

浅水感潮域における非定常密度流

Unsteady Density Current in a Shallow Water Estuary

川西 澄*・安井 崇績**・余越 正一郎***

By Kiyosi KAWANISI, Takanori YASUI and Shōitirō YOKOSI

Simultaneous measurements of three components of instantaneous velocity, salinities and water temperature have been performed during a spring tide in the Ota River estuary which demonstrates a large tidal range and density gradients induced by salinity. Data are collected at various distances from the bed. Stability influence of stratification changes widely during the tidal cycle. Around low water slack, the estuary is well mixed. On the other hand, the estuary strongly stratifies near the water surface after high water slack in the ebb tide. The longitudinal density gradient, which drives an upstream bottom flow, is essential throughout all tidal phases. Owing to the longitudinal density gradient, the ebb flows in lower layers are small and bed-generated turbulence is weak.

Keywords : *tidal estuaries, density gradients, mixing length, eddy viscosity, unsteady*

1. はじめに

潮差の大きな感潮域における流れは、潮汐にともなって成層状態が時々刻々と変化する非定常密度流である。すなわち、水面勾配、塩分による密度勾配、平均流速および水深が大きく変化する複雑な流れ場であり、時間的・場所的に種々の混合形態が出現する。実験室では一般に、レイノルズ数の大きな潮汐流が得られないため、こうした流れ場の特性を室内実験から明らかにすることは困難である。

本論文では、潮差と平均水深の比が大きな感潮域における密度流の非定常挙動を明らかにするため、平均水深と同程度の潮差があり、非定常性の著しい太田川放水路において流速3成分、塩分濃度および水温の鉛直分布を潮汐1周期間連続的に観測し、時々刻々と変化する非定常密度流の鉛直構造を考察する。

* 正会員 工博 広島大学助手 工学部四類（建設系）
（〒739 東広島市鏡山1-4-1）

** 学生員 広島大学大学院工学研究科 環境工学専攻
（〒739 東広島市鏡山1-4-1）

*** 正会員 工博 広島大学教授 工学部四類（建設系）
（〒739 東広島市鏡山1-4-1）

2. 観 測

1995年7月28日11:20～23:40にかけて、広島市内における太田川放水路の河口から約2.5 km上流の水路中央部において、流速、塩分濃度、水温の鉛直分布を連続的に測定した。観測当日の潮汐は大潮にあたり、広島湾の干潮と満潮の時刻はそれぞれ16:14, 9:56と22:40である。太田川放水路は広島デルタの西部に位置し、河口から上流の市内派川までの距離はおよそ9 kmで、河口部の川幅はおよそ465mである。河口から上流約5 km区間の河道線形は直線である。観測位置を図-1に示す。観測地点の水路幅は290m、水路床縦断勾配は約1/3000である。

放水路上流部には祇園水門と大芝水門があり、平常時には太田川流量のほとんどは大芝水門から市内派川へ放流されている。一方、祇園水門は平常時の開度が10cmで、河川水の放水路への流入はわずかである。なお、太田川の感潮上限は河口より約18 km上流に建設されている高瀬堰である。

流速測定には米国SonTek社製の超音波ドップラー流速計(ADV)^{1,2)}を使用した。ADVはプローブから5 cm離れた0.25 cm³以下のサンプリングボリューム内の流速3成分を最高25 Hzのサンプリング周波数で同時測定できる。塩分濃度を測定するための導電率計と水温計センサーをADVとともに、ステンレス製のフレームに取り付け、測定地点にある水道管橋からロープで吊して測定を行った。導電率計と水温計センサーの時定数はそれぞれ0.1秒と0.25秒である。測点は相対高さ $z/h = 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の7点である。なお、水深 h は河床に設置した圧力変換器を用いて連続して測定した。

各測器のデータはサンプリング周波数25 Hzで同時AD変換し、磁気ディスクに収録した。1測点あたり5分の測定を行ない、7つの測点を一通り測定するのに約55分を要した。このように、各測点での測定値は同時刻のものではない。そこで、この時空間($t-z$)に分布している観測値を同時刻における値に内挿補間し、鉛直分布を求めた。

水中におけるADVの姿勢はフレームに取りつけてある2軸傾斜・方位角センサーから知ることができる。ADVにより測定された流速3成分は、これらのセンサーのデータを使い、座標変換を行なって、主流方向 u 、水路横断方向 v 、鉛直上方向 w の各流速成分に変換した。

