

太田川感潮部における浮遊砂泥と組織乱流

Suspended Sediment and Coherent Motion in the Turbulent Boundary Layer of the Ota River Estuary

広島大学工学部 川西 澄 K.Kawanisi

広島大学工学部 余越正一郎 S.Yokosi

1. はじめに

自然河川では洪水時に大規模乱流の一種である boil が、その周辺より高濃度の浮遊土砂を含んでいるのが観察される¹⁾。このことからわかるように、河川における土砂の浮遊現象は、乱流構造と深く関係しており、浮遊土砂の運動機構を burst などの組織乱流と結びつけて解明しようとする研究^{2),3)}が行われている。潮汐の影響を受ける河川感潮部の流れは非定常であり、河床砂泥は浮上と堆積をくり返し、上流、下流へと運ばれる。感潮河川乱流の構造は時間とともに大きく変化し、また塩分の存在による微細粒子のフロック形式 (flocculation) の問題もあり、河川感潮部における浮遊土砂量を算定することは非常に困難であり、その浮遊現象の実態もよくわかっていない。本研究は、潮汐にともなう河床砂泥の非定常な浮遊特性を、組織乱流との関連とともに検討したものである。

2. 観測方法

河床付近の浮遊砂泥濃度と流速、塩分濃度の同時連続観測を1986年12月2日～3日の大潮時に行った。観測地点は太田川放水路河口から約3 km上流の河川中央部である⁴⁾。

浮遊砂泥濃度を連続して測定するため、散乱光式濁度計(時定数0.5秒、北斗理研製)を使用した。濁度計は河床から0.1m(水深の約5%で浮遊砂濃度の基準面高さに相当する)の高さに、センサー前面を横方向に向けて取付け、2成分電磁流速計(時定数0.05秒)と導電率計を0.15m, 0.25m, 0.55mの高さに設置した。使用した濁度計は浮遊物質の散乱光の強さから浮遊物質濃度を求めるもので、センサー前面から5～10cm以内の浮遊物質の散乱光を受光する。

濁度計センサー前面のガラスが汚れてくると、見かけ上濁度値が増加し、正確な浮遊砂泥濃度の測定ができなくなる。そこで、観測開始前と終了後に清水中に濁度計センサーを投入し、観測前後で濁度の示指値に変化がないことを確認した。また、定期的に採水器(容量1リットル)で河床付近の水を採水し、浮遊物質濃度を求めた。この採水によって求めた浮遊物質濃度と濁度計から得られた濃度を比較したところ、両者の間に大きな差はなく、濁度計の出力から求めた浮遊砂泥濃度は信頼できるものであると考えられる。

3. 潮汐にともなう河床砂泥の非定常浮遊特性

(1) 流速と浮遊砂泥濃度の経時変化

観測地点における河床材料の粒度分布を Fig.1 に示す。ただし、干潮時に、採泥器を使用して採取した土砂から求めたものである。採取した土砂粒子の中央粒径は0.36mm, 均等係数は2.4である。

河床から0.15mの高さにおける主流方向流速(U)と水深、浮遊砂泥濃度の経時変化を Fig.2 に示す。ただし、流向は上げ潮、鉛直上向きを正とした。

浮遊砂泥濃度は平均流速の大小に応じて、増減しており、潮汐流によって河床砂泥が浮上しているのがわかる。平常時放水路に流入する河川水はほとんどない

から、放水路内の濁度の上昇は大部分河床砂泥の浮遊によると考えられる。Fig.2をみると、日潮不等のため、最初の上げ潮と最後の下げ潮では平均流速が小さく、浮遊砂泥濃度の増加はほとんどみられない。また、満

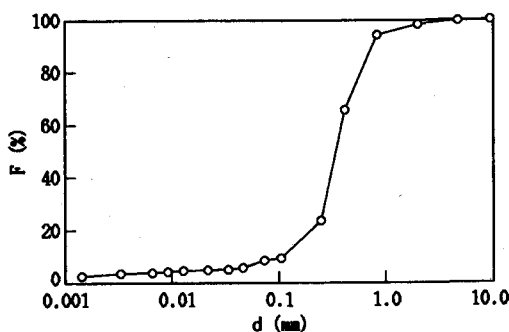


Fig. 1 Grain size distribution of sediment.

