

連行型成層せん断流の乱流／非乱流域別乱れ構造について

Structure of Turbulent/Non-turbulent Bulges in Entraining Stratified Shear Flow

大阪大学工学部 正員 室田 明
 大阪大学工学部 正員 ○中辻啓二
 大阪大学大学院 学生員 磯崎正哉

1. まえがき

自然現象にみられる流体運動は少なからず浮力の影響を受ける。浮力による成層効果は流体の鉛直方向運動を抑制するため、運動量や熱、物質等の乱流拡散機構に重要な影響を及ぼす。海域で表層放流された温排水や河川水の流出はその例である。初期段階ではせん断流特有の組織的な大規模乱れが発達して、放流水束は乱流域を拡大する噴流的挙動を呈する。流下とともに成層安定効果が勝ってくると、レイノルズ応力が抑圧され、乱流域の発達を局在化する特異な傾向を示すようになる。前者を連行型、後者を非連行型と定義するならば、その限界条件は断面平均リチャードソン数が0.2～0.3の範囲にあることが報告されている¹⁾。

組織的乱流構造が浮力の影響を受けてどのように変形していくか、あるいは乱流輸送過程といかように関連しているかについては、精度よい実測も少ないこともあり、十分に解明されているとは言いがたい。そこで、本研究では成層せん断流の時系列に特徴的に現われる間欠性に着目して、乱れ変動を乱流域と非乱流域とに区別識別する条件付標本抽出を試み、組織的乱流構造について考察した。とくに、乱れ強度の大きい活性な乱流バルジが輸送機構に直接的に関与すると考え、バルジ内乱流構造についても検討した。解析対象は連行型成層せん断流とするが、必要に応じて成層の影響の強い非連行型の結果とも対比しながら考察を進める。

2. データの解析法

実験装置および実験方法は前報²⁾と全く同じであり、断面平均リチャードソン数 $\bar{R}_i$ が0.058, 0.533の2ケースである。前者は連行型に、後者は非連行型に対応する。測定項目は流れ方向および鉛直方向の速度変動 u, v と浮力変動 b ($\equiv g(\rho_a - \rho)/\rho_a$)、ならびにレイノルズ応力 $-uv$ と乱流浮力流束 $-vb, ub$ であり、各断面20数点で同時測定した。データ解析に用いたサンプリング時間、サンプリング周波数はそれぞれ40秒、200Hzである。主要な点では250秒、40Hzの長時間計測をおこなった。

組織的な乱流構造の抽出には乱流域を1、非乱流域を0と定義する間欠関数 $1(t)$ を採用した。検出関数には速度信号よりもスカラー量の信号を用いる方が現象を精度よく抽出できるという報告³⁾もある。本研究では、浮力変動は完全に受動的な挙動を示すものではないこと、また組織的構造との関連で輸送機構を議論することから、瞬間レイノルズ応力の時間微分の自乗成分 $\{\partial(-uv)/\partial t\}^2$ を検出関数として採用した。間欠関数の同定手順は室田・中辻・長谷川⁴⁾にしたがった。

3. 変動時系列の特性

図-1は表層密度噴流の確立領域($x/H_0=4.3$, $\bar{R}_i=0.058$)における速度変動 u, v , 浮力変動 b およびレイノルズ応力 $-uv$ の同時記録を示す。測定位置は組織的乱流構造の発達した水深($z/H=0.85$)と成層界面の直上($z/H=0.98$)である。成層界面の位置 H は局所リチャードソン数の急増大点で定義した。縦軸はそれぞれの標準偏差値で無次元表示してある。測定した変動時系列にみられる特徴は、脈幅の小さい緩慢な変動の中に大脈幅の乱流変動が間欠的に出現することである。この間欠現象は成層界面に近づく程顕著に現われるし、またレイノルズ応力 $-uv$ と浮力 b の変動に比較の明瞭に現われている。

図-1(a)の $z/H=0.85$ は前報で求めた相互相関係数 R_{vb}, R_{ub} の最も高くなる水深である。同図より間欠的に発生するレイノルズ応力の乱流変動と浮力変動との相関度がかなり大きいことが視覚的にわかる。

