

大阪大学工学部 正 員 〇道興 康治
大阪大学工学部 正 員 室田 明

1. 序説; 熱塩成層での鉛直混合現象において安定限界条件は基本的な問題でありながらまだ検討を要する課題が残されている。特に密度差を構成する二成分がともに任意の分布形状を有するような一般的な成層場での安定限界条件および対流範囲の合理的な推定は今だ明らかにされていない。本研究では以上の二点を解決するため安定解析と熱塩成層場での実験を行ない検討を加えた。

2. 安定限界条件; 図-1に示すような $T_0(z)$, $S_0(z)$ なる任意形状の分布を有する二重成層場で d なる範囲の安定限界条件を求めた ($T_0(z)$, $S_0(z)$ は今の場合, 温度・塩分濃度分布と考えてもよい)。線型化された運動方程式・連続式・状態方程式・拡散方程式を基礎式とし Galerkin 法による安定解析を行えば微小擾乱の複素固有振動数 σ に関する固有方程式を得る。ここに $\sigma = \sigma_r + i\sigma_i$ であり σ_r は擾乱の時間増幅率, σ_i は角振動数である。次に中立安定条件として $\sigma_r = 0$ とおく。さらに σ_i の値によって二種類の擾乱に対する限界条件が得られる。1つは $\sigma_i = 0$ の非振動的な不安定 (direct mode の不安定) であり, 他の1つは $\sigma_i \neq 0$ の振動的な不安定 (oscillatory mode の不安定) である。前者は熱成層や finger régime の二重拡散場 ($dT_0/dz > 0$, $dS_0/dz > 0$) で主に生ずる不安定である。後者は diffusive régime の二重拡散場 ($dT_0/dz < 0$, $dS_0/dz < 0$) で生ずる不安定モードである。図-1の d の範囲の上・下端が力学的に自由である場合これら二種類の不安定擾乱に対する限界条件は次式のように得られる。

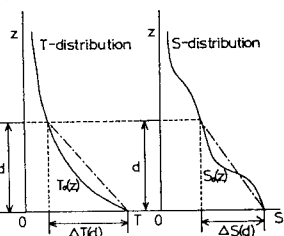


図-1 T-S-分布形

$$R_{TC} = \frac{\langle \sin^2 \pi z \, g(z) \rangle}{\langle \sin^2 \pi z \, f(z) \rangle} \frac{R_s}{\tau} + \frac{27\pi^4}{8 \langle \sin^2 \pi z \, f(z) \rangle} \quad (\text{direct mode}) \quad (1)$$

$$R_{TC} = \frac{1 + \tau/P_r}{1 + 1/P_r} \frac{\langle \sin^2 \pi z \, g(z) \rangle}{\langle \sin^2 \pi z \, f(z) \rangle} R_s + \frac{(P_r + \tau)(\tau + 1)}{P_r} \frac{27\pi^4}{8 \langle \sin^2 \pi z \, f(z) \rangle} \quad (\text{oscillatory mode}) \quad (2)$$

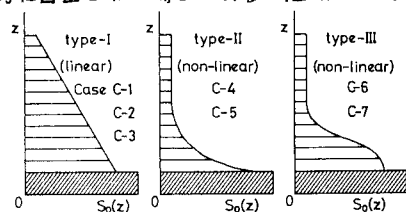


図-2 実験ケース

ここで R_{TC} は温度 Rayleigh 数 $R_T = \alpha \Delta T g d^3 / \kappa_T \nu$ の限界値, R_s は塩分 Rayleigh 数 $R_s = B \Delta S g d^3 / \kappa_r \nu$ でありこれらの値は d によって変化する。また $Pr = \nu / \kappa_T$, $\tau = \kappa_s / \kappa_r$, α, β は T-S 物質濃度の密度 ρ の換算係数, κ_T, κ_s は T-S 物質の分子拡散係数, ν は動粘性係数, g は重力加速度, $f(z) = -(d/\Delta T)(dT_0/dz)$ (T の無次元勾配), $g(z) = (-d/\Delta S)(dS_0/dz)$ (S の無次元勾配) である。また $\langle \rangle = \int_0^1 dz$ である。 $T_0(z)$, $S_0(z)$ がともに線型分布の場合は $f(z) = g(z) = 1$ となり (1)・(2) 式は従来の安定性理論より得られる結果と一致する。また (1) 式において $R_s = 0$ とおけば任意の分布形を有する熱成層に関して Nield が求めた限界条件に一致する。

3. 実験方法; 安定限界条件におよぼす分布形の影響を調べる意味で図-2に示すように三種類の初期塩分濃度成層を底面からゆるやかに加熱する実験を行なった。全水深はいずれも 20cm とした。ヒーターからの直接加熱を避け一様な熱供給を行なうため底面に厚さ数 cm の高濃度塩水層を敷いた。その内部では対流により温度がほぼ一様となる。熱は密度界面を介して上層の成層部へ拡散的に供給される。

4. 考察; 加熱初期の段階においては塩分濃度による安定密度が負の温度密度勾配に勝るため成層は安定な状態を保つ。時間とともに温度勾配が増大し成層はしだいに不安定になる。限界状態を越えれば成層内に乱れが生じ対流に到る。図-3は対流発生前後の温度分布形の変化を初期分布形の異なる3ケースについて示したものである。破線・一点鎖線・実線は各々対流前・限界時・対流発生後にほぼ相当する。点線は初期塩分濃度分布である。いずれのケースも対流発生前においては熱伝導のみによって熱が輸送されるため指数関数状のなめらかな分布形を呈する。しかし限界時においてはわずかに変形し対流開始後は分布形がくずれろ。Case C-2 と C-6 において

