形の折れ曲がり、通常の滑面平板乱流にも見られるが、その場合の折れ曲がりの原因は境界層内の乱れの構造が、壁に近い内層とその外側の外層とで異なるためとされている。この事から、今回のような壁面が吹送流を伴う水面である場合にもそれと類似の乱れの構造が存在するものと考えられ、従ってここで注目している拡散係数にもこのような乱流構造の鉛直分布特性が反映されてくるものと考えられる。図-4は、実際に実験データから求めた温度の鉛直拡散係数: K_{ET} の鉛直分布特性を示したものである。ただし、 K_{ET} の定義は次式の通りである。

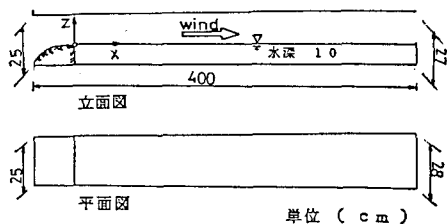


図-1 実験装置

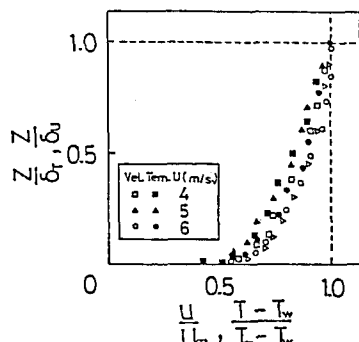


図-2 風速と温度の無次元鉛直分布

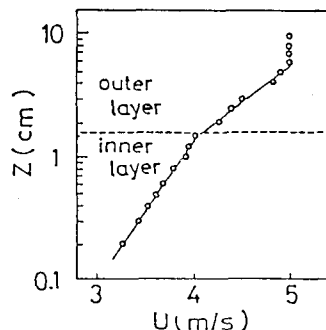


図-3 風速分布形

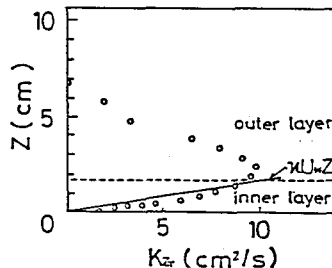


図-4 温度に関する鉛直拡散係数の鉛直分布

$$K_T = \frac{\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\delta} (T U) dz - T_W}{(-\frac{\partial T}{\partial z})} \quad (T: \text{温度} \quad U: X \text{方向の速度} \quad W: Z \text{方向の速度})$$

これより、上述の折れ曲がり点より下部の内層では対数則成立時に用いられる運動量の拡散係数 K_{LZ} とほぼ一致した鉛直分布になるのに対し、折れ曲がり点より上の外層ではこれから離れていり減傾向を示し、境界層外縁において 0 になる事がわかる。

b) 水面での輸送係数について

次に温度境界層の発達に直接関係するもう一つの重要な要素である水面での熱フラックスを輸送係数の形で他の運動量や水分フラックスと共に検討した結果を示す。この場合の輸送係数はそれぞれ次式によって定義されている。

温度フラックス	$T_x = K_h U_{\infty} (T_{\infty} - T_w)$	suffix W: 水面での値 ∞ : 境界層外縁での値 a: 空気の値
水分フラックス	$P_x = K_e U_{\infty} (\rho_w - \rho_{\infty})$	
運動量フラックス	$\tau = C_f \rho / 2 U_{\infty}^2$	

図-5 は実験により求めた運動量輸送係数すなわち摩擦係数 C_f を通常の滑面平板に対する値と共に、横軸に無次元距離 ($U_{\infty} X / \nu$) をとって表したものである。図中の「波なし」とあるのは、界面活性剤により風波の発生を抑えたケースの実験データで、これは全て滑面平板よりも低くなっている事がわかる。これは吹送流の存在による水表面での水粒子の drift 効果によるものであると考えられる。これに対して図中で「波あり」とあるデータは界面活性剤を混入せず風波がある程度発生している状態でのデータであるが、この場合は上述の drift 効果よりも風波による roughness の効果が卓越するため、 C_f の値がかなり大きくなっている。図-6 は熱と水分に関する輸送係数を同様に示した図だが、 C_f と同様に右下がりの傾向を示し、しかも、値そのものは、オーダー的に一致している事がわかる。この事から、熱や水分の鉛直輸送は主として運動量の輸送機構と同様なメカニカルな機構によって生じているものと考えられる。

c) 境界層厚と排除厚について

図-7, 8 はそれぞれ境界層厚 δ と排除厚 δ^* の発達の様子を横軸に無次元流下距離 x とし、縦軸に各厚さを流下距離 x で割った量をとって表したものである。図中の実線は比較のために示した滑面平板に対する値である。これより、実験値は滑面平板よりも大きく、また境界層の発達等も滑面平板よりもゆるやかで、また温度の方が風速よりもその傾向がやや強い事がわかる。

4. おわりに

湖沼の存在による気温緩和効果の定量的評価を目的として、室内実験により温度境界層の発達を鉛直拡散係数と水面でのフラックスの両面から検討した。その結果、温度の輸送が運動量の輸送とほぼ同様なメカニズムで行われている事が明らかになった。

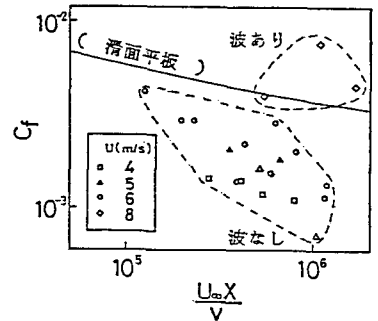


図-5 摩擦係数

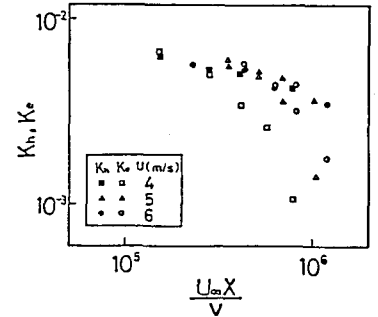


図-6 温度および水分輸送係数

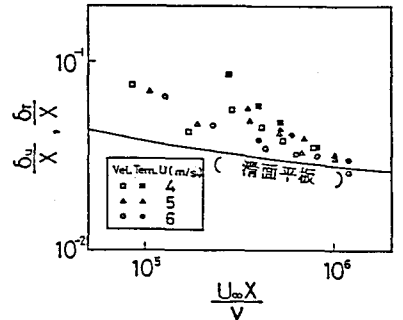


図-7 境界層厚と流下距離の比とレイノルズ数

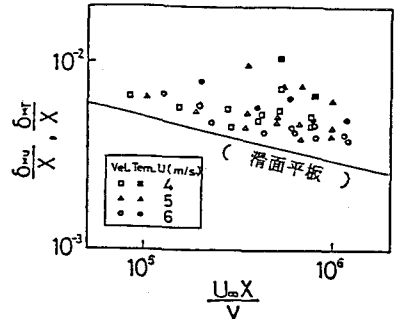


図-8 排除厚と流下距離の比とレイノルズ数