この $-uv > 0$ の乱流運動は高運動量の流体塊($u > 0$)を鉛直下方に輸送する運動($v < 0$)であり、この運動に付随して軽い流体塊($b > 0$)の間欠的な下降運動も生じていることがわかる。

成層界面に近づくと(図-1(b))、間欠性はより顕著になり、乱流変動の生起する周期は長くなる。また、 $-uv < 0$ の乱流運動が特徴的に現われる。それは高運動量の流体塊($u > 0$)の上昇運動($v > 0$)であり、前報で指摘した第1象限の乱流運動に相当するものであるが、時系列をみる限りにおいては u 変動と v 変動間の位相のずれに原因するものと推察できる。浮力変動と速度変動間の相関性は少し乏しくなっている。

乱流状態の時間的に占める割合 γ_F はレイノルズ応力の尖度 F を用いて $\gamma_F = 2.8 / F$ より簡易的に求めることができる。レイノルズ応力の歪度、尖度はそれぞれ $-1.5 \sim 4.0$ 、 $4 \sim 26$ の値を示し、正規分布から大きくずれている。それゆえ、 γ_F 値は水表面近くで0.5を示し、約50%の時間は乱流状態であるが、水深の増加とともに急激に減少して $z/H=0.85$ 周辺では $\gamma_F=0.15$ となる。つまり、85%の時間が非乱流状態であり、その中に間欠的に15%の乱流状態が含まれることを意味する。

さて、このような極端な間欠的特性を有する現象を物理的にどのように理解し、また表現するかが重要な検討項目となる。た

例えば、 $z/H=0.98$ での浮力変動を例にとれば、時系列に長時間連続して現われる $b/b' \approx -1.0$ の定常成分が平均的特性であり、大脈幅の強い変動が非定常な乱流成分であると解釈するのは物理的に妥当であろう。ところが、従来の慣用的な長時間平均操作によれば、両者は正負の同じ重みの変動成分と認識されることになり、現象を理解するうえでデータ処理と実現象との間には非常に大きな隔たりが生じてくる。本研究で変動成分を短時間平均操作により乱流域と非乱流域とに分離して考えようとする根拠もここにある。

4. 条件付変動量解析

(1) 間欠関数とその平均特性

先に示した方法で求められた間欠関数 $I(t)$ の0-1分布を図-1の最下段の時系列に示す。間欠的に生起する乱流変動を良好に同定しているのがわかる。また、成層界面では $z/H=0.85$ と比較して持続時間の長い乱流パルジの出現が認められる。

