

電力中央研究所 正会員 和田 明
同 正会員 片野 尚明

1. はじめ

鉛直断面内における冷却水放水による流れと熱拡散との相互干渉を考慮に入れた数値実験の結果、および現地観測の結果によれば、放水口付近で冷却水表層流出に伴って下層から湧昇流が起ることを先に報告した(第22回土木学会年次学術講演会、第4回海岸工学講演会)。温水拡散の機構は放水口近傍では下層水からの冷水供給、放水口より沖合数十メートル以上では渦動拡散、および潮汐混合が主役を演じる。従って、温水冷却水の表層流出による海域の水温分布をより精度高く求めるためには放水口近傍での下層冷水供給を考慮にいれなければならない。

今回の報告はこの現象過程を確認するために鉛直断面を対象とした水理実験を行い、冷却水と表層流出方式としたときの流れと水温分布の形成過程を検討し、下層から上層への冷水の加入条件、および加入量を求めたものである。

2. 下層水加入現象

冷却水放出に伴う下層水の表層への加入量は単位時間あたり、境界面の単位面積を横切る下層水の容量として定義する。従って、加入量は境界面での鉛直上方に向う速度に等しい。任意断面での表層厚さは放出状態、およびこの断面まで起った加入量に依存するであろう。放出流速が混合に対する限界速度より大きいとき、冷水が下方から加入し表層の厚さは増大する。放水口よりある距離を經過した所では速度は減少するので加入は減少し、表層厚さの増加割合は小さくなる。さらにある距離を經過した所では密度差と流れの状態に依存するが、表層厚さはほとんど変化なく表層混合層の乱れも消失し、2層間の混合が生じなくなるであろう。

質量欠損、および下層水加入に対する式はつぎのように書ける(Ellison & Turner)。

$$Uh\Delta = A = \text{一定} \quad (1)$$

$$\frac{1}{h} \frac{d}{dx}(Uh) = E \quad (2)$$

こゝに、 $U(x)$ は表層の平均速度、 h はその厚さである。また、

$$Uh = \int_0^h u dz, \quad U^2 h = \int_0^h u^2 dz, \quad A = \int_0^h \frac{(p_2 - p_1)}{\rho_2} g u dz = Uh\Delta,$$

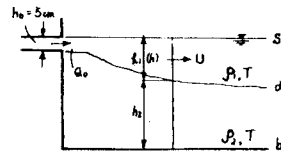


図-1 記号の説明

$u(x, z)$ は x 方向の速度、 ρ_1 、 ρ_2 はそれぞれ表層、下層の密度、

E は加入係数で内部フルード数(Richardson数)の関数で U^2/A と書ける(図-1参照)。

Ellison & Turner は乱流加入についての実験的研究を行い、十分大きい Re 数に対して、下層水加入係数 E は内部フルード数 F_i のみの関数であること、および E は F_i の減少と共に急激に小さくなり、 F_i がおよそ 1.2 以下のとき無視できることを結論している。一方、2成層の密度流現象を考えると、連続式、および熱拡散方程式はつぎのようになる(図-1参照)。

$$\text{表層 ; } \begin{cases} \frac{\partial(s-d)}{\partial t} + \frac{\partial M_i}{\partial x_i} = E \cdot |u| & (3) \\ \frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = K_h \nabla^2 T + \frac{Q_0}{c_p h_i} - \frac{E \cdot |u|}{h_i} (T - T_b) & (4) \end{cases}$$

$$\text{下層 ; } \frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial M_i}{\partial x_i} = -E \cdot |u| \quad (5)$$

$\rho > \kappa$, M_i は質量成分, u は合成速度, T は水温, K_h は拡散係数, Q_0 は熱収支項。

下層水加入を考慮した2層モデル方程式によって水温と流れの場を解くには Ellison 等の結論だけでは十分でない。すなわち, 下層水加入条件も必要になってくる。筆者等の意図した実験目的もそこにある。

3. 実験装置, および方法

図-2 は実験装置の概略を示す。実験装置は入別して, ボイラーと温水水槽から成る温水供給部分, 温水を実験水槽へ導くポンプとベンチュリー管, および放水路からなる放水路部分, 温排水を受ける鉛直二次元水槽, および温水の帰還部分で構成される。

温水供給部分は最大 50°C , 3 l/s を供給する能力を持ち, 放水口出口の水温変動は約 $\pm 0.25^\circ\text{C}$ である。実験水槽の長さは 25 m で, 反射の軽減, および実験時間を長くとることができるよう考慮されている。また, 水槽は透明観測の便宜のための片側透明アクリル板とした。流速の測定は表層の温水流に対しては電界型小型流速計を用いてカウンターに表示させ, 下層の遅い冷水の動きに対しては染料をトレーサとして使い, この動きを連続

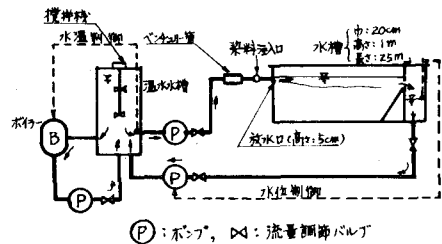


図-2 模型装置概略図

写真撮影することから求めた。また, 水温の測定はサーミスタ型多点水温計 (20 点) を用いた。なお, 実験装置には目視観測の便宜, および下層水加入量を濃度法によって求めるための温水を着色させる染料注入装置が設けられている。

