

太田川河口部の非定常乱流構造 Observations of Nonstationary Turbulence in the Ota River Estuary

広島大学工学部 正会員 川 西 澄

広島大学工学部 正会員 余 越 正一郎

1. はじめに

河川感潮部では水深、平均流速、塩分分布が潮汐とともに大きく変化し、その乱流構造は時々刻々変化する。河川感潮部における物質の輸送や混合拡散等を考えるには、この非定常な乱流構造に関する知識が必要である。

潮汐にともなう乱流構造の変化の実態を把握するため、太田川放水路において、潮汐2周期にわたり連続して流速と塩分濃度を観測、解析した。

2. 観 測

観測は1983年11月18日～20日にかけて、広島デルタの西部に位置する太田川放水路で行った。太田川は河口から9 km上流で放水路と旧太田川(市内派川)にわかれている。下げ潮時、太田川流量の大部分は旧太田川の方に流れ、特に水深が小さくなると放水路に流入する河川水はほとんどない。

Fig. 1に観測地点(O)と放水路横断形状を示す。観測地点は河口からおよそ3 km上流の所で河幅は約300 m、河床は平坦で勾配は約 $1/1800$ である。水路の平面形状、断面形状とも比較的単純で観測には適した場所

である。観測は大潮を選んで行った。水深は6 m～2 mまで変化しており、その変化は日潮不等型である。

流速測定には2成分電磁流速計4台と小型プロペラ流速計2台を使用し、塩分濃度は温度補償回路つきの導電率計を使って測定した。¹⁾

流速計と導電率計の受感部は外径25 mmのアルミ管フ

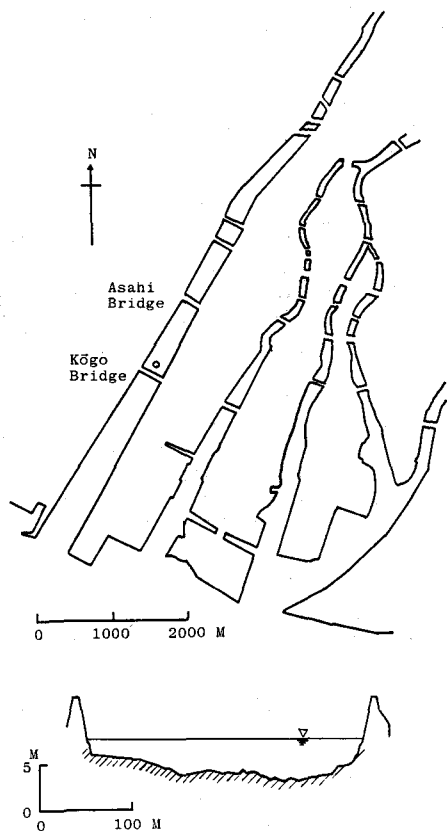


Fig. 1 Sketch map of the Hiroshima delta and cross section of the measuring point (o).

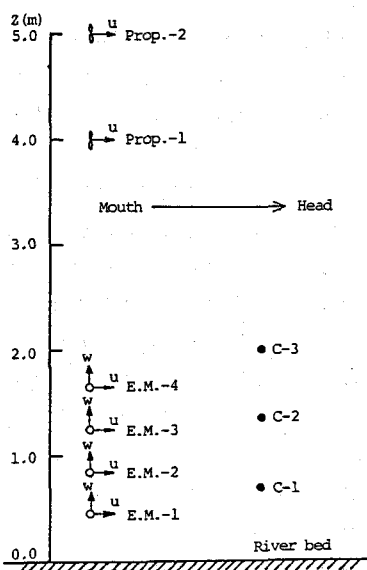


Fig. 2 Vertical arrangement of sensors.

