

半閉鎖水域における風成密度流の水質交換特性

*Water Exchange Characteristics of Wind-Driven Density
Current System in Semi-Enclosed Stratified Basins*

道奥康治*・辻本剛三**・宮本仁志***

*By Kohji MICHIOKU, Gouzou TSUJIMOTO
and Hitoshi MIYAMOTO*

In order to examine mixing and turbulent mass transport processes in a wind-driven density current, a turbulence model analysis is performed. The system considered here is a 2-D semi-enclosed stratified basin whose downwind boundary is opened to an ocean; this flow system is analogous to the wind-generated currents in a small inlet, a bay, etc.. Focus is placed on water mass exchange rate across the open boundary, which is found to have a strong functional dependency on the so-called "overall Richardson number". The present analysis give us useful information on what sort of hydrodynamic conditions could generate upwelling of polluted bottom layer fluid and water quality exchange between the basin and the external water area.

Keyword: wind-driven density currents, turbulence, mixing, stratified bays, water exchange, etc..

1. はしがき

内湾のように交換率が低い水域においては、底層水の滞留・富栄養化、底泥浮上、風成湧昇など、様々な水質問題が生ずる。こうした水域では風応力が水質輸送の主たる駆動力となり、同時に密度成層の浮力効果が水質の鉛直拡散を抑制する。本研究では、閉鎖性湾域の水理特性を最も特徴づける風応力と密度成層に焦点をおいて、風成循環流、外域との水質交換、鉛直混合などの水理諸特性を $k-\epsilon$ 乱流モデルにより明らかにする。

2. 解析モデルと無次元化

小湾のように開放部を有する水域を想定して、ここでは図-1のような二次元二層系を考える。開放された右側境界が外洋に接続し、左側の固定境界は湾奥に相当すると考えている。一定の風応力 τ_* が湾奥から湾口の方向に作用して風上側の底層貧酸素水塊が表層へ湧昇するという水質環境的に危険側の状況を考える。

初期状態として、上下層厚さが (h_1, h_2) 、上下層浮力（水温換算値）が (T_0, T_1) の二層系を考える。水面境界には Rigid-lid を仮定して風のせん断力が水体側の応力と連続する条件を与える。先の解析¹⁾と同様

*	正会員	工博	神戸大学助教授	工学部建設学科	(〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)
**	正会員	工博	神戸市立工業高専助教授	都市工学科	(〒651-21 神戸市西区学園東町8-3)
***	正会員	工修	神戸市土木局		(研究当時神戸大学大学院在学)

にして、水面を介しての運動量・乱れエネルギーの供給が合理的に記述できるように $k-\varepsilon$ モデルを修正している。固定境界では non-slip で、流速・質量フラックスの直交成分が0 と考える。風下端の開放境界では、流速・密度フラックスに関して「吹き抜け条件」を適用し、体積・質量が外海と交換される。ここで対象とする水域は無限に広がる外域と接しているとして、この断面における密度分布は二層系と初期値を保つと考える。

密度境界面での初期浮力（温度）差 ΔT_0 と全水深 $h=h_1+h_2$ を用いて、物理量が次のように無次元化される。

$$(\tilde{x}, \tilde{z}) = (x, z)/h, \quad \tilde{t} = u_* t/h, \quad (\tilde{U}, \tilde{W})/u_*,$$

$$(\tilde{k}, \tilde{\varepsilon}) = (k/u_*^2, \varepsilon h/u_*^3), \quad \tilde{T} = T/\Delta T_0,$$

$$\tilde{u}_j \tilde{\theta} = u_j \theta / (u_* \Delta T_0)$$

ここで、 $u_* = \sqrt{\tau_* / \rho_0}$: 摩擦速度, (x, z) : 水平・鉛直方向座標, t : 時間, (U, W) : 平均流速の水平・鉛直成分, (k, ε) : 乱れエネルギーとその散逸率,

T : 水温換算された流体密度, $\tilde{u}_j \tilde{\theta}$: 密度（温度）乱流フラックス成分, である。

モデル方程式、初期・境界条件などに上記の無次元化を適用すれば、以下のような無次元パラメーターが見いだされる。

- (a) $R_{i*} = \varepsilon_0 h / u_*^2$: overall Richardson number, (b) h/L : aspect ratio, (c) $R_* = u_* h / \nu$: Reynolds number, (d) $P_r = \nu / \kappa_T$: Prandtl number, (e) $\sigma_t = 1.0$: turbulent Prandtl number.

