

## II-226

## 風洞水槽における水面勾配をなくした温度2層流の連行実験

東京工業大学 大学院 学生員 植松 仁  
東京工業大学 工学部 正 員 石川忠晴  
東京工業大学 工学部 正 員 田中昌宏

### 1. はじめに

閉鎖水域における安定成層の混合は、水面のセットアップの影響が顕著になる前後で混合の機構が異なることが知られている<sup>1)</sup>。水面のセットアップが完了した後では温度躍層の上層の平均流はなくなるため、躍層の連行は水面近傍で生成された乱れの拡散によって生じる。一方水面のセットアップ形成段階においては上層の流体は風によって加速され、躍層に強いせん断が生じ、連行はK-H不安定に基づく混合によって生じる。後者は前者に比べ連行速度が格段に大きいため、閉鎖水域の混合特性を考える上で極めて重要となる。

水面のセットアップをなくし、無限に広い領域を模擬する実験として、古くから円形水路における実験がなされてきた。この実験データは湖の混合モデルの基礎資料や数値計算の検証データとして数多く引用されている。しかし実験装置のスケールによっては2次流や側壁の影響が無視しえないことが指摘されている<sup>2)</sup>。一方、Kranenburg<sup>1)</sup>は大型の風洞水槽において水面のセットアップを生じさせない工夫をした実験を行い、連行係数がRi数の $-1/2$ 乗に比例することを示した。

本研究では、風洞水槽において水面勾配をなくした温度2層流の実験を行い、理論的に導出された連行則と比較検討する。

### 2. 実験方法

実験は、図1に示す様に既存の風洞水槽内（A水槽）に2層形成のための底に無数の穴の開いたB水槽をセットし、B水槽に低温水を供給し、上層に高温水を循環させて行った。上層水は下流端からポンプによってぬかれ、湯沸し器がセットされているC水槽を経由して上流端から供給される。この様にすることによって水面のセットアップを生じさせず、しかも上層水の温度を一定に保つことができる。予備実験において、界面のセットアップは水面のセットアップに対してほぼ静的釣合状態になることを確認できたので、目視によって界面勾配がゼロになる様に上層循環用ポンプのバルブを調節し、水面勾配をゼロと判断した。連行速度は、界面位置を目視とサーミスタで温度をモニターすることによって一定に保つように低温水を供給し、その供給量から測定した。なお、流速及び温度の鉛直分布は、電磁流速計及びサーミスタを用い、B水槽の上流端から268cmの位置で行った。

### 3. 連行則

著者らは霞ヶ浦における現地観測の知見を基に現地の現象を対象とした連行則を理論的に導出している<sup>3)</sup>。現地においては現象は水平方向に一樣な非定常現象であるが、本実験においては現象は定常で流れ方向に現

象が変化する。しかし混合機構の基本的メカニズムは現地と同じであると考え、上記の違いを考慮して理論展開を行った。すなわち、乱れエネルギーの生産が効率Cでポテンシャルエネルギーに変換されるとし、流速及び密度分布は相似形を保つものとして、乱れエネルギーの式を混合層で積分すると次式を得る。

$$W_e = \frac{2C\beta\left(1 - \frac{\xi}{\alpha}\right)}{\left(2\chi - C\xi \frac{\Delta U^2}{\varepsilon_s g h}\right)} \frac{U_s^2 \Delta U}{\varepsilon_s g h} \quad (1)$$

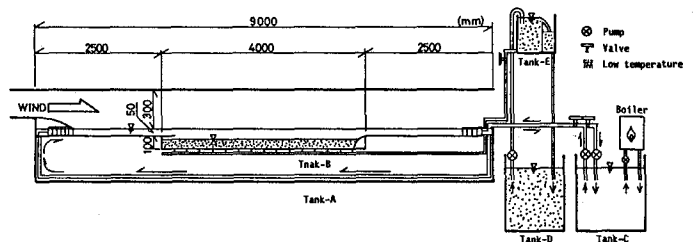


図1 実験装置の側面図

ここに、 $We$ ：連行速度， $h$ ：混合層厚さ， $U_s$ ：水面の摩擦速度， $\Delta U$ ：相対速度差， $\varepsilon_s$ ：相対密度差， $g$ ：重力加速度， $\beta$ ， $\alpha$ ， $\xi$ ：流速分布に関する定数， $\chi$ ：密度及び流速分布に関する定数である。