図-2は間欠現象を特徴づける間欠因子 γ と間欠周波数 f_γ の鉛直方向分布を示す。 γ は間欠関数 $I(t)$ の単

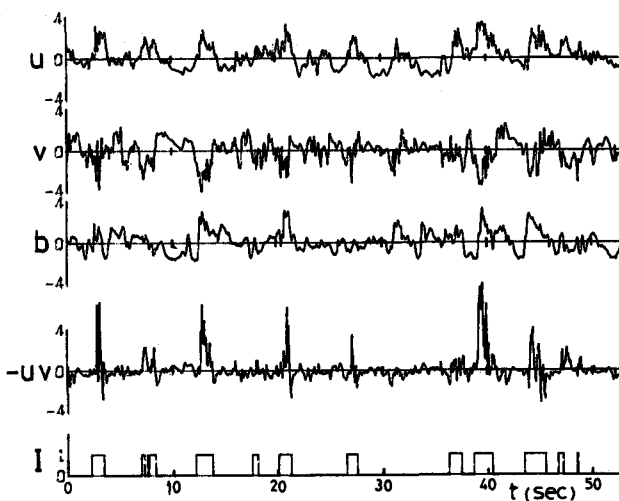


図-1(a) $z/H=0.85$ での変動時系列

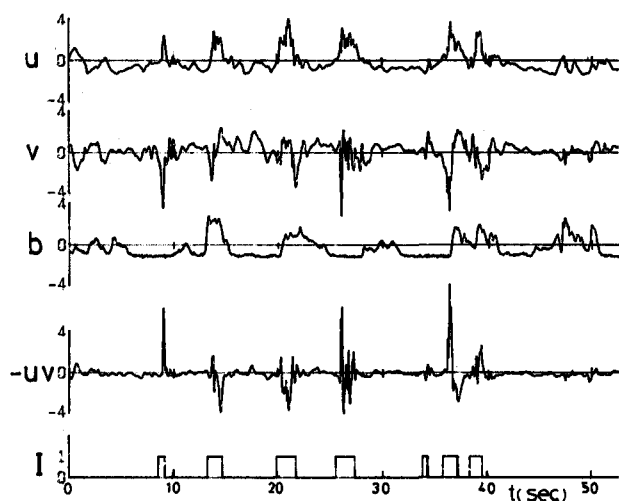


図-1(b) $z/H=0.98$ での変動時系列

純時間平均 ($\sum_{i=1}^N I(t)/N$) であり、乱流状態の時間的に占める割合を表わす。また、 f_T は $\sum_{i=1}^N |\partial I / \partial t| / N \cdot \Delta t$ で定義され、乱流状態と非乱流状態の単位時間当りの切り替え回数を表わす。また、同図には比較のために連行型を実線で、非連行型を破線で示した。

両者ともに、 γ ならびに f_T は水深の増加とともに減少し、時系列中に乱流状態の占める割合が減少すると同時に、乱流域と非乱流域間の切り替え数も減少することを示す。 γ の値は 0.6 ~ 0.14 の範囲である。通常用いられる噴流内での $\gamma = 1.0$ とは若干趣きを異にするが、これは検出関数としてレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ を用いたことに依存する。上記の値は同様の方法を用いた Antonia^⑧ の値とよく一致している。

連行型成層せん断流の特徴は成層界面直上で f_T が急激に減少することである。 γ / f_T が乱流状態の平均的な持続時間を示すことから、長い持続時間の乱流パルジが生起していることがわかる。しかしながら、成層界面においては f_T は急激に増加する。このことから、界面上では乱流域と非乱流域とが頻繁に切り替っていると推察される。

一方、成層度の強い非連行型せん断流では、 γ の値は連行型と同様に単調減少するが、 f_T は $z/H = 0.6 \sim 1.4$ の範囲で一定値となり、連行型とは異なる傾向を示すようである。

図-2 間欠因子と間欠周波数

(2) 乱れ変動の乱流域／非乱流域別特性

図-3, 4 は乱流

域あるいは非乱流域別に標本抽出した乱流エネルギー $\overline{q^2}$ ($= (\overline{u^2} + 2\overline{v^2})/3$) および浮力変動 $\overline{b^2}$ の鉛直方向分布を慣用平均と併せて示す。縦軸は水表面での平均速度 U_s と平均浮力 B_s で無次元表示してある。

なお、縦棒を記した

印は250秒間の測定データを表わす。

慣用平均 $\overline{q^2}$ と非乱流域平均 $\overline{q_N^2}$ は $z/H = 0.33$ 付近で最大値を示したのちに水深の増加にともなって減少するが、乱流域平均 $\overline{q_T^2}$ は成層界面近傍では減少せずに一定値を示す。また、 $\overline{q_T^2}$ は全域にわたって $\overline{q_N^2}$ の約2倍もあり、乱流域と非乱流域とに識別することの有意な差異が明瞭に現われている。

浮力変動には乱流エネルギーにみられるほどの違いは認められない。成層界面に近づいても乱流域平均 $\overline{b_T^2}$ は減少せずに一定値を保持するのが特徴である。これに対して $\overline{b^2}$ と $\overline{b_N^2}$ は急激に減少する。

図-5 は U_s 、 B_s で無次元表示したレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ と乱流浮力流束 $-\overline{vb}$ の乱流域／非乱流域別鉛直方向分布を示す。慣用平均と非乱流域平均のレイノルズ応力の分布は、乱流エネルギーの分布と同様に、 $z/H = 0.33$ で最大値を示し、水深の増加にともなって次第に0.0に減少する。これに対して、乱流域平均 $-\overline{uv_T}$ の減衰は $z/H = 0.6 \sim 0.9$ の範囲で非常に緩慢になる。しかも、成層界面においても0.004の有意な値を示す。