これらの無次元量のうち、 P_r と σ_t は物性定数である。また、 R_* が十分大きい場合を考えれば結局、現象を支配するパラメーターは R_{i*} と h/L の二つとなる。

3. 連行量

吹送密度流場における水質混合過程が乱流モデルにより再現できることを確認するために、風下境界が閉塞された完全閉鎖型吹送密度流を対象として鉛直混合量を求め、既往の水理実験値との比較を行った。その結果を図-2に示す。横軸は時々刻々の overall Richardson number $R_{i*}' = \varepsilon g h / u_*^2$ を、縦軸は u_* で無次元化された連行係数 $E_* = W / u_*$ を、それぞれあらわす。例えば実スケールにして躍層面での水温差 $\Delta T_0 = 5.0^\circ\text{C}$ 、水深 $h = 10\text{m}$ 程度の水域を想定すれば、 $R_{i*}' = 10 \sim 10^4$ は摩擦速度にしておよそ $u_* = 0.003 \sim 0.1\text{m/sec}$ の範囲に相当する。乱流モデルによる解析結果は同図中に各記号であらわされている。比較対象とした各実験値²⁾⁻⁵⁾は曲線群によって表されている。本解析では、連行速度 W は上層体積の時間変化率より算定されている。解析から得られる連行量は全般に実験値より小さく、密度成層域の混合現象への $k-\varepsilon$ モデルの適用限界が認識される。しかし、定性的には R_{i*}' の増加にともない E_* が減少する傾向は概ねモデルによって再現されているので、以上のようなモデルの現象再現性の限界を認識した上で以降の議論をすすめる。

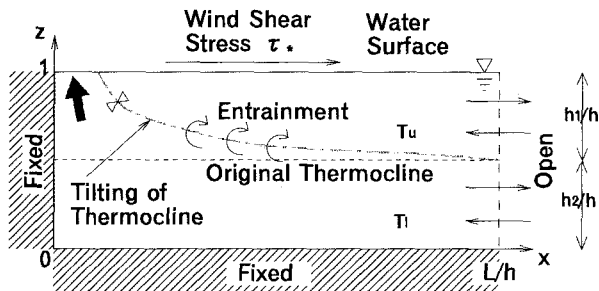


図-1 対象とする風成密度流場

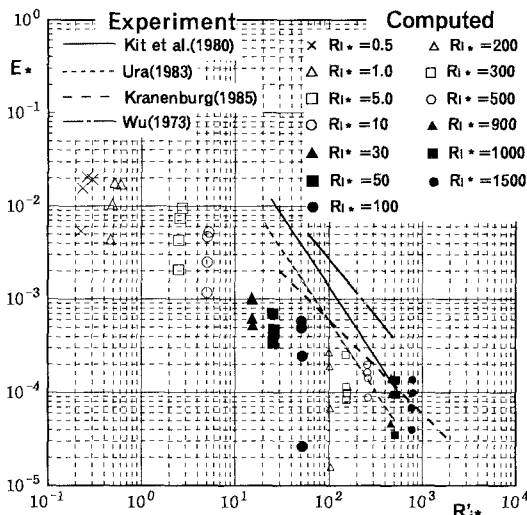


図-2 連行係数 E_* と Richardson number R_{i*}'