は対流領域が下方の有限な範囲にとどまりその上方ではなめらかな分布形が残っているのに対し Case C-5では全水深にわたって温度分布がゆがみ対流が生じている。そこで(2)式をもとに対流発生領域と限界条件を推定する。Turner²⁾は温度分布のみから定義される境界層厚を対流発生領域とし限界条件を求めたが二重成層においては塩分濃度分布をも考慮してこれらが決定されるべきであると考え

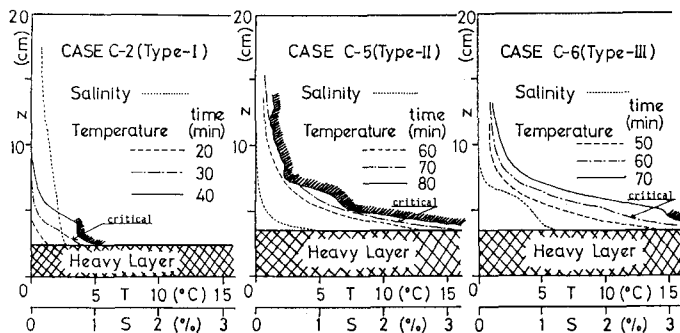


図-3 初期塩分濃度分布と温度分布の時間変化

られるため本研究では以下のように検討を行なった。すなわち 図-1における d を 0 から全水深まで変化させそれに対する限界温度 Rayleigh 数 R_{Tc} を(2)式より求める。それとともに各 d に対する温度 Rayleigh 数 R_T を求め $d \sim R_T/R_{Tc}$ 曲線の時間変化を描く。

理論的には $d \sim R_T/R_{Tc}$ 分布において R_T/R_{Tc} の最大値が 1 に等しくなった時が限界状態であり最大値に対する d が対流発生領域であると考えることができる。

$d \sim R_T/R_{Tc}$ の時間変化を図-4に示す。(比較のため d 内で $T-S$ も直線分布を仮定した時[図-1中 0 の一点鎖線の分布]の $d \sim R_T/R_{Tc}$

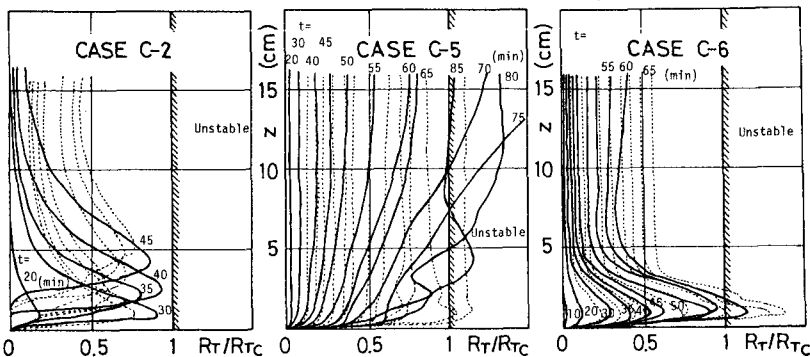


図-4 $d \sim R_T/R_{Tc}$ 曲線の時間変化

曲線を点線で示してある。) いずれのケースも加熱開始直後はすべての d に対し $R_T/R_{Tc} < 1$ となり成層は全域で安定である。しかし時間とともに R_T/R_{Tc} は全体的に増加し図-3に示された限界付近の時間に到ると Case C-2と C-6ではある有限高さ d で $R_T/R_{Tc} \approx 1$ の極大値を有している。また Case C-5では $d \approx 10$ cm以上の範囲で $R_T/R_{Tc} \geq 1$ となっており全層が対流していることを示す。以上のように 1 付近あるいは 1 を少し越えた時の $(R_T/R_{Tc})_{max}$ に対応する d を対流発生領域として図-3中の温度分布形(限界後)に斜線域で表示した。温度分布形においてゆがみを呈する範囲と斜線域とは比較的良く対応しておりこうした対流発生域の推定が妥当であることを示す。

次に $d \sim R_T/R_{Tc}$ 曲線から決定された限界時の $(R_T/R_{Tc})_{max}$ を R_s に対してプロットしたものを図-5に白抜き記号で示す。比較のため $T-S$ 分布形を直線分布とにおいて R_{Tc} を求めた場合(図-4中の点線分布より求めた場合)の値を黒塗り記号で、また Turner の方法²⁾によって d を定め R_{Tc} を求めた場合を半黒記号で示す。Turner の方法は塩分濃度分布形の違いを無視し温度分布のみから d を定めるため R_s の比較的狭い範囲に分布している。また 1 よりもかなり小さく限界条件 R_{Tc} を大きい

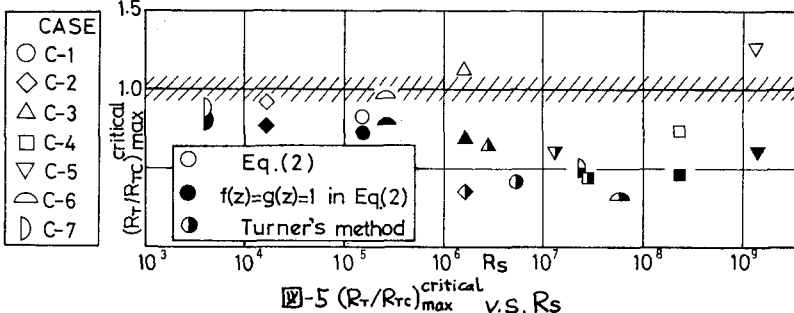


図-5 $(R_T/R_{Tc})_{max}$ v.s. R_s

[参考文献]

1) Nield, D.A.; J. Fluid Mech., vol. 71, pp.441-454, 1975 2) Turner, J.S.; J. Fluid Mech., 33, pp.183-200, 1968,