

II-255

風により誘起される閉鎖成層水域での底層水の連行・湧昇特性

神戸大学大学院 学生員 宮本仁志
 神戸大学大学院 学生員 不二秀人
 神戸大学工学部 正 員 道奥康治
 神戸市立高専 正 員 辻本剛三

1. はじめに: 図-1に示すように密度成層化した二次元閉鎖水域における吹送流場の乱流特性・連行則・底層水の湧昇限界を $k-\epsilon$ 乱流モデルによって解析する. 水面には一定の風応力 τ_s が作用する. 水面はRigid-lidとし, その他の境界は固定である.

2. 諸量の規準化: 水深 h , 水表面での摩擦速度 $u_*=\sqrt{\tau_s/\rho}$, 上層水の水温 T_u , 下層水の水温 T_l を代表スケールとして, 諸量を以下のように規準化する. [時間] $\tilde{t}=t/(h/u_*)$, [座標] $\tilde{x}_i=x_i/h$, [流速]

$(\tilde{U}_i, \tilde{u}_i)=(U_i, u_i)/u_*$. (U_i および u_i は各々流速の平均量および変動量), [乱流エネルギー] $\tilde{k}=k/u_*^2$, [乱流エネルギー逸散率] $\tilde{\epsilon}=\epsilon \cdot h/u_*^3$, [温度] $(\tilde{T}, \tilde{\theta})=(T, \theta)/(T_u-T_l)$ (T および θ は各々温度の平均量および変動量). 支配方程式ならびに境界条件の規準化により四つの無次元支配パラメーター, (1)レイノルズ数: $Re_*=u_* h/\nu_0$ (ν_0 : 動粘性係数), (2)リチャードソン数: $Ri_*=\beta g(T_u-T_l)h/u_*^2$ (β : 体積膨張率), (3)水域のアスペクト比: L/h , (4)初期における上層厚と全水深の比 η , が導出される. 以上の諸式において, “ $\sim$ ”を冠した量が無次元量である.

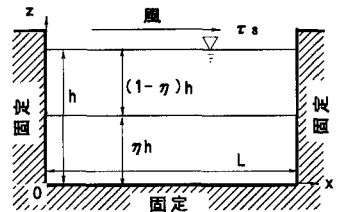


図-1 密度場の概略図

3. 乱流量の評価: 無次元時間 $\tilde{t}=9.90, 19.8$ での, $Ri_*=0.05, 900$ の場合の乱流エネルギー $\tilde{k}$ の各項の水路中央($\tilde{x}=15$)における鉛直分布を図-2, 3に示す. $Ri_*=0.05$ の場合は密度成層が弱く, 鉛直混合と底層からの湧昇が活発で, 図-2に見られるように時間とともに乱流域が下方へ広がる. また, 生成項と逸散項が最も卓越し, 両者はほぼつり合っている. $Ri_*=900$ においては(図-3)安定な密度成層が維持され, $Ri_*=0.05$ の場合に比べ浮力項が卓越し乱れを抑制している. いずれの場合にも密度境界面では, 浮力項は負の値をとり, 連行によって乱れエネルギーが消費されている.

4. 湧昇限界: 底層水の風成湧昇の限界条件について検討する. 鉛直混合がほとんどない定常二層流においては, 次式が満足される時, 底層水が表層へ湧昇する(和田(1965)(1966))¹⁾.

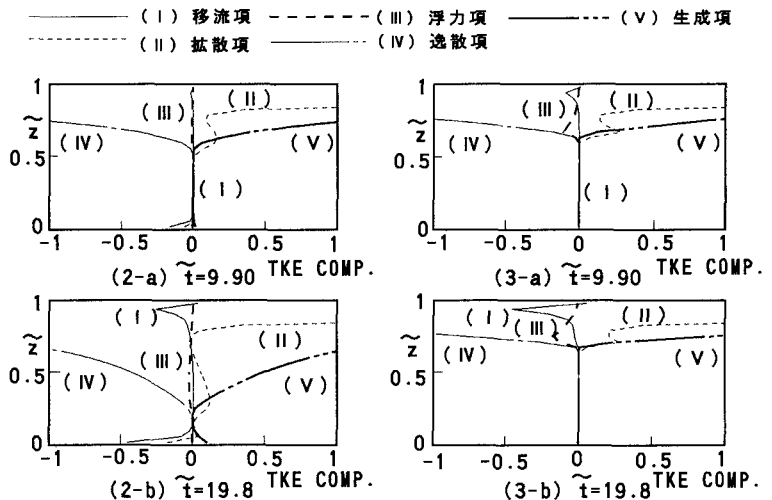


図-2 水路中央における乱流エネルギーの各項の鉛直分布: $Ri_*=0.5$

図-3 水路中央における乱流エネルギーの各項の鉛直分布: $Ri_*=900.0$

$$W = Ri_* \cdot (h/L) \leq (1-\eta)/2$$

(ここで, W : Wedderburn number)