潮時より干潮時の方が浮遊砂泥濃度は大きい。浮遊砂泥濃度の変動は Gauss 的ではなく、間欠的な濃度の上昇が認められる。

Fig.3に3測点におけるレイノルズ剪断応力経時変化を示す。河床付近では、下げ潮時より上げ潮時の方がレイノルズ応力が大きい。このため、河床砂泥の浮上は活発で、上げ潮の平均浮遊砂泥濃度の最大は、下げ潮の最大濃度の2倍程度である。

河川感潮部の流れは非定常であり、潮汐とともに河床砂泥は浮上と堆積をくり返すが、浮遊砂泥濃度は、平均流速、底面剪断力に対して遅れて変化するとされている。平均流速、レイノルズ応力が大きく、浮遊砂泥濃度の増加が明瞭に認められる最初の下げ潮と、それに続く上げ潮における平均浮遊砂泥濃度を、高さ0.15mの平均流速に対してプロットしたのが Fig. 4、高さ0.15mのレイノルズ応力に対してプロットしたのが Fig.5である。矢印は時間の経過方向を表し、平均流速、レイノルズ応力の絶対値が時間とともに増加している状態を○、減少している状態を●で示してある。図の左側が下げ潮時、右側が上げ潮時におけるものである。

下げ潮時、平均浮遊砂泥濃度は平均流速、レイノルズ応力に対して遅れて変化しており、干潮の直前に浮遊砂泥濃度は最大になる。最大浮遊砂泥濃度は平均流速の最大に対し、約1時間15分、レイノルズ応力の最大に対し約25分の遅れがみられる。一方、上げ潮では逆に、平均浮遊砂泥濃度の最大は平均流速、レイノルズ応力の最大より僅かではあるが、早く生じている。進み時間は、平均流速に対し約16分、レイノルズ応力に対し約26分である。

以上のように、平均流速と平均浮遊砂泥濃度の位相がずれると、平均流によって運ばれる浮遊砂泥フラックス $\bar{C}\bar{U}$ は減少する。濁度と流速の検出位置が一致していないので多少問題もあるが、高さ0.15mの位置における平均流速 $\bar{U}$ を使って、平均流による浮遊砂泥濃度フラックス $\bar{C}\bar{U}$ の経時変化を求めた。結果を Fig.6に示す。

平均流によって運ばれる浮遊砂泥のフラックスは下げ潮より上げ潮の方が大きく、上げ潮時のフラックスの最大は、下げ潮時のその3倍弱である。従って、潮汐一周平均では、河床付近の浮遊砂泥は陸向きに運ばれている。

(2) 浮遊砂泥濃度の乱流フラックス

河床から0.15mの高さにおける流速を使って浮遊砂泥の乱流フラックスを求めた。Fig.7に、乱れによる主流方向と鉛直方向の浮遊砂泥フラックス cu , cw の経時変化を示す。図の上が陸方向、下の図が鉛直上方向の

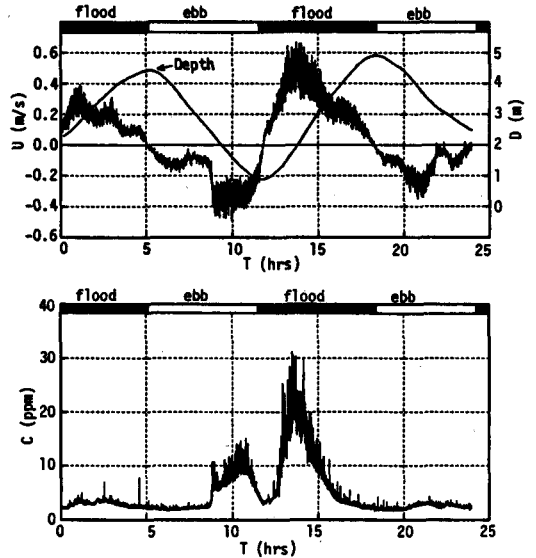


Fig.2 Temporal variations of depth, longitudinal velocity and concentration of suspended sediment.

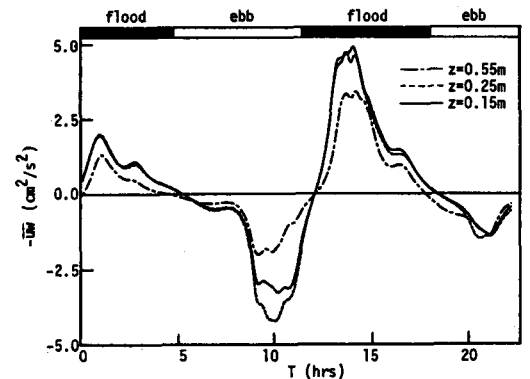


Fig.3 Temporal variations of the Reynolds stress at three heights(z) above the river bed.

乱流フラックスである。浮遊砂泥の乱流フラックスは平均浮遊砂泥濃度の大きい最初の下げ潮とそれに続く上げ潮以外の時間ではほとんど0である。下げ潮時より上げ潮時の方が乱