また、運動量及び密度フラックスを勾配拡散型で近似し、拡散係数の比が1であるとすると流速及び密度の相似分布、 $f$ ， $G$ 分布が次の様に理論的に導かれる。

$$f = \cos\left(\frac{\pi}{2}\eta\right), G = 1 - \eta + \frac{1}{\pi}(\sin\pi\eta) \quad (2)$$

これより、 $\beta=0.637$ ， $\alpha=0.5$ ， $\xi=0.424$ ， $\chi=0.233$ となり、 $C=0.5$ とすると相対流速差による $Ri$ 数、即ち $Riu=0.78$ （=一定）が得られる。以上は側壁の抵抗を考慮しない場合の結果であり、側壁の影響を考慮すると $Riu$ は一定とならないが、その効果は(1)式においては陽な形に現れず、(1)式はそのまま成り立つ。しかし、 $Eu$ は $Riu(=\varepsilon_s g h / \Delta U^2)$ に依存し、その関係は次式で表される。

$$Eu = \frac{2C\beta K(\alpha - \xi)}{\chi - C(2\alpha - \frac{3}{2})Riu} Ri_u^{-1}, \quad K = fh/B \quad (3)$$

ここに、 $B$ ：水路幅、 $f$ ：側壁の抵抗係数である。

#### 4. 実験結果及び考察

図2に $Eu \sim Ri_u$ の関係をDeardorff&Willis<sup>4)</sup>の円形水路の実験結果と共に示す。Deardorff&Willisの水路のアスペクト比は本実験と同程度であり側壁の抵抗係数を実測している。図中の理論曲線はこの平均的な抵抗係数を用いて算出したものであり、実験値と極めて良く一致している。

図3に $Eu \sim Ri_s$ の関係をKranenburg<sup>1)</sup>の実験結果と共に示す。Kranenburgは流速分布などの詳細なデータを示していないため、表示されているデータから $Eu$ を換算して求めており、定義が若干異なるが本理論とよく一致している。本実験結果は装置が小さいため上記した様に側壁の影響があり、当然 $Riu=0.78$ のラインより小さめとなっている。図2から $Riu$ は平均的に1.5程度であり、実験結果はそのラインよりやや小さめであるが、ベキ乗則は-1乗に従っている。

#### 5. まとめ

風洞水槽において水面勾配をなくした温度2層流の実験を行い、理論的考察から得られた連行則と比較した。本実験と従来の実験結果を含めた比較から、本理論の妥当性が確認された。

#### 参考文献

- 1)Kranenburg, C.:Wind-induced entrainment in a stably stratified fluid, J. F. M., 145, pp. 253-273, 1984.
- 2)Scranton, D. R. & Lindberg, :An experimental study of entraining, stress-driven, Stratified flow in an annulus, Phys. Fluids., 26, 1198-1205, 1983.
- 3)田中・石川：吹送流による安定成層の連行則の理論的導出、第44回年講
- 4)Deardorff, J. W. & Willis, G. E.:Dependence of mixed-layer entrainment on shear stress and velocity jump, J. F. M., 115, pp. 123-140, 1982.

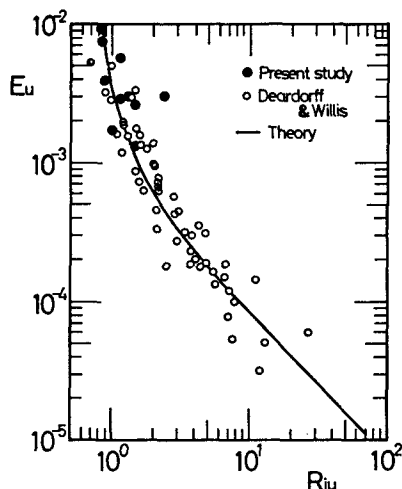


図2  $Eu$ と $Riu$ の関係

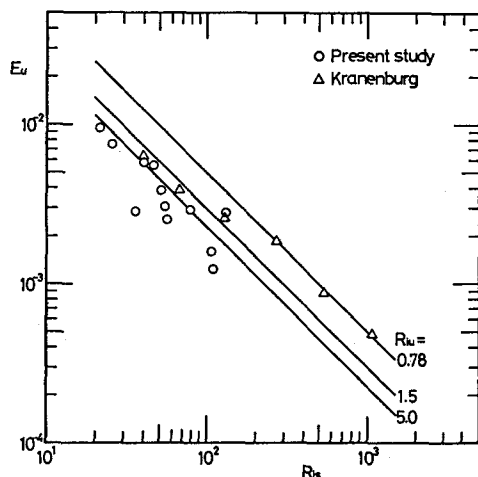


図3  $Eu$ と $Ris$ の関係