

大阪大学大学院 学生員 福原 輝幸
大阪大学工学部 正員 室田 明

1. 緒 論: 壁面剪断乱流に関する研究にはレイノルズ応力: $u'v'$ の時系列を対象としたものが数多い。中でも Brodkey et al.¹⁾ は $u'v'$ 時系列の示唆的なモデルを提案している。しかし残念ながら、彼らのモデルでは $u'v'$ を構成する4事象 (① ejection(ej): $u < 0, v > 0$, ② sweep(sw): $u > 0, v < 0$, ③ outerward interaction(io): $u > 0, v > 0$, ④ wallward interaction(iw): $u < 0, v < 0$) の間の繋がりが不明であるために、連続的な事象の推移として $u'v'$ 時系列が表現されておらず、現実的でない。

そこで本研究は、条件付抽出法を用いて事象の推移特性および事象の時間規模と変動の大きさの関係を明らかにすることを目的とし、開水路剪断乱流の特性をより詳細に理解しようとするものである。

2. 実験方法: 断面平均流速 $U_m = 10 \text{ cm/sec}$, 水深 $H = 7 \text{ cm}$, レイノルズ数 $Re \equiv U_m H / \nu = 6760$ の等流状態のもとで、二成分熱線流速計を用いて、路床から種々の高さにおける流下方向および水深方向の変動流速 u, v を測定する。

3. 事象の時間および変動特性: 各事象の時間的特性 (持続時間: DT , 周期: DT) および変動量 (レイノルズ応力: $u'v'$, 乱れ強度: U_{rms}, V_{rms}) の水深方向変化を示したのが図-1 から図-5 である。ここに、 DT, DT は主流速 U_0 と水深 H で、また変動量は摩擦速度 u_* でそれぞれ無次元化している。図-1 は持続時間の水深方向変化を示しており、 sw や ej の持続時間は iw, io のそれぞれの2倍程度長く、各事象とも持続時間は路床から離れるに従って減少している。図-2 は周期の水深方向分布であるが、各事象とも周期の長さには明確な差異はない。また、Brodkey et al. が指摘したような sw と io および ej と iw がそれぞれ相似な分布形となるような特徴は認められない。レイノルズ応力および乱れ強度に関しては、図-3 から図-5 で明らかなように、 ej で最も大きく、続いて sw , さらに io の順となる。

4. 事象の推移特性: 変動の大きさと事象の時間規模の関連性を検討するために、持続時間、レイノルズ応力と $q = \sqrt{u'^2 + v'^2}$ の3つを対象として、事象の推移特性を調べた。その結果が図-6 であり、相対的に持続時間が長い場合や変動が大きい場合には、同図の右側に示すように、 $ej \rightleftharpoons iw$ および $sw \rightleftharpoons io$ の推移が卓越することがわかる。一方、同図左側の相対的に持続時間、変動の大きさがともに小さい場合には、推移過程に一義的な傾向は認められない。

以上、事象の推移から、変動の大きさと事象の時間規模は互いに密接な関係にあることが理解できる。なお、事象の推移特性の詳細については参考文献(2)を参照されたい。

5. 事象の時間規模と変動の大きさの関係: 4の結果をより定量的に評価するために、持続時間の大きさ毎に標本を分類し、分類された標本別にアンサンブル平均して得られたレイノルズ応力 $\langle u'v' \rangle_{DR}$ と持続時間の関係

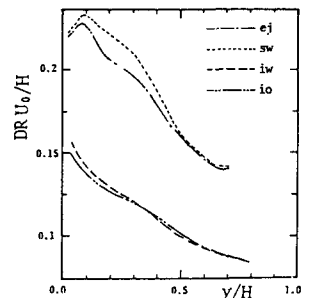


図-1 持続時間

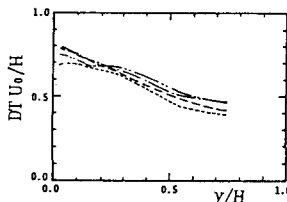


図-2 周期

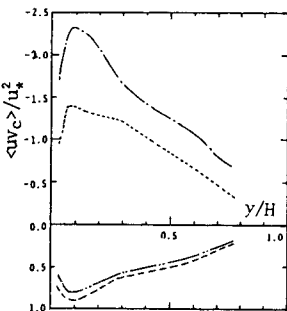


図-3 レイノルズ応力

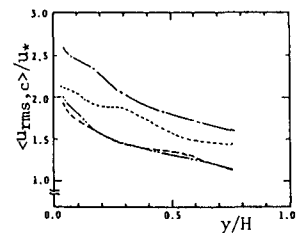


図-4 乱れ強度

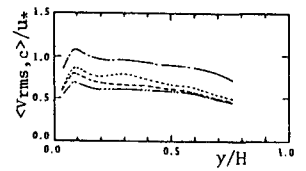


図-5 乱れ強度

を示したのが図-7である。各事象とも $\langle U\tilde{U}_c \rangle_{DR}$ は持続時間の増大とともに指数関数的に増大しており、両者の間に明確な正の相関関係が存在していると言える。また、指数分布に近い持続時間の確率密度分布²⁾から判断すれば、大きな $U\tilde{U}_c$ の値を持つような持続時間の長い事象は間欠的に出現していると推察でき、このことは実際の $U\tilde{U}$ 時系列の特性とも一致している。