3. 結果および考察

3・1 平均流速と密度の分布

観測時、祇園水門の開度は10 cmで淡水の流入はわずかであるが、7月22日の夕方から7月24日の朝にかけて水門が開けられ放水されていたために、通常より10 psu程度塩分濃度は低い状態にある。平均流速 $\bar{u}$ 、水深平均流速 $\bar{u}_d$ 、および水深 h の経時変化を図-2に示す。ただし、 $\bar{u}_d$ は0.02 $h \sim 0.8h$ にわたる平均値である。また、図-2(c)中のイタリック体の数字は時刻を表わしている。なお、 u は上げ潮を正としてある。平均水深3 mに対し、潮差は約4 mあり水深の時間的変化は非常に大きい。水深平均流速は上げ潮の方が下げ潮より大きく、約1.5倍の大きさである。これは主に、潮差と平均水深の比が大きいために非線型性が強く、潮汐波が正弦波から変形しているためであると考えられる³⁾。

塩分濃度と水温から求めた σ_t の鉛直分布を図-3に示す。水温の変化は約3°Cと小さいので、 σ_t の変化はほとんど塩分濃度変化の結果である。図-3から成層度が潮汐1周期の間に大きく変化しているのがわかる。すなわち、満潮付近の上層に形成されている密度成層が、流速の増加とともに破壊され、強混合状態になる。流速が減少し、干潮時になっても強混合状態のままであり、再び満潮になるまで大きな鉛直方向密度勾配はみられない。干潮時、流速が小さいにもかかわらず強混合状態にあるのは、非線形性のために流速波形がひずみ、最大流速の起こる時刻が干潮に近いことと、水深が小さいため、底面で生成される乱れによる塩分の混合拡散が水深全体にわたって大きいためであろう。

図-2(a),(c)の平均流速分布の経時変化をみると、下げ潮時、流速の最大は水面付近の方が下層より位相が進んでおり、流速の鉛直勾配もかなり大きい。また、底層の流速は上層の流速にくらべてかなり小さ

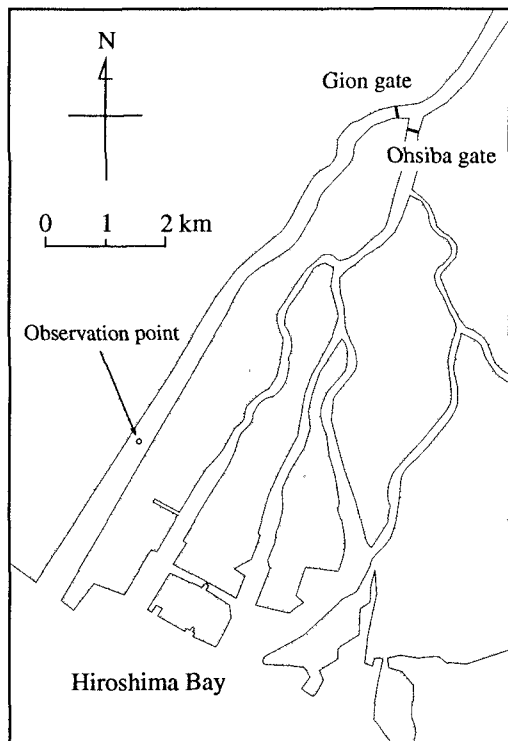


図-1 観測地点

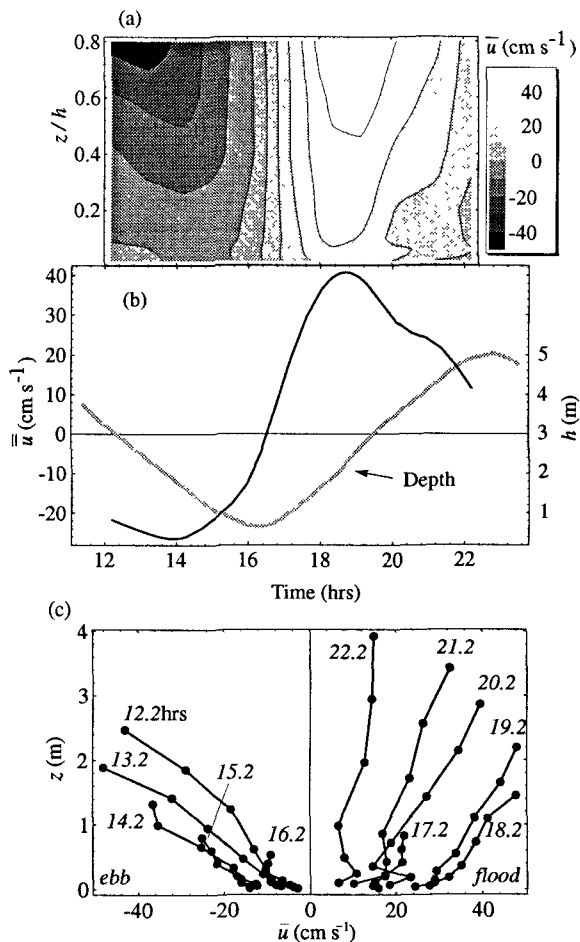


図-2 平均流速の鉛直分布と水深平均流速
および水深の経時変化

く、その時間的変化も小さい。こうした流動特性を引き起こす原因のひとつとして、主流方向の密度勾配が考えられる。すなわち、下げ潮の流動特性を図-3の密度分布とあわせて考えると、次のようになる。

