

九州大学 工学部 正員 橋 東一郎

九州大学 工学部 正員 小松 利光

九州大学 工学部 学生員 行徳 恒光

1. まえがき

前報および参考文献¹⁾で著者らは、成層(安定・不安定)せん断流中での乱れ及び密度の詳細な同一点・同時測定を行ない、得られた結果をflux Richardson数 R_f を用いて整理し、乱流構造におよぼす浮力の影響について解析・検討した。しかしながら R_f には種々の問題点が残されていることから本文では R_f やgradient Richardson数 R_i に代わる新しい成層パラメータとして乱れエネルギー式の浮力項と逸散項の比である R_E を導入して解析を行なった。

2. 成層度パラメータ R_E について

実験の詳細は前報¹⁾と同様なので省略する。浮力効果の程度を表わす局所的成層度パラメータとしては、従来よりgradient Richardson数 R_i や乱れエネルギーの輸送方程式における浮力項と乱れ生成項の比であるflux Richardson数 R_f が一般によく用いられてきた。物理的意味がより明瞭な R_f の方を用いて乱れ特性量を整理すると、各々の乱れ特性量は R_f に対しそれぞれ独特の傾向性を示すが、いずれもデータにかなりのばらつきがみられた。この原因の1つは、浮力効果が変わると R_f の分母と分子とともに影響を受けて変化することから、 R_f の物理的な意味が不明確になるためと思われる。ここで改めて成層度パラメータとしての R_f (R_i と同様)の適合性について検討をみると、以下の諸点が問題点として浮かび上がってくる。

㉔ R_f の分母の乱れの生成項が小さい地点でも乱流拡散項の寄与がかなり大きくて、高い乱れエネルギーレベルで浮力項と逸散項とバランスがとれている場合には、 R_f は成層度を過大評価することになる。特に、成層状態の流れで、 $d\rho/dz=0$ となる点では、 $R_f=\infty$ となり不都合である。

㉕ 風洞格子乱流のような乱れの発生のない減衰流れで密度勾配をもつ場合、 R_f では成層度を評価し得ない。

㉖ 不安定成層流の場合、浮力項 $g/\rho \cdot \overline{\rho' w'}$ と浮力を通じての乱れの発生量となるため、 R_f の分母と分子がともに乱れの発生に寄与する量となり、 R_f の物理的意味が不明瞭となる。

したがって、ここでは R_f , R_i に関する問題点を補う新しい成層度パラメータとして、乱れエネルギーの輸送方程式の浮力項と逸散項の比

$$R_E = \frac{g}{\rho} \frac{\overline{\rho' w'}}{\epsilon}$$

を考える。ここで ϵ は波数空間の高波数域で分子粘性により単位時間あたりに逸散される単位質量あたりのエネルギー量である。これはまた慣性作用により、波数空間をcascade downしていくエネルギー量で、乱流特性を代表する量の1つである。 $\epsilon \sim k^{3/2}/l$ (l は代表的な乱れのスケール)からも明らかなように、 ϵ はマクロなスケールの波数空間で慣性作用と乱れの構造によって決定される量であり、分子粘性には依存しない。そして $d\rho/dz=0$ で乱れの発生が零の点でも乱流拡散による乱れの輸送や移流などにより、乱れが存在すれば、それに応じた ϵ もまた存在する。

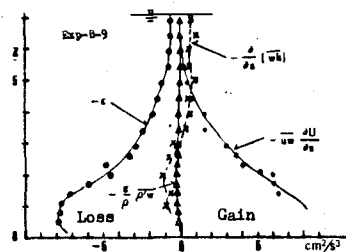
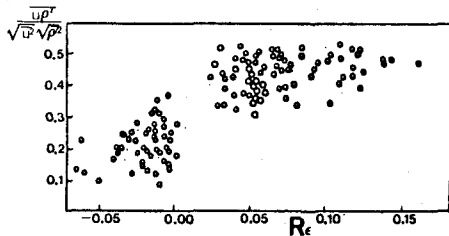
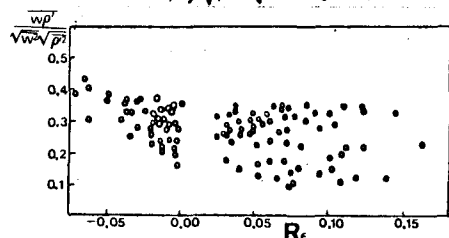


図-1 乱れエネルギーのバランス

図-2 $-\rho' w' / \sqrt{\rho'^2} \cdot \sqrt{u'^2}$ と R_E の関係図-3 $\overline{\rho' w'} / \sqrt{\rho'^2} \cdot \sqrt{w'^2}$ と R_E の関係

ところで、成層度パラメータとして R_ϵ を用いるためには密度成層場における ϵ を算出しなければならぬ。均一流体の乱れにおいて ϵ を求めるときは、①主流方向の乱れのスペクトルに慣性領域の $-\frac{5}{3}$ 乗則

$$F(k) = A_{5/3} \epsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (A_{5/3} = 0.48 \sim 0.50)$$