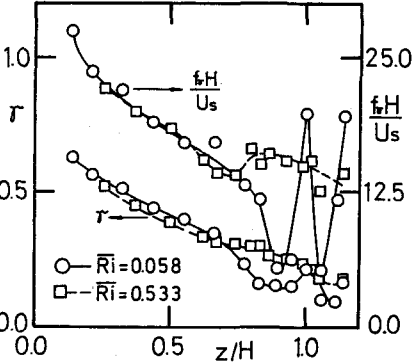


図-4 浮力変動 $\overline{b^2}$ の分布

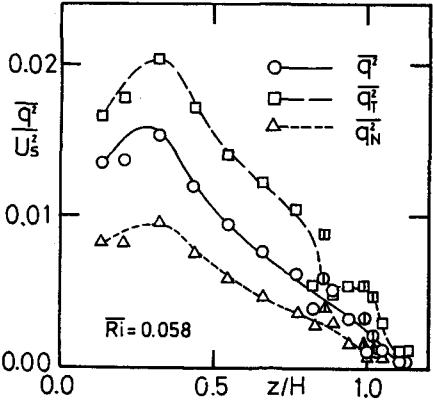


図-3 乱流エネルギー $\overline{q^2}$ の分布

同様の傾向が乱流浮力
 流束の乱流域平均 $-\overline{vb}_T$
 の分布にもみられ、成層
 界面直上で $-\overline{vb}_T$ が急増
 大する。この特異な分布
 は $-\overline{uv}_T$ や $-\overline{vb}_T$ の輸送
 方程式中の生成項 $-\overline{u}b_T$ 、
 $-\overline{b}_T^2$ の挙動を反映して
 おり、浮力輸送が強く関
 連している。

そこで、両流束の相関
 係数 $Ruv = -\overline{uv}/\overline{u'v'}$ と Rvb
 $= -\overline{vb}/\overline{v'b'}$ の鉛直方向分
 布を求めたのが図-6
 である。乱流域での Ruv は
 噴流内部では慣用平均と
 同じ値0.55を示すが、図
 -5で $-\overline{uv}_T$ が横ばい
 となる $z/H=0.75$ 付近から
 急増大して1.0に達した
 後に成層界面位置で減少
 するという特異な分布を
 示す。すなわち、成層界
 面上では相関度の非常に
 高い乱流運動が運動量の
 輸送に関与していること

がわかる。 Rvb の乱流域平均にも、絶対値は0.5と小さいものの、同様な傾向が現われている。さらに、図に
 は示さないが、 $\overline{ub}/UsBs$ と Rub にもこの傾向はより顕著に現われており注目値する。以上のことより、成
 層界面近傍で抽出された乱流パルジは、時間的に占める割合は約14%と小さいものの、相関性の高い組織
 的乱流運動をしており、運動量ならびにスカラー量の輸送に大きな貢献を果たしているものと考えられる。

(3) 乱流パルジの内部構造

組織的構造と乱流輸送機構との関連を議論するために、乱流パルジ
 の内部構造について考察する。抽出した乱流パルジの持続時間 T_* とパ
 ルジ内平均乱れ強度 $\hat{u}^2$ との関連を示したのが図-7である。縦軸は乱
 流域平均乱れ強度 $\overline{u}^2$ で無次元表示した。多少散乱気味であるが、両者
 には正の相関が認められる。また $-\overline{uv}$ の強度との関連性においても同
 様の相関があり、持続時間の長い乱流パルジ程、保有するエネルギー
 も大きく、運動量輸送の貢献も大きいことがわかる。

そこで、乱流パルジを図-7中の破線で示すように持続時間により
 4グループに分割して、その特性を調べた。図-8はグループ別出現
 個数の水深方向変化を示す。測定時間は250秒であり、グループの分