主流方向の圧力勾配 $\partial p / \partial x$ は

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \int_z^h \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (1)$$

で表われ、右辺第2項の密度勾配による圧力勾配（傾圧成分）は深さとともに大きくなる。ここに、 η は水位である。下げ潮の初期には水面勾配によってまず、低塩分水が表層を流れ始める。この時、水深が大きいので主流方向の密度勾配による圧力勾配も大きい。この主流方向の圧力勾配のために低層の流速はおさえられ、上層に比べてかなり小さい。したがって、後で述べるように下げ潮時、底面で生成される乱れも弱い。ここには示さないが、13.2時におけるレイノルズせん断応力の鉛直分布は水面に向かって大きくなっており、表層の低塩分水に下層が引きずられる流れになっていることがわかる。表層の低塩分水の流速がある程度大きくなると、急激に塩分、運動量の鉛直混合が起こり、密度勾配、流速勾配ともに減少する。

図-4に $z/h = 0.8$ におけるレイノルズせん断応力 $-\overline{u'w'}$ と塩分濃度の鉛直乱流フラックス $\overline{s'w'}$ の経時変化を示す。時刻13時の塩分濃度の鉛直フラックスは他の時刻の濃度フラックスと比べて非常に大きな値を示しており、この時刻に活発な流体の鉛直混合が起こっていることを示している。この鉛直混合の結果、上層における密度と流速の鉛直勾配が急激に減少しているのが図-2 (c)、3 (b) に示す鉛直分布からわかる。

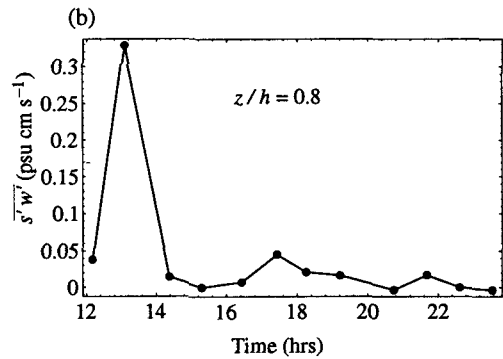
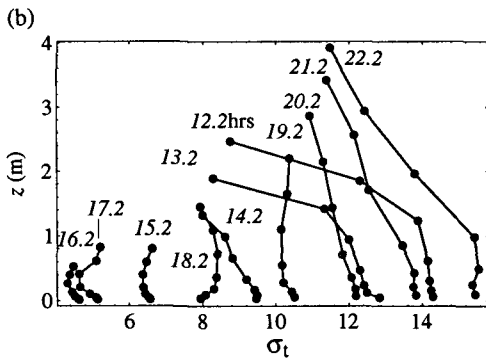
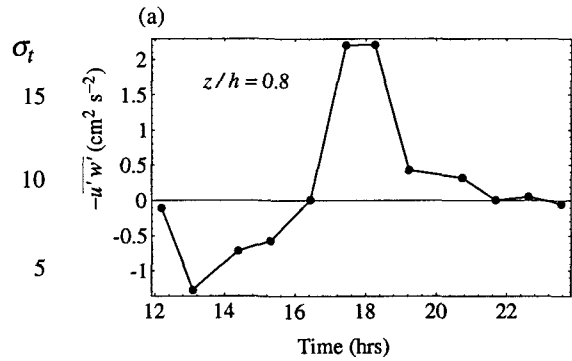
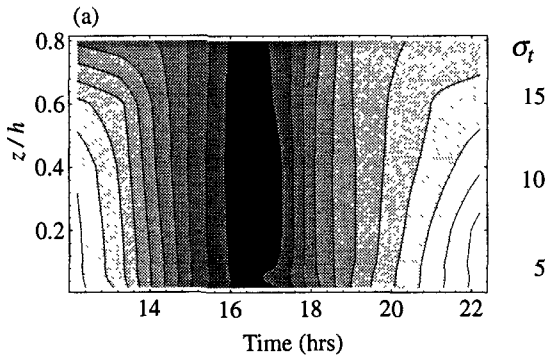