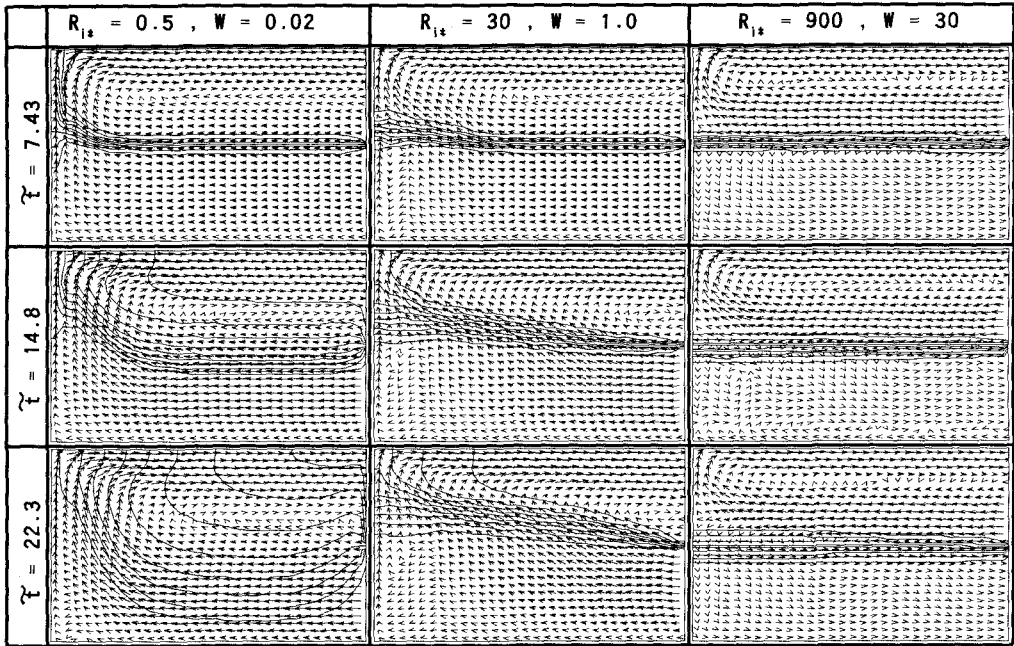


図-3 流速場・密度場の経時変化の例 ($R_{1*}=0.5, 30, 900$ の場合, $W=R_{1*}(h/L)$ はWedderburn number)

4. 流動と混合の概況

図-1に模式的に示すように、半閉鎖水域の風成密度流で着目すべき重要な現象は、(1) 風上側での底層水の湧昇、(2) 躍層面のセットアップ、(3) 躍層面での界面連行、(4) 風下境界（外域との接続部）での湾域と外海との水質交換、などである。これらの現象が本解析によって再現されていることを確認するために水域形状比が $h/L=1/30$ の場合について、流速・密度場の時間発展の様子を図-3に例示する。矢印群が流速ベクトルを、曲線群が等密度線を、それぞれあらわす。同図左列より順に、 $R_{1*}=0.5, 30, 900$ の場合について、風成循環流の時間変化を無次元時間 $\tilde{t}=7.43, 14.8, 22.3$ の場合について示した。 $W=R_{1*}(h/L)$ は底層の湧昇現象を規定するパラメーターである Wedderburn number である。

外域との接点である風下側境界においては密度躍層が一定の位置にあり、外海との水質交換が生じている。 $R_{1*}=0.5$ の場合、密度成層の力学的安定度が小さいため強い鉛直混合が生じ、風上側では下層水が表層へ湧昇している。連行された下層水を補償するために、風下開放境界から多量の高密度水塊が流入している。 $R_{1*}=30$ の場合は、 $R_{1*}=0.5$ に比べて成層強度が強く鉛直混合は抑制されている。成層強度が非常に大きな $R_{1*}=900$ の場合には、初期の二層状態がほぼ保たれている。この場合の流動現象は密度界面を境に上層・下層で明らかに異なっている。上層内の上部では強い順流方向の吹送流が、上層内下部では逆流が各々発達している。密度躍層面の浮力安定効果によって上層の流動はあまり下層まで伝達されないの下層内では微小な流動のみが見られるにすぎず、開放境界からの交換流もほとんど存在していない。