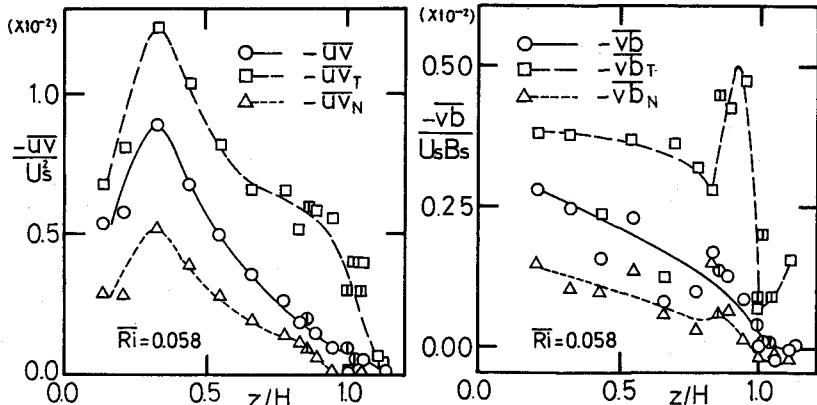


図-5 レイノルズ応力と乱流浮力流束の鉛直方向分布

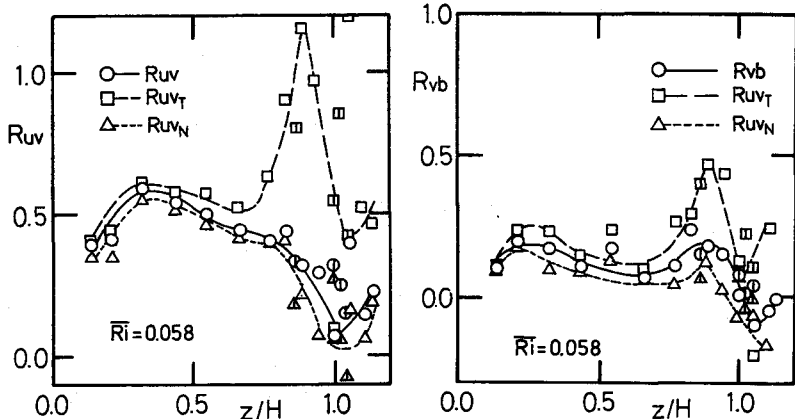


図-6 相関係数 Ruv と Rvb の鉛直方向分布

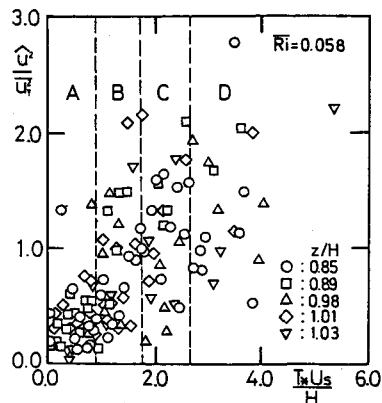


図-7 持続時間と強度

割基準は渦寿命時間を採用した。A、B、C、Dは各グループを、また縦軸は各水深別出現個数を示す。

全体的にみれば、持続時間の短いAグループの発生数が多く、持続時間の増大とともに減少する傾向にある。しかし、成層界面位置 ($z/H=0.98$) では種々の規模の乱流パルジが混在しており、比較的長い持続時間のパルジ (Dグループ) の占める割合が大きい。これは他の測点での頻度分布と異なる点であり、成層効果の影響がうかがわれる。

つぎに、各グループ毎のレイノルズ応力のパルジ内構造を調べたのが図-9である。横軸の t_d/T_* は各乱流パルジの持続時間 T_* で規格化した時間を示し、縦軸はパルジ内の t_d/T_* に対応するレイノルズ応力を各グループ毎にアンサンブル平均した値 $-\overline{u'v'}$ を乱れ強さ u', v' で無次元表示した。一例として、図-1の時系列に対応する水深でのパルジ内分布を示す。

連行型成層せん断流の各測点では $z/H=0.85$ の内部構造を代表するような挙動を一般に呈している。すなわち、運動量の

輸送に貢献する乱流パルジは持続時間の長いパルジ (Dグループ) であり、しかもその前半部で主要な貢献を果たしている。持続時間の短い乱流パルジになると $-\overline{u'v'}/u'v'$ は平坦な分布となり、運動量輸送への寄与は次第に後半部に移行するようである。この結果は検出関数として温度変動を採用して解析した Sreenivasan et al⁵⁾ の結果と一致する。