図-3 密度の鉛直分布の経時変化

図-4 鉛直乱流フラックスの経時変化

3・2 混合長と鉛直渦粘性係数および乱れエネルギー生成率

運動量や物質の輸送を考えるには、混合長さスケールを知らなければならない。波数で重み付けされた鉛直方向スペクトルがピークとなる位置での波数 k_m から鉛直方向の混合長を $\lambda = 0.85/k_m$ ⁴⁾ で求めた結果を図-5 に示す。図-5 (a) に示されている下げ潮時の鉛直分布をみると、下げ潮初期（時刻 12.2, 13.2 時）には λ は水面に向かって増大しており、特に塩分、運動量の鉛直フラックスが大きくなっている 13.2 時では $z/h = 0.8$ の λ は他の測点にくらべてかなり大きい。上層にみられる成層が破壊され下層と混合すると、 $z/h > 0.4$ で λ はほぼ一定の分布となる。Smith ⁵⁾ は一様流における鉛直方向の長さスケールの分布として、

$$\lambda = 0.124h \operatorname{erf} \left(\frac{4z}{h} \right) \quad (2)$$

を与えている。強混合状態になった後の分布形状は (2) 式の分布形に近いが、その大きさは小さく、一様流の混合長の 60% 程度である。

図-5 (b) は上げ潮時の混合長の鉛直分布を示したもので、太い実線で示した曲線は $0.08h \operatorname{erf}(4z/h)$ を表わしている。最大流速付近である 19.2 時では、値はやや小さいもののほぼ (2) 式の Smith の分布 ⁵⁾ で表わさそうである。満潮に近づき流速が減少するに従い、 λ は減少し、一様な分布になっている。

一般に、現地観測から平均流速勾配の信頼できるデータを得ることは困難であるが、非定常流ではさらに、平均流速を求める際の平均化時間を大きくできないために、 $-\overline{u'w'} = N_z(d\bar{u}/dz)$ から求められる鉛直渦粘性係数 N_z は大きな誤差を含む可能性がある。そこで、本研究では N_z を McPhee ⁴⁾ に従い、摩擦速度 u_* と混合長 λ の積 $N_z = u_*\lambda$ で求めた。結果を図-6 に示す。下げ潮時には鉛直渦粘性係数は水面付近で大きな値を取り、著者らが 1995 年 1 月の渇水時に観測した分布 ⁶⁾ とは大きく異なっている。図-2 (a) に示した流速分布に対応して、 N_z が最大となる時刻は上層の方が下層より早い。上げ潮時の分布形は 2 つ