しかし, 吹送密度流は鉛直混合をともないながら密度場が変遷する非定常過程であり, 一般には上式で湧昇限界を議論することはできない。

ここで対象とする非定常吹送流の湧昇限界を定量的にあらわすために, ある温度(または密度) $\tilde{T}$ ($0 \leq \tilde{T} \leq 1$)の底層水(ここで $\tilde{T}=0, \tilde{T}=1$ は各々初期における下層・上層の温度に対応する)が水表面に到達する(湧昇する)無次元時間 $\tilde{t}_{wc}$ を定義する。

次元解析的には, $\tilde{t}_{wc}$ はアスペクト比 L/h とリチャードソン数 Ri_* の各々に依存すると考えられるが, ここでは, $\tilde{t}_{wc}$ をWedderburn数 W のみの関数とあらわす。水理条件 $Re=1,300, Ri_* = 0.1 \sim 300, L/h=30.0 \sim 300.0, \eta=0.5$ のもとで数値計算を行い, 様々な温度(密度) $\tilde{T}$ の水が水表面へ湧昇する時間 $\tilde{t}_{wc}$ とWedderburn数 W の関係を図-4にあらわす。同図の $\tilde{t}_{wc}$ の値は複数のケースの $\tilde{t}_{wc}$ を平均値して求めており, W とともに複雑な増加挙動を示すが, 全体的にはいずれの温度に対しても W の増加とともに $\tilde{t}_{wc}$ が増加する傾向にある一すなわち, W が大きいくほど底層水が湧昇しにくくなることをあらわしている。より多様な水理条件のもとで解析を行い, 湧昇時間 $\tilde{t}_{wc}$ のWedderburn数への依存性のみならず, L/h や Ri_* との関数関係を明らかにする必要がある。

5. 連行量の評価: 一般に, 密度成層場における連行現象は, 密度境界面でのせん断不安定による「せん断型の連行」と, 密度界面以外のせん断層で生成された乱れが密度界面まで対流・拡散輸送されて誘起される「対流・拡散型の連行」に大分される。ここで対象とする吹送密度流の連行形態は後者に相当する。水理条件, $Re=1,300, Ri_* = 0.5 \sim 1500, L/h=30.0, \eta=0.5$ のもとで計算を行い, 連行係数 E_* とリチャードソン数 Ri_* を次のように求める。

$$E_* = W_e / u_*$$

$$Ri_* = \tau g h_m / u_*^2$$

上層厚さ h_m は区間 $x=0 \sim L$ での平均値をとり, 相対密度差 τ は上層と下層の体積平均値より求める。連行速度 W_e は上層体積 V_1 の時間変化率と密度界面の水平長より,

$$W_e = (dV_1/dt)/L$$

と定義する。 E_* と Ri_* の関係を他の実験値とともに図-5に示す。 $k-\varepsilon$ モデルには密度成層効果による乱流構造の非等方性が考慮されていないが, 本解析により得られた連行則は実験結果と比較的良好に一致している。ただし, ここで算定される連行速度 W_e には界面連行量に加えて下層からの湧昇量も含んでいる可能性がある。

今後, 連行量と湧昇量の定義をより明確にし, 各々を別個に評価する必要がある。

<参考文献>

1) 和田明: 水面躍層面におよぼす風の影響, 第12回海岸工学講演会講演集, pp. 137-142(1965).

水面躍層面におよぼす風の影響, 電力中央研究所技術研究所報告, No. 65084, pp. 1-28(1966).

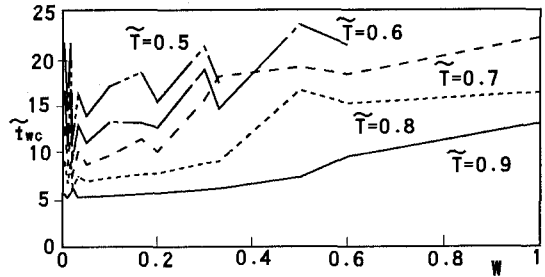


図-4 W と湧昇時間 $\tilde{t}_{wc}$ の関係

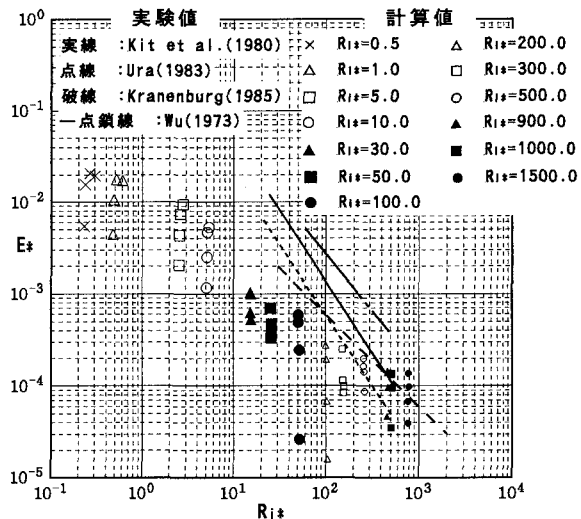


図-5 連行係数 E_* とリチャードソン数 Ri_* の関係