E.M.-1～E.M.-4: Electromagnetic
Prop.-1～Prop.-2: Propeller
C-1～C-3: Conductivity

レーンに取付け、重りで河床に固定した。流速計と導電率計の鉛直方向配置を Fig. 2 に示す。4 台の電磁流速計はすべて、主流方向成分 (u) と鉛直方向成分 (w) を同時測定するように取付けた。流向は上流方向、鉛直上向きを正とした。測器の出力信号はデータレコーダ (SANGAMO 社, SABRE80) を使用し、約 30 時間磁気テープに同時連続記録した。

3. 解析結果と考察

4 台の電磁流速計の時定数は最大のものが 1 秒であることを考慮し、電磁流速計の出力信号はすべて遮断周波数 0.3Hz のローパスフィルターを通し、0.64 秒間隔で同時 A/D 変換した。なお、以下の統計処理はすべて広島大学総合情報処理センターの HITAC M-200H で行った。

3.1 流速と塩分濃度の経時変化

Fig. 3 に 4 台の電磁流速計で測定した主流方向の流速と塩分濃度の経時変化を示す。上の図が塩分濃度、下の図が流速である。流速と塩分濃度は下から順に、それぞれ $Z = 0.45, 0.85, 1.25, 1.65 \text{ m}$ と $Z = 2.0, 1.35, 0.7 \text{ m}$ におけるものである。

流速の経時変化は正弦曲線よりかなり歪んでおり、下げ潮から上げ潮にかけての流速変化は逆の場合より急である。下げ潮より上げ潮の方が最大流速は大きく、潮汐一周平均の流速は 4 測点とも陸向きで (6 cm/s 程度)、重力循環流が生じている。4 測点における平均流速経時変化の位相差はほとんどなく、その振幅もあまり変わらない。

経過時間 11 時～23 時にかけて、最も低い測点 ($Z = 0.7 \text{ m}$) の塩分濃度は浮遊物のため計測できなかった。塩分濃度の経時変化は正弦的ではなく、濃度の高いところでは平坦で、低いところでは尖っている。塩分が平均流速で運ばれるとすると、このことから主流方向の塩分濃度勾配が上流側で急、河口側で緩やかになっていることがわかる。

15 時の干潮における濃度低下は前後 2 つの干潮にくらべて小さい。これは潮位変化が日潮不等型で、前後の干潮にくらべ水位低下が小さいためである。

Fig. 4 は 1984 年 9 月 11 日～12 日の大潮に行った塩分濃度分布の経時変化である。測点は河床から 1 m おきに 5 点設けた。縦軸は水面を 1.0 とした河床からの無次元高さで、横軸は経過時間である。1983 年 11 月 18 日～20 日の塩分濃度経時変化 (Fig. 3) と同様、干潮の前後で濃度変化が急で等濃度線が密になっている。上げ潮の濃度増加時、等濃度線はほぼ鉛直なのに対し、下げ潮時には表面付近から濃度が低下しているのがわ

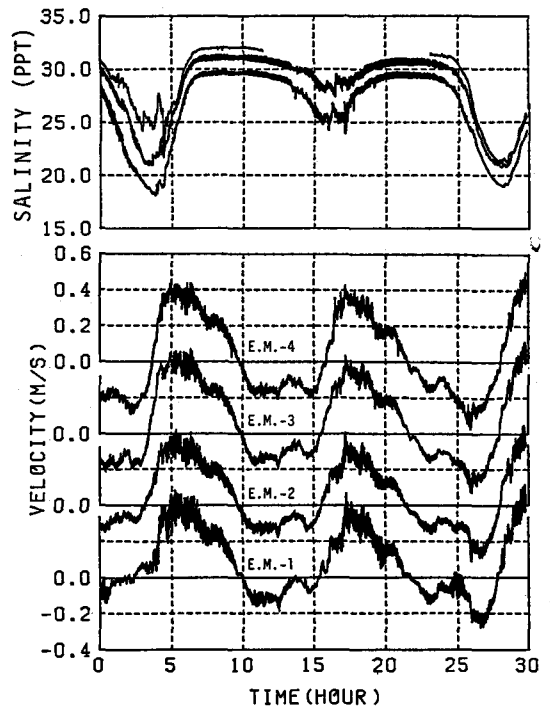


Fig. 3 Temporal variations of salinity and longitudinal velocity.
Upper : salinities. Lower : velocities.