4. 実験結果と考察

水理実験は図-2 に示すように表層放水方式であり, 放水流量は $0.5 \sim 2.5 \text{ l/sec}$, 放出水温は温排水を受ける水槽内の水温よりも約 10°C 高くし, 放出口における実験条件範囲での Reynolds 数は $3 \sim 15 (\times 10^3)$, 内部フルード数 $1.3 \sim 1.5$ である。放出口で温水が十分に均等な流速分布になるよう放水路に整流格子 2 個が取り付けられている。

図-3, および図-4 は実験結果であって, それぞれ放水口断面から下流における表層流速, および表層水深の変化を示したものである。このように表層流速とは表層での平均値であり, また表層水深は流速分布と水温分布から求められるが, この両者の値に差があり, このうち流速分布の不連続部分までの深さをとっている。また, 水槽中 (20 cm) 方向における流速の平面分布形状は, 流速が小さい時にはほぼ放物線形状を呈し, 流量が増すに従って扁平化する。図-3 から明かなように, 流速の変化割合は表層水深のそれと比べて大きく, 実験流量の範囲に対して $x/h_0 > 30$ (h_0 は放水口高さ)

くなれば小さくなっている。また、Richardson数を算定する際必要となる水温の値は表層での鉛直方向に平均した値を用いている。図-5は放水口断面より下流域における下層水加入係数 E を示したものである。図から流速と表層水深の変化割合から予想されるように加入係数は放水口から距離を経るに従って急激に減っていくことがわかる。

図-6は下層水加入量とRichardson数との関係を示している。同図には Ellison & Turner の実験結果が付記されているが、我々の実験値とはほぼ同じ傾向にある。しかし、 Ri 数と下層水加入係数 E との間には一義的な関係のみが存在するとは思われない。すなわち、下層水加入量は同じRichardson数の値に対して、表層水深、つまり内部境界面の勾配の大きさによって異なることが予想される。図-7はこれを要因して整理された結果である。下層水加入係数 E は内部境界面の勾配の増大、Richardson数の減少に伴って増大することがわかる。 E は同一の dh/dx の値に対して Ri 数の値によって変化する。このことは E の定義から当然の帰結であるが、下層水加入条件の判定という観点からみれば意味がある。

以上、流れの連続条件から問題を論じてきたが、他の方法として熱量保存の面から検討が考えられる。

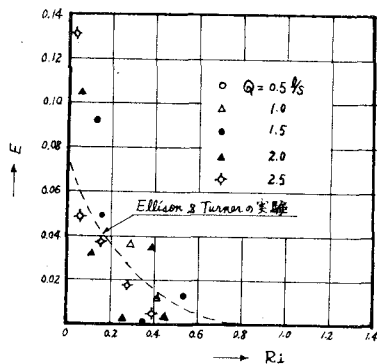


図-6 E と Ri の関係

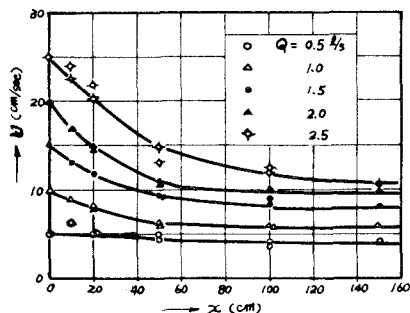


図-3 放水口下流における流速の変化

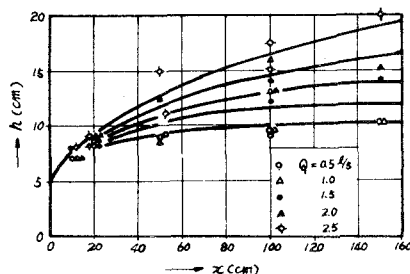


図-4 放水口下流における表層水深の変化

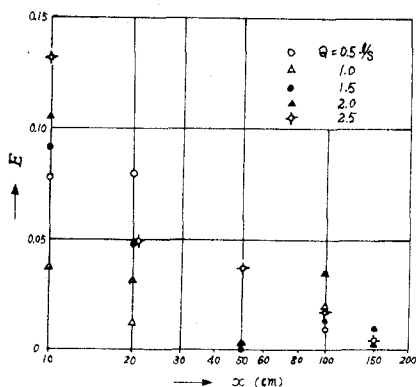


図-5 放水口下流における E の変化

それは式(4)より、拡散項、熱収支項を小さいとして無視すればつぎのようになる。

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{E |u|}{h_i} (T - T_b) \quad (6)$$

この関係式から下層水加入量を論じるものである。
この方法による結果については講演の際報告する。

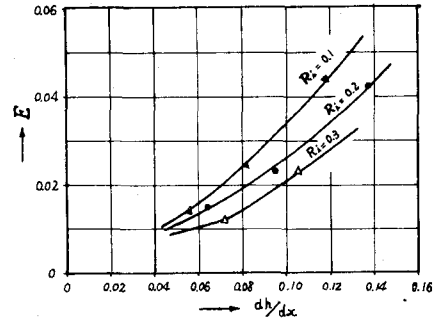


図-7 Riをパラメータにとった
dh/dxとEの関係

〔参考文献〕

- 1)、第22回土木学会年次学術講演会講演概要
- 2)、第14回海岸工学講演会講演集
- 3)、"Turbulent Entrainment in Stratified Flow", by T. H. Ellison and J. S. Turner,
Journal of Fluid Mechanics, Vol. 6, Part 3, Oct., 1959.