図-3の結果をより定量的に記述するために、水域中央断面 $\tilde{x}=0.5(L/h)$ 、風上端 $\tilde{x}=0$ 、風下端 $\tilde{x}=L/h$ における流速分布 $\tilde{U}(\tilde{z})$ と密度分布 $\tilde{T}(\tilde{z})$ の時間変化を図-4, 5, 6に示す。ここでは、[密度成層強度] / [風応力] が流速・密度分布に及ぼす影響を見るために $R_{1*}=0.5, 900$ の場合の結果が比較されている。これらの図より、運動量・質量輸送におよぼす密度成層効果を見てとることができる。

5. 密度躍層面の挙動

成層湾域の下層水は貧酸素化・富栄養化しているので、湾奥において下層水が水面まで湧昇すると悪臭発生や沿岸域養殖漁場の被害などが生ずる。したがって、如何なる自然条件下で底層水が湧昇するのかを把握することは水域環境保全や水産工學上重要である。

図-7は、風上側境界部 $\tilde{x}=0$ における躍層面の高さの時間変化を様々な R_{i*} に対して示している。ここで、密度躍層面は $\tilde{T}=0.5$ ，すなわち上下層の初期中間密度に相当する等密度線

として定義されている。なお、躍層面のセットアップ挙動は内部セイシュの固有振動周期

$$T_i = 2L / \sqrt{g h_1 h_2 / (h_1 + h_2)}$$

と密接に関連しているので、新たに T_i を用いて定義された無次元時間

$$\tilde{t} = 4t / T_i = \tilde{t} \cdot R_{i*}^{1/2} (h/L)$$

を時間座標にとっている。

R_{i*} が小さいほど、躍層面上昇速度が大きく風成湧昇が発生しやすいことがわかる。このような方法により、風成湧昇の発生条件を予測評価することができる。

6. 水質交換特性

停滞水域では外域との水質交換量を把握することが水質環境的に重要である。

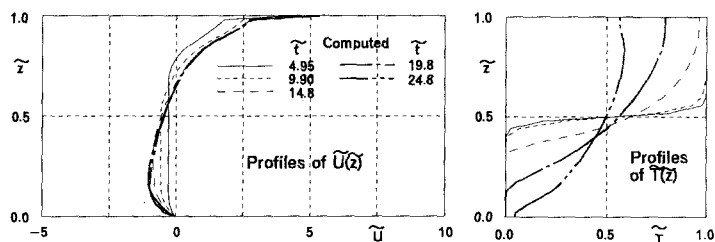
本節では、外域と接続する風下の開放境界における交換流量、交換水質フラックスに関して考察する。

風下境界端では、無限に広い外域に接続し二層系が維持されると考えている。上下層の交換流量 $(\tilde{Q}_u, \tilde{Q}_l)$ は以下のように定義される。

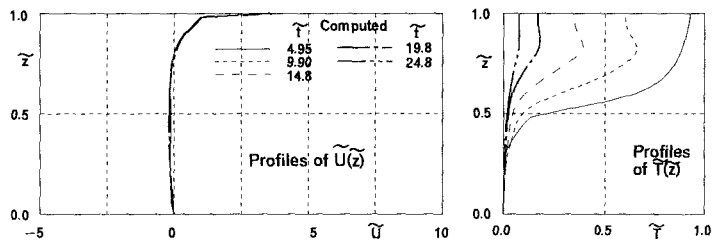
$$\tilde{Q}_u = \int_{A/2h}^1 \tilde{U}(\tilde{z}) d\tilde{z}, \quad \tilde{Q}_l = \int_0^{A/2h} \tilde{U}(\tilde{z}) d\tilde{z} \quad (1)$$