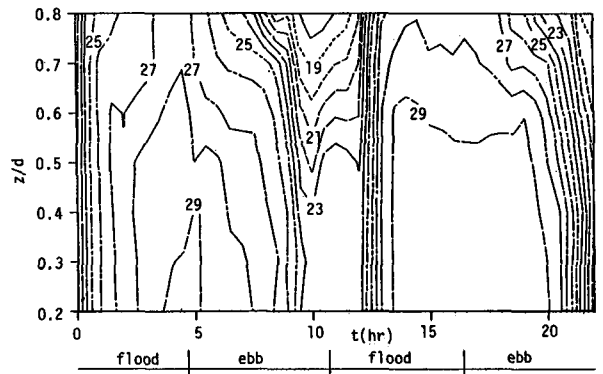


Fig. 4 Contour map of salinity variation (ppt). (1984.9.11~12)

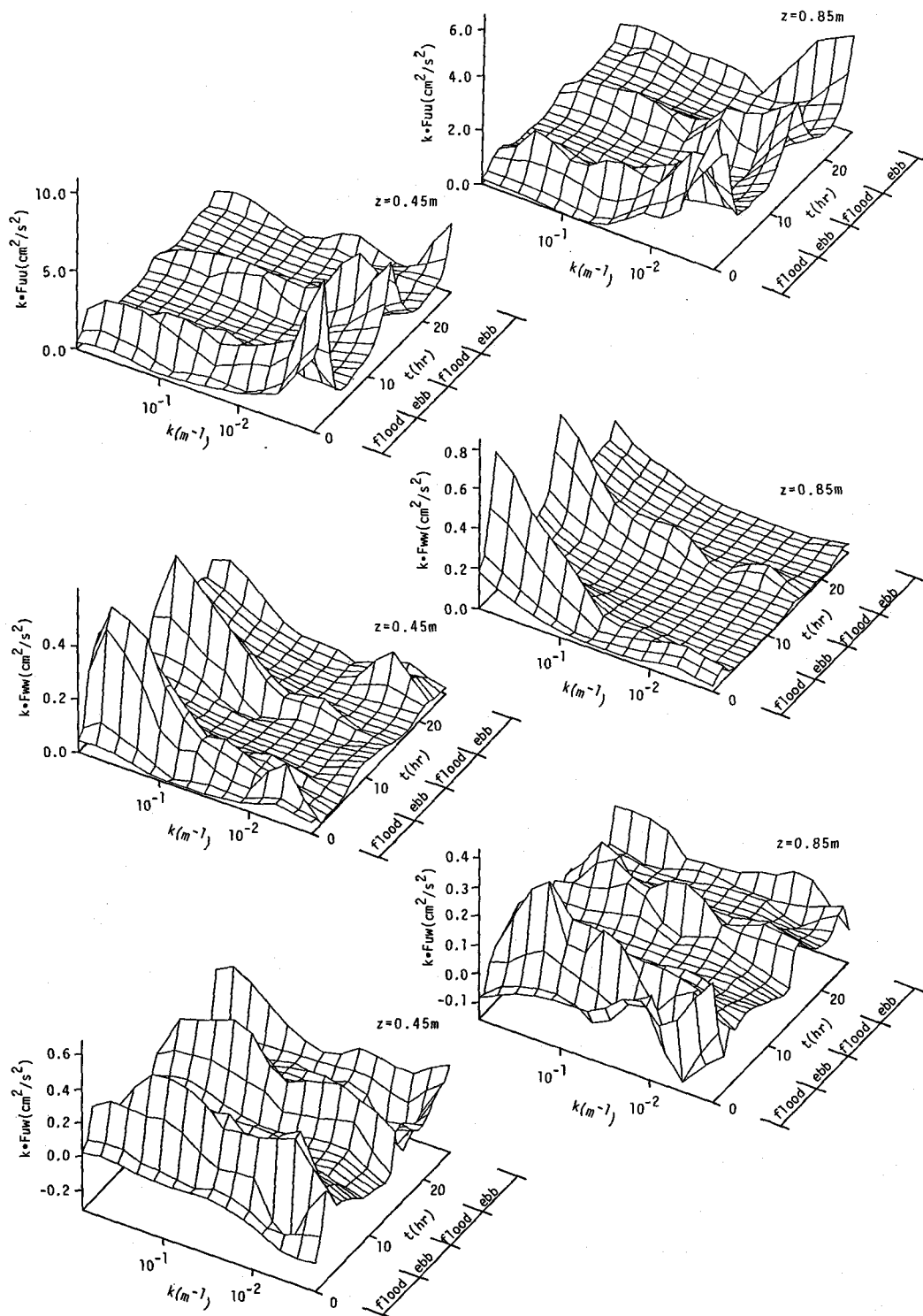


Fig. 5 Nonstationary spectra at heights of 0.45 m and 0.85 m above the river bed.

かる。

平均流速の鉛直分布は潮汐の大部分の位相で対数分布と異なる。¹⁾ 上げ潮時、平均流速分布は平坦で河床近くまで流速が減少しない。一方下げ潮時には流速は水面付近で急に大きくなり、河床付近の流速は小さい。このように平均流速分布が対数分布からずれる原因の1つとして、主流方向の密度勾配が考えられる。

3.2 乱れのスペクトル構造

河川感潮部では平均流速が大きく変化するため、乱子の寸法が同一でもその通過時間は変化する。したがって、たとえ乱流構造自体に変化がなくても周波数スペクトルは変化する。そこで、流速の読取り時間間隔 Δt を $\Delta x = \bar{u} \cdot \Delta t$ により移流距離間隔 Δx に変換して解析した。²⁾ ただし、局所平均流速 $\bar{u}$ が 0.1 m/s 未満の時は変換していない。