を適用して ϵ を逆算するかもしくは②等方性乱流を前提として導かれた

$$\epsilon = 15 \nu \int_0^\infty k^2 F(k) dk \quad (\text{Dryden の方法})$$

により求められる。しかしながら、成層密度場の乱れでは浮力により生成域のスペクトルはどちらか慣性領域の $-\frac{5}{3}$ 乗則まで影響を受けて変形することが多く、一般的には前者を用いることはできない。また後者の方法もスペクトル $F(k)$ が浮力により変形を受けること、密度効果を受けて非等方性がさらに強くなることなどの理由から厳密には使えない。したがってここでは、粘性域の乱れエネルギーのスペクトルを用いて ϵ を算出することにする。橋・小松³⁾は粘性域の乱れのスペクトルとして $-\frac{1}{2}$ 乗則

$$F(k) = A_{1/2} \epsilon^{1/2} \nu^{1/2} k^{-1/2}$$

が成立することを示した。これは生成域や慣性域のスペクトルと異なり浮力の影響を受けずに成立することから、成層せん断流における ϵ の算出に応用できるものと思われる。ただスペクトル定数 $A_{1/2}$ については正確を期すために再検討を加えた。すなわち、均一流体の流れでは慣性域の $-\frac{5}{3}$ 乗則、粘性域の $-\frac{1}{2}$ 乗則がともに成立するため、均一流体の実験のスペクトルにおいて両式から求めた ϵ が一致するように $A_{1/2}$ を求めると $A_{1/2} = 0.011$ を得た。このスペクトル定数 $A_{1/2}$ を用いて密度流の場合の ϵ を算出した。得られた ϵ についてエネルギー・バランスを検討してみると、図-1に示しているように、乱れの生成項、浮力項、乱流拡散項とはほぼつり合っており、この方法での逸散率 ϵ の算出は妥当であると思われる。

成層パラメータ R_ϵ に対して乱れ特性量を改めて整理したのが図-2~6である。やはりかなりの散らばりが見られるものの、 R_f に対して整理された図と比較すると R_ϵ の方がややまとまりが良いようである。これは、 $R_f = -\frac{3}{2} \frac{\overline{\rho'w}}{\overline{uw}}$ がすべて直接測定された量を用いて計算できるのに対し、 R_ϵ は ϵ の算定が間接的で誤差を含みやすいことを考えると、成層パラメータとしての R_ϵ の妥当性が実験的にも明らかにされたものとみることができよう。

3. むすび

R_i , R_f に代わる新しい成層度パラメータとして乱れエネルギー式の浮力項と逸散項の比である R_ϵ を提案し、実験結果よりその妥当性を検討した。通常、 ϵ の算出があまり容易ではないため、 R_ϵ はそれ程実用的ではないかもしれないが、成層度パラメータとしては最も合理的かつ物理的意味と明瞭であると思われる。

参考文献

- 1) 橋東一郎・小松利光・八尋明彦, 1981, 土木学会西部支部研究発表会, P. 99.
- 2) 小松利光・橋東一郎・八尋明彦, 1981, 第36回土木学会年次学術講演会, P. 424.
- 3) 小松利光・橋東一郎, 1977, 九大工学集報, 第50巻, 第4号, P. 387.
- 4) 橋東一郎・小松利光, 1977, 土木学会論文報告集, 第268号, P. 63.

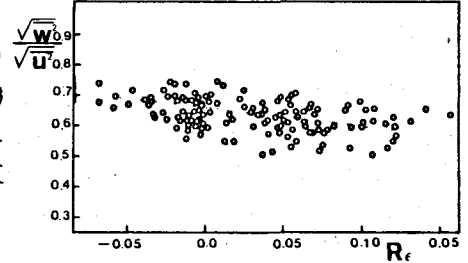


図-4 $(u_z^2)^{1/2} / (u_1^2)^{1/2}$ と R_ϵ の関係

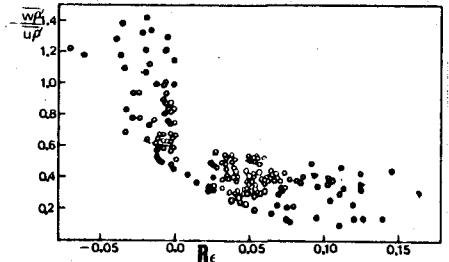


図-5 $-\rho'w / \rho'u$ と R_ϵ の関係

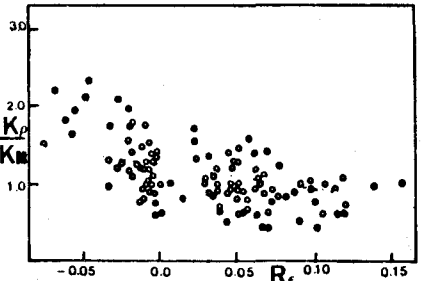


図-6 K_p / K_m と R_ϵ の関係