ここで、 $(\tilde{Q}_u, \tilde{Q}_l)$ が正の場合は閉鎖水域から外域への体積輸送に、負の場合はその逆に、それぞれ対応している。

図-8は、上下層の交換流量の時系列をあらわす。交換流にも水域の慣性振動が反映されていると考えられ

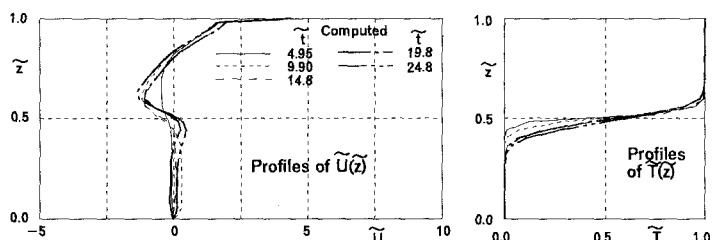


(a) $R_{i*}=0.5$ の場合

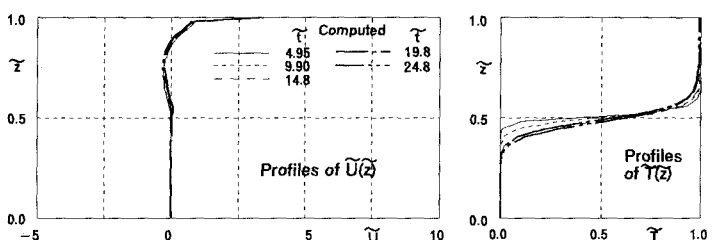


(b) $R_{i*}=900$ の場合

図-4 中央断面 $\tilde{x}=0.5(L/h)$ における $\tilde{U}(\tilde{z})$, $\tilde{T}(\tilde{z})$ の経時変化



(a) $R_{i*}=0.5$ の場合



(b) $R_{i*}=900$ の場合

図-5 風上側断面 $\tilde{x}=0$ における $\tilde{U}(\tilde{z})$, $\tilde{T}(\tilde{z})$ の経時変化

るので、横軸の時間には5. と同様
に $\hat{t}$ を採用している。

図-3などの流速ベクトルの経時変化からでは読みとることができなかったが、水塊の流出入量は内部慣性周期の1.5~2倍程度の周期で振動していることが図-8よりわかる。また、振動周期は R_{i*} とはほぼ独立である。

これより、躍層の慣性振動は風下境界での水質交換を促進する大きな要因であることが推察される。すなわち、躍層面の基本モード振動によって水域水の吐き出しと外域水の吸込みが交互に生じているものと考えられる。なお、 $\hat{t}0$ において上層

の交換流量 $\tilde{Q}_0$ はある正の有限値を

とっているのに対し、下層の値 $\tilde{Q}_1$ は0である。これは、風応力が作用し始めるとともに上層水はただちに吐き出されるのに対し、風応力の影響が下層まで及ぶにはある程度の時間を要して、ただちに下層水の交換が始まらないためであると考えられる。図-8の流量時系列に見られる周期が慣性周期より長いのは、鉛直混合により上下層の浮力差が減少し、初期浮力差 $\epsilon_0 g$ に対応する固有振動より運動が緩慢になっているためと考えられる。水質交換におよぼす浮力効果に着目すると、

R_{i*} が小さい—すなわち成層強度が小さい

場合には、大きな混合・連行が生じこれを補償するために上下層とも交換流量が大きくなる。 R_{i*} の増加とともに界面での混合は抑制され、 $(\tilde{Q}_u, \tilde{Q}_l)$ はともに減少している。

次に、水質交換量をあらわす指標として、次式のような風下境界の上下層における全水平浮力フラックス $(\tilde{F}_{Bu}, \tilde{F}_{Bl})$ を考える。

$$\tilde{F}_{Bu} = \int_{\Delta z_h}^1 \tilde{u} \tilde{\theta} dz, \quad \tilde{F}_{Bl} = \int_0^{\Delta z_h} \tilde{u} \tilde{\theta} dz \quad (2)$$