移流距離間隔に変換した流速のバンドパスフィルター出力を、2乗検波して求めた非定常スペクトルを Fig. 5 に示す。紙面の都合上、河床に近い2測点のスペクトルのみ示す。左が $Z = 0.45 \text{ m}$ 、右が $Z = 0.85 \text{ m}$ のもので、上から順に u -スペクトル、 w -スペクトル、レイノルズ応力スペクトルである。縦軸は波数とスペクトル密度をかけたものである。ただし波数は $1/\text{波長}$ で 2π はかかっている。

どのスペクトルも上げ潮の最大流速付近で最も大きくなり、下げ潮の間は小さい。これは 3.1 で述べたように、上げ潮

の方が河床付近の流速が大きく、河床近傍のシアが強いためと考えられる。低波数成分から高波数成分までほぼ同時にエネルギーが最大となる。 u -スペクトルは低波数部に大きなエネルギーがあるのに対し、 w -スペクトルでは高波数部にエネルギーが集中している。レイノルズ応力スペクトルをみると、高波数成分のレイノルズ応力に対する寄与も無視できないことがわかる。したがって、鉛直方向の乱れエネルギー $\overline{w^2}$ やレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ を測定するには、ある程度時定数の小さな流速計が必要である。

3.3 乱れエネルギーとレイノルズ応力

乱れエネルギーとレイノルズ応力の経時変化を求めるため、移流距離 130 m の長さの流速記録からそれらを 196 m 間隔で求め、 390 m の長さ移動平均して平滑化した。 130 m の記録に含まれているトレンドは3次多項式をあてはめ除去した。結果を Fig. 6, Fig. 7 に示す。