これに対して、成層界面での内部構造は $z/H=0.85$ のような系統だった構造をもたず、各乱流パルジ毎に異なった様相を呈する。長い持続時間のパルジDは乱れ強度が大きく前半部でピークを有する構造を示すが、持続時間の短いA、Bグループではパルジの後端あるいは前端で負の値を示す。図-1の時系列で指摘した u 変動と v 変動間の位相のずれが短い乱流パルジに現われ易いことを示している。

そこで、図-10に最も持続時間の長いDグループのレイノルズ応力と乱流浮力流束の乱流

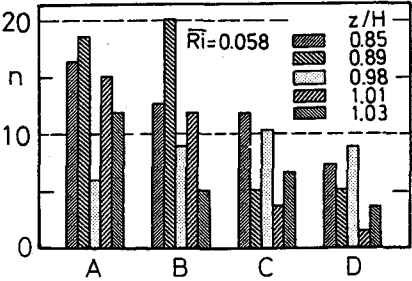


図-8 グループ別の出現頻度分布

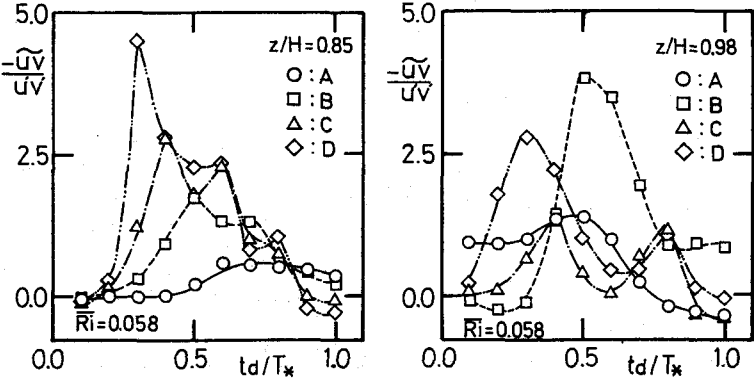


図-9 レイノルズ応力の内部構造

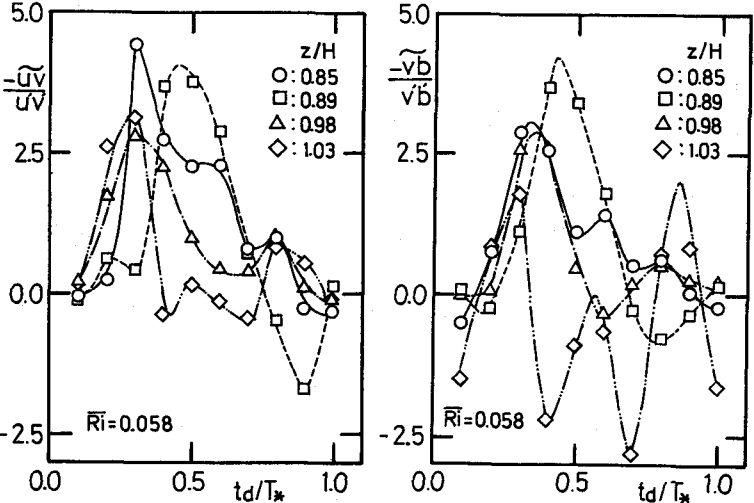


図-10 長い持続時間の乱流パルジの内部構造

バルジ内構造、 $-\tilde{u}v/u'v'$ と $-\tilde{v}b/v'b'$ の水深方向変化を示す。両図を比較して驚くことは、両構造の傾向が非常によく合致していることである。これは長い持続時間の乱流バルジ内での運動量と浮力の輸送機構が酷似していることを示唆する。乱れ変動を調べると $\tilde{u} > 0$ 、 $\tilde{v} < 0$ そして $\tilde{b} > 0$ であり、それは高運動量の軽い流体塊を鉛直下方に向わせる乱流運動である。その貢献はスパイク状に生起する前半部で大きい。