本解析より得られた $(\tilde{F}_{Bu}, \tilde{F}_{Bl})$ の時系列を図-9に示す。この場合、横軸の無次元時間として図-9のように $\hat{t}$ ではなく、 $\tilde{t} = u_* t/h$ を再び採用している。 $\hat{t}$ の代わりに $\tilde{t}$ を用いることによって条件の異なる各ケースがほぼ同位相の時間変化を呈するようになる。時間とともに水質混合は促進され、上下層の浮力フラックスが増加する。なお、交換流量の場合のような振動的挙動は見られない。無次元時間 $\tilde{t}=15$ 以降は $(\tilde{F}_{Bu}, \tilde{F}_{Bl})$ がともにほぼ一定値に漸近している。 R_{i*} が小さいほど流動・混合が激しいため、浮力フラックスはより大きな値をとる。いずれのケースについても上層から系外へ流出する浮力フラックス $\tilde{F}_{Bu}$ は外域

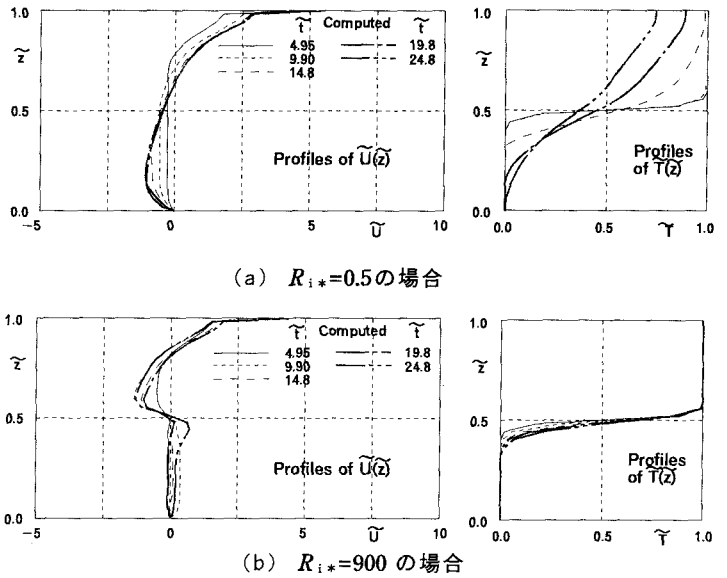


図-6 風下側断面 $\tilde{x}=L/h$ における $\tilde{U}(\tilde{z})$, $\tilde{T}(\tilde{z})$ の経時変化

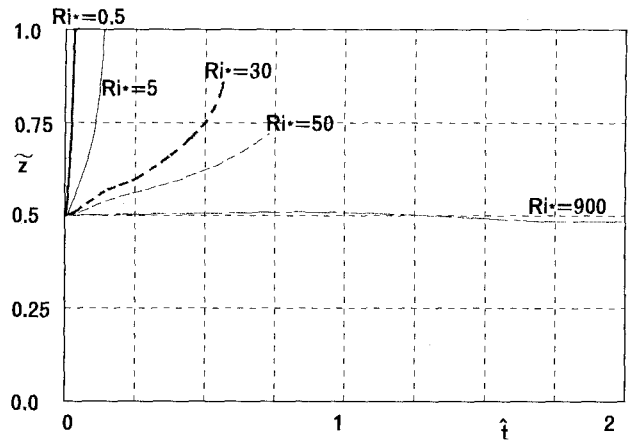


図-7 風上側躍層界面位置の経時変化

から下層へ補給される浮力フラックス $\tilde{F}_{B1}$ より常に大きい
 一すなわち、系全体の総浮力は時間とともに減少している。

7. まとめ

開口部を有する成層化した小湾に風応力が作用した場合の流動・混合現象、外海域との水質交換過程などに関して、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用い、基礎的検討を行った。その結果、風成循環流の特性は密度成層度と風応力の強さの比をあらわすパラメーター R_{i*} に大きく影響されることが明らかになった。主要な結論は以下のである。