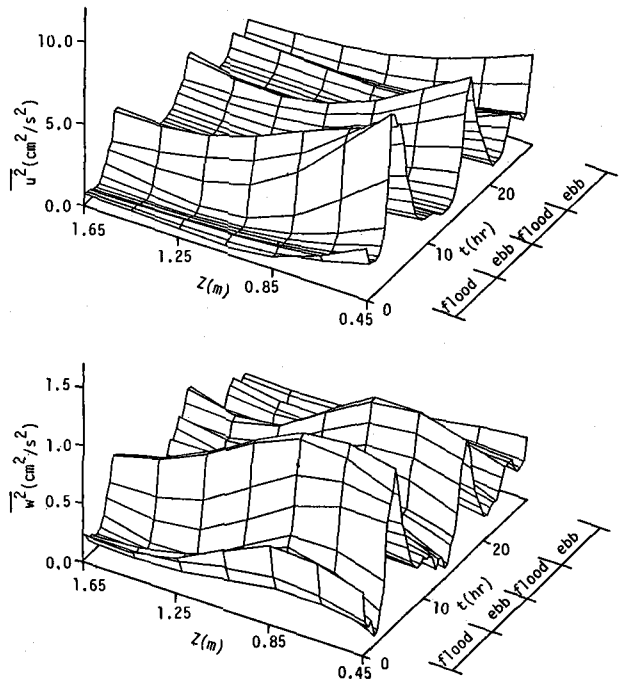


Fig. 6 Temporal variation of turbulent kinetic energy profile.

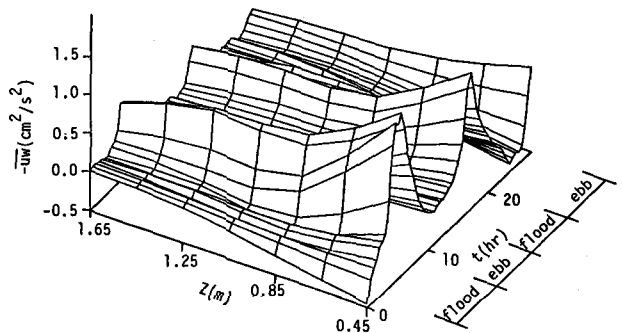


Fig. 7 Temporal variation of Reynolds stress profile.

Fig. 6が乱れエネルギー $\overline{u^2}$, $\overline{w^2}$, Fig. 7がレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ である。3.2のスペクトル経時変化からもわかるように、 $\overline{u^2}$, $\overline{w^2}$, $-\overline{uw}$ とも上げ潮の最大流速付近で最も大きくなる。乱れエネルギー、レイノルズ応力の経時変化は河床に近いほど大きく、最初の上げ潮の最大流速時、最も河床に近い測点における $\overline{u^2}$ の最大が進んでいるのを除いて、ピークの位置はどの測点でも同じである。 $\overline{u^2}$ と $-\overline{uw}$ の分布は上げ潮時、下に凸な形をしており、 $\overline{w^2}$ の分布は上に凸な形をしている。Gordon et al.³⁾が最大流速付近で測定したレイノルズ応力分布もFig. 7のレイノルズ応力分布と同様な分布である。

Bowden et al.⁴⁾は平均流速分布の測定から間接的にレイノルズ応力分布を求め、潮流の加速時には中央がへこんだ分布を、減速時には逆に中央部がふくらんだ分布を得ている。今回の観測ではこのような傾向はみられない。

Fig. 8, Fig. 9は上げ潮時の乱れエネルギー $\overline{u^2}$, $\overline{w^2}$, レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ を平均流速に対してプロットしたものである。左が経過時間4時～9時、右が16時～20.5時におけるものである。○が加速時、●が減速時を示す。