Cグループのバルジ内構造の水深方向変化は、図には示さないが、Dグループの構造と大略よく似ており、 $-\tilde{u}v$ と $-\tilde{v}b$ の構造の相似性は保持されている。ただし、成層界面上($z/H=0.98$)での構造は双頭型で他の水深での構造とは非常に異なった形を示す。さらに、持続時間の短いA、Bグループになると、両構造間の類似性はほとんどなくなる。この原因としてはアンサンブル平均する際に含まれる位相のずれに起因するスクランブル効果も考えられなくはないが、浮力による成層効果の影響であると思われる。それは、乱れ強度の小さいA、Bグループの乱流バルジ程、また成層界面に近づく程、 $-\tilde{u}v$ と $-\tilde{v}b$ の構造の相似性が崩れ易いことから十分予想できる。

(4) 非連行型成層せん断流における乱流バルジの特性

成層効果の組織的構造に及ぼす影響を把握するため、図-9(a)に対応する水深で $\bar{R}_i = 0.533$ の場合のバルジ内構造を示したのが図-11である。レイノルズ応力 $-\tilde{u}v$ は連行型($\bar{R}_i = 0.058$)の構造と同様の傾向を示すが、その絶対値は持続時間の長いバルジ(D、Cグループ)でさえ連行型の半分程度である。また、

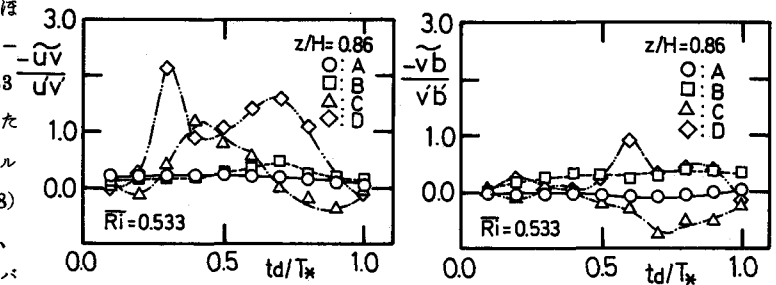


図-11 $\bar{R}_i = 0.533$ の乱流バルジの内部構造

持続時間の短いバルジになると、その構造はかなり平坦であり、絶対値も非常に小さい。連行型と比較して異なる点は、乱流浮力流束 $-\tilde{v}b$ の構造と $-\tilde{u}v$ のそれとは全く類似性がないことである。

したがって、成層度の強い非連行型せん断流では図-2にみられるように間欠的な挙動が現われるものの、組織的な乱流運動は浮力の影響のために抑圧されているものと考えられる。

5. あとがき

成層せん断流における組織的乱流構造と浮力効果の関係、さらには乱流輸送との関連性を解明する目的で時系列特性に着目した条件付変動量解析をおこなった。その結果、連行型成層せん断流の成層界面近傍で抽出された乱流バルジは、時間的に占める割合は小さいものの、組織的な乱流運動を呈しており、運動量ならびにスカラー量の輸送に大きな貢献を果たしていることがわかった。また、主要な貢献は比較的長い持続時間の乱流バルジであり、しかもその前半部での寄与が大きい。浮力の影響は持続時間の短い乱流バルジに現われ易く、レイノルズ応力と乱流浮力流束のバルジ内構造の類似性を崩壊させることが判明した。

参考文献

- 1) Chu, V. H. & M. R. Vanvari; Proc. of ASCE, HY6, 1976, pp. 691-706
- 2) 室田明・中辻啓二・角谷孝義; 土木学会第26回水理講演会論文集, 1982, pp. 527-534.
- 3) Antonia, R. A.; J. of Fluid Mech., vol. 56, 1972, pp. 1-18.
- 4) 室田明・中辻啓二・長谷川靖明; 土木学会第22回水理講演会論文集, 1978, pp. 7-13.
- 5) Sreenivasan, K. R., R. A. Antonia & D. Britz; J. of Fluid Mech., vol. 94, 1979, pp. 745-775.