- 1) R_{i*} の増加とともに鉛直混合は抑制されるとともに、風成循環流は全水深スケールのもから次第に上層内に閉じこめられた循環流へと変化する。これとともに、下層水の流動は停滞する。
- 2) R_{i*} が小さいほど、湾奥境界における躍層面上昇速度が大きくなる。このような検討より下層水の湧昇限界を議論することができる。
- 3) 湾口部における外域との交換流量 ($\tilde{Q}_u$, $\tilde{Q}_l$) の経時変化は周期的に振動する。その振動周期は R_{i*} に対し独立であり、内部慣性周期よりやや大きな値をとる。また、 R_{i*} が小さいほど交換流量は大きくなる。
- 4) 湾口部における交換浮力フラックス ($\tilde{F}_{Bu}$, $\tilde{F}_{Bl}$) は時間とともに単調増加し、交換流量に見られるような振動的挙動は認められない。 R_{i*} が小さいほど交換浮力フラックスは大きい。

本研究は平成6年度文部省科学研究費一般研究(C) (代表：道奥康治) の援助のもとに行われた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 道奥・辻本・宮本：吹送密度流の流動・混合特性，水工学論文集，第37巻，pp.293-298，1993年。
- 2) Wu,J.：Wind-induced turbulent entrainment across a stable density interface, *J.Fluid Mech.*, Vol.61, pp.276-287, 1973.
- 3) Kranenburg,C.：Mixed-layer deepening in lakes after wind setup, *J.Hydraulic Engin., Proc.ASCE*, Vol.111, No.9, pp.1279-1297, 1985.
- 4) Kit,E., Berent,E. and Vajda,M.：Vertical mixing induced by wind and a rotating screen in a stratified fluid in a channel, *J.Hydraulic Res., Proc.ASCE*, Vol.18, pp.35-58, 1980.
- 5) 浦：風の剪断力による密度界面の変動と連行速度，第30回海岸工学講演会論文集，pp.561-565，1983年。

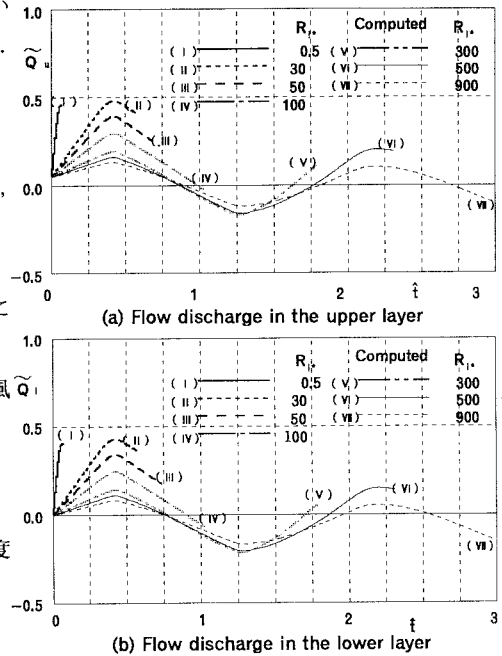


図-8 風下端境界における交換流量 ($\tilde{Q}_u$, $\tilde{Q}_l$)

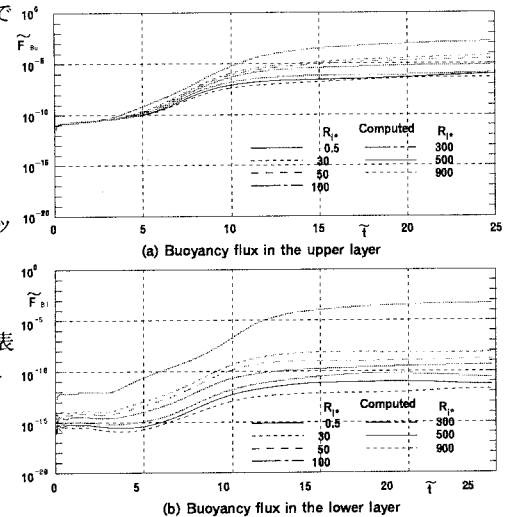


図-9 風下端境界における交換浮力フラックス