$Z = 0.45 \text{ m}$ における $\overline{w^2}$ ははっきりしないが、Gordon⁵⁾やAnwar et al.⁶⁾の結果と同様、加速時より減速時の方が乱れエネルギー、レイノルズ応力が大きく、その最大は平均流速の最大より遅れているのがわかる。遅れ時間はばらつきがあるが、1時間程度でGordon⁵⁾の結果と一致している。このように平均流速に対して乱れエネルギー、レイノルズ応力をプロットするとループを描くが、この傾向は $Z = 0.85, 1.25 \text{ m}$ におけるものの方が他の上下の測点におけるものより強い。ループを描く理由は平均流速の増加とともに発達した乱れが、平均流速が減少してもなお、その寿命時間の間存在し、すぐには消滅しないためと考えられる。

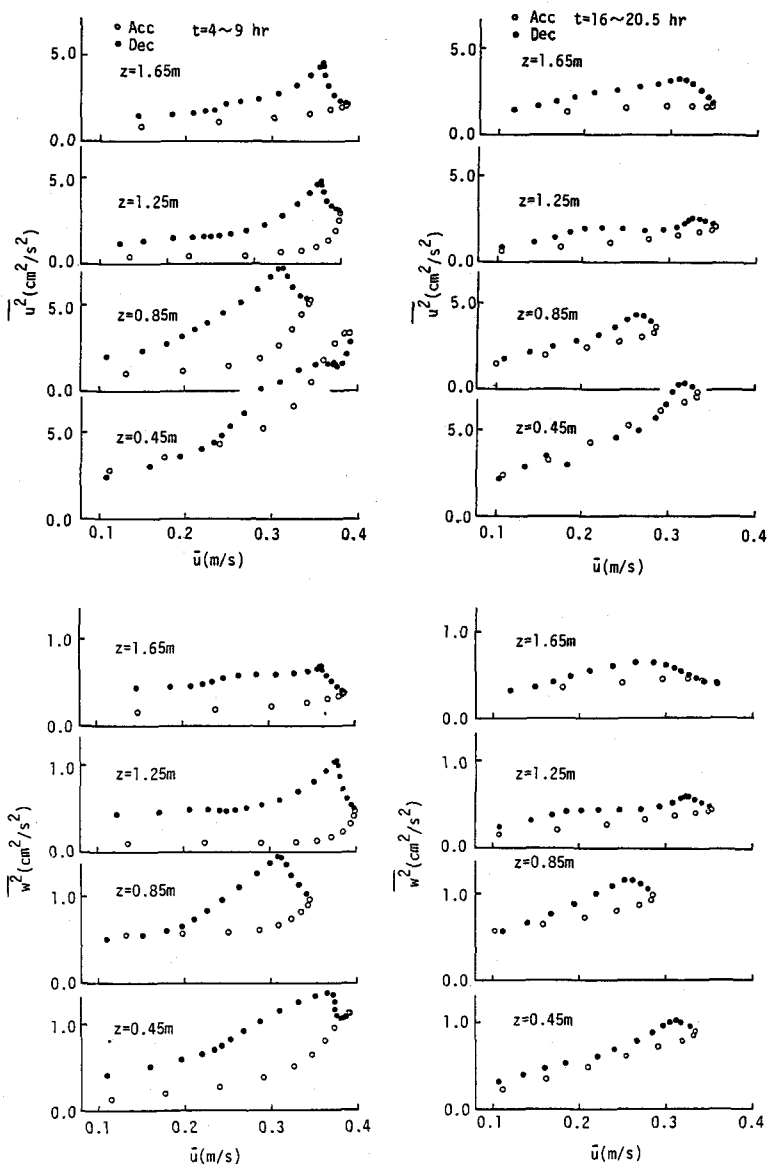


Fig. 8 Hysteresis of turbulent kinetic energy at four heights above the river bed.