6. 時系列の概念図: Brodkey et al. 流の整理方法ではオイラー的計測にもとづく乱流場の変化が表現しきれないことより、著者等は事象の推移特性や事象の時間規模と変動の大きさを考慮して、図-8に示すような時系列の概念図を作成した。同図は確率的に起こりやすい事象の推移過程を表わした一例である。ただし、横軸の時間規模は正確でないから、図-7に示すような変動の大きさと持続時間の関係までは満足されておらず、相対的に持続時間の長い事象では平均値 $\langle U\tilde{U}_c \rangle$ より大きな変動に、またこの逆の場合には $\langle U\tilde{U}_c \rangle$ より小さな変動になりやすいといった形で表わされている。

7. 条件付平均値の推定: 図-7の $\langle U\tilde{U}_c \rangle_{DR}$ と DR の関係および DR の確率密度分布をもとに、条件付平均値 $\tilde{U\tilde{U}_c}$ を算定し、図-3の $\langle U\tilde{U}_c \rangle$ と比較することで、5, 6. で述べた $U\tilde{U}$ の特性の再評価を試みる。

DR の確率密度分布は参考文献(2)に示すように、計測範囲内($DR \geq 0$)において次式の指数分布としてみなされよう。

$$P(DR) = a \exp(-a \cdot DR) \quad (1)$$

$\langle U\tilde{U}_c \rangle_{DR}$ と DR の関係は次式のように仮定される。

$$\langle U\tilde{U}_c \rangle_{DR} / \overline{U\tilde{U}} \equiv Q(DR) = r[1 - \exp(-S \cdot DR)] \quad (2)$$

ここに、 a, r, S は定数、 $\overline{U\tilde{U}}$ は長時間平均値を表わす。

(1), (2)式より $U\tilde{U}_c$ の期待値 $\tilde{U\tilde{U}_c}$ は次式で得られる。

$$\tilde{U\tilde{U}_c} / \overline{U\tilde{U}} = \int_0^\infty Q(DR) P(DR) d(DR) \quad (3)$$

(3)式の積分を実行すれば、

$$\tilde{U\tilde{U}_c} = \overline{U\tilde{U}} \cdot r \cdot S / (a + S) \quad (4)$$

$\tilde{U\tilde{U}_c}$ と図-3の $\langle U\tilde{U}_c \rangle$ との比較を表-1に示す。分布を決定するための定数(特に r)に含まれる誤差の影響もあり、 $\tilde{U\tilde{U}_c}$ の方が $\langle U\tilde{U}_c \rangle$ よりも大きくなる傾向にはあるが、比較的単純な形で展開した本モデルにより、変動の大きさと事象の時間規模の間の密接な相関関係が理解できよう。

8. 結 論: 本研究により次の知見を得た。(i) 事象の時間規模と変動の大きさの間には、(2)式で表現されるような相関関係が存在する。(ii) 事象の推移にも規則的な性質があり、特に持続時間の長い事象の前後の推移では、 $ej \rightleftharpoons iw, SW \rightleftharpoons io$ が卓越する。

しかしながら、(ii)の内容と大規模組織乱流構造との関係は不明であり、今後の課題である。〈参考文献〉 i) Brodkey et al. J.F.M.

Vol.63, 1974 2) 室田福原佐藤: 昭和56年度関西支部年報

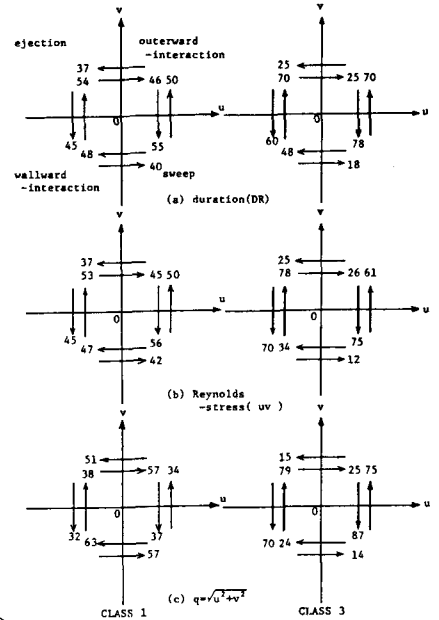


図-6 事象の推移特性

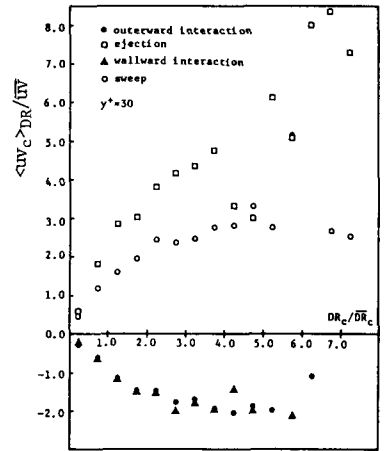


図-7 変動の大きさと持続時間の関係

表-1 計算結果

Event	a	r	s	$\frac{\tilde{U\tilde{U}_c}}{\langle U\tilde{U}_c \rangle}$
ej	7.0	5.0	2.4	1.11
sw	7.0	3.1	2.6	1.19
io	9.0	2.0	3.1	1.25
iw	9.0	2.0	3.2	1.17

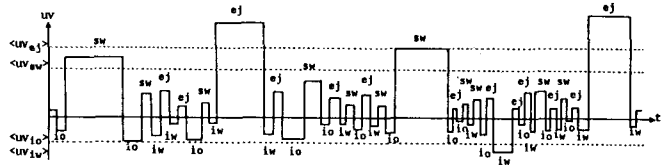


図-8 時系列の概念図