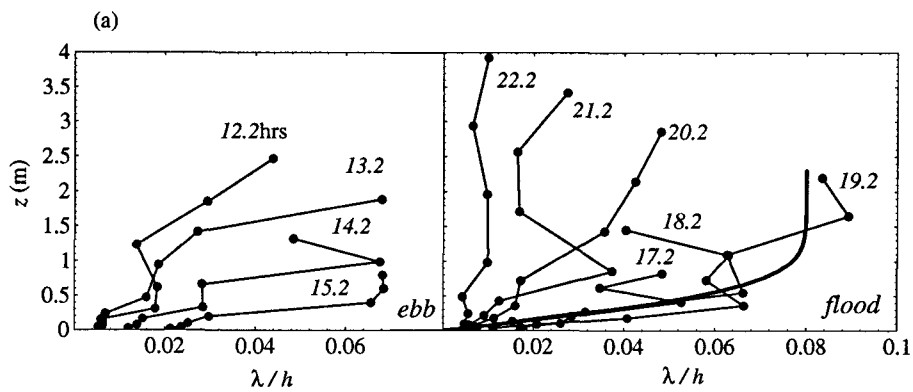


図-5 混合長の鉛直分布の経時変化

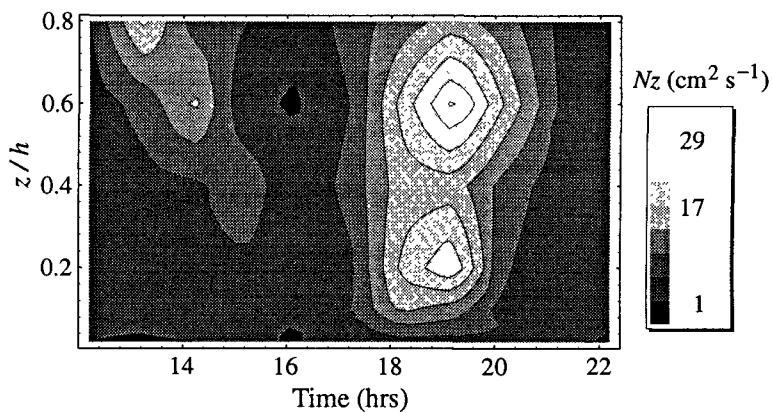


図-6 鉛直渦粘性係数の鉛直分布の経時変化

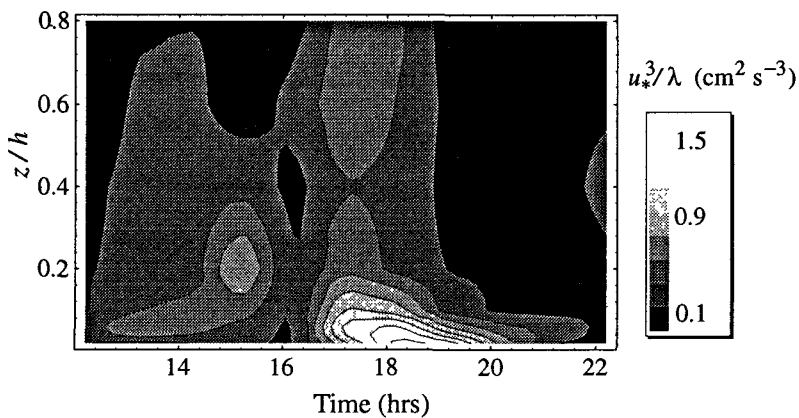


図-7 乱れエネルギー生成率の鉛直分布の経時変化

のピークを示しているものの、比較的定常一様流の分布形に近い。しかし、その大きさは小さく渦水時⁶⁾の半分程度である。

流速勾配を u_*/λ で与えると、乱れエネルギーの生成率は

$$-\overline{u'w'}\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{u_*^3}{\lambda} \quad (3)$$

となる。(3)式を用いて計算した乱れエネルギー生成率の分布を示すと図-7のようである。上げ潮時には定常一様流と同様、底面で乱れエネルギーの生成は最も大きくなっているが、下げ潮時にはエネルギー生成率のピークは底面から離れた位置にあり、底面での乱れの生成は小さいことがわかる。また、ピークの大きさも上げ潮時におけるピーク値の3分の1程度と小さい。このような下げ潮時における乱れエネルギー生成率の分布特性は、主に主流方向の密度勾配によって引き起こされているものと考えられ、下げ潮時、底面で生成される乱れは非常に弱いことを示している。

4. おわりに

水深変化の大きな感潮域における非定常密度流の挙動に関する知見を得るため、平均水深と同程度の潮差がある太田川放水路において、流速、塩分、水温の鉛直分布を潮汐1周期間連続的に測定した。

成層状態は潮汐とともに時々刻々と変化し、水深が大きくなる満潮付近の上層で成層化がすすむことがわかった。上げ潮と下げ潮では流動・乱流特性は大きく異なる。すなわち、下げ潮初期においては上層にかなり強い成層がみられ、表層の低塩分水が下層にくらべて大きな流速で流下する。上層の速度シアがある程度大きくなると、成層が破壊され強混合状態となる。一方、上げ潮時の流れは干潮時が強混合状態にあり、満潮付近まで強い成層化は起こらないため、一様流に近い流動特性を示す。

主流方向の密度勾配のために、下げ潮時、底層の流れは弱く、底面での乱れの生成は押さえられる。下げ潮時の乱れエネルギー生成率は上げ潮時における値の3分の1程度にすぎない。また、鉛直渦粘性係数は表層で大きくなり、上げ潮時の鉛直分布と異なる。

参考文献

- 1) Lohrman, A. et al.: Acoustic-Doppler velocimeter (ADV) for laboratory use, Proc. Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation, New York, pp.351-365, 1994.
- 2) Kraus, N. C. et al.: New Acoustic meter for measuring 3D Laboratory Flows, J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol.120(3), pp.406-412, 1994.
- 3) Lamb, H.: 流体力学2, 東京図書, 34-35, 1981.
- 4) McPhee, M. G.: On the turbulent mixing length in the oceanic boundary layer, J. Phys. Oceanogr., Vol.24(September), pp.2014-2031, 1994.
- 5) Smith, T. J.: On the representation of Reynolds stress in estuaries and shallow coastal seas, J. Phys. Oceanogr., Vol.12(August), pp.914-921, 1982.
- 6) 川西 他: 河口内における往復流の鉛直構造, 海岸工学論文集, 第42巻, 第1号, pp.411-415, 1995.