4. 結 論

河川感潮部の乱流構造の実態を把握するため、太田川放水路において流速と塩分濃度の多点同時連続測定を行った。得られた結果を要約すると次のようである。

(1) 乱れエネルギー $\overline{u^2}$, $\overline{w^2}$ 、レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ とも上げ潮の最大流速より1時間程度遅れて最も大きくなる。加速時より減速時の方が $\overline{u^2}$, $\overline{w^2}$, $-\overline{uw}$ とも大きく、これらを平均流速に対してプロットするとループを描く。

(2) 上げ潮時、 $\overline{u^2}$, $-\overline{uw}$ の鉛直分布は下に凸な分布となり、 $\overline{w^2}$ の分布は上に凸な分布となる。潮汐に伴うこれらの経時変化は河床に近い測点ほど激しい。

(3) 平均流速の鉛直分布は主流方向の密度勾配のため、対数分布と異なる。上げ潮では河床近くまで流速が減少せず、下げ潮では水面付近で急に流速が大きくなり、河床付近の流速は小さい。

(4) 平均流速の経時変化は正弦曲線から大きく歪んでいる。河床付近では上げ潮の方が下げ潮より平均流速は大きく、周期平均流速は陸向きで、重力循環流が生じている。

(5) 鉛直方向の波数スペクトルは波数 1 m^{-1} 付近にピークをもち、低波数部のエネルギーは小さく、大きな変動は存在しない。

参 考 文 献

- 1) 川西澄, 余越正一郎: 河川感潮域における河床付近の乱流構造, 広島大学工学部研究報告, 33-1, 1984.
- 2) 山口隆美, 吉川昭: 非定常移流速度場における Taylor の凍結乱流仮説の適用と大動脈乱流のスペクトル解析への応用, ながれ, 3-2, 1984.
- 3) Gordon, C. M., and Dohne, C. F.: Some observations of turbulent flow in a tidal estuary, J. Geophys. Res., vol. 78, No. 12, 1973.
- 4) Bowden, K. F. et al.: The distribution of shearing stresses in a tidal current, Geophys. J. R. astr. Soc., vol. 2, 1959.
- 5) Gordon, C. M.: Sediment entrainment and suspension in a turbulent tidal flow, Marine Geology, vol. 18, 1975.
- 6) Anwer, H. O., and Atkins, R.: Turbulence measurements in simulated tidal flow, J. Hydr. Div. proc. ASCE, vol. 106, No. HY8, 1980.

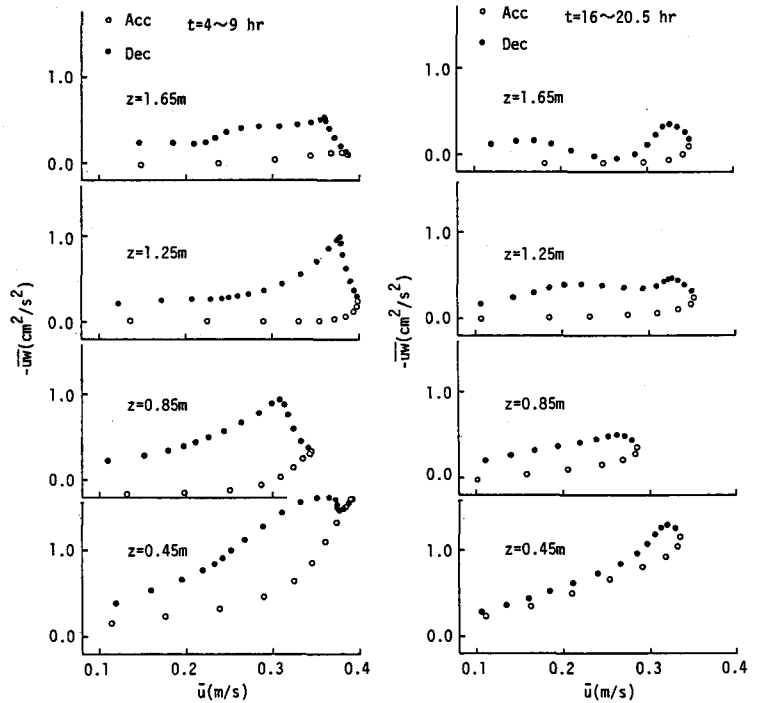


Fig. 9 Hysteresis of Reynolds stress at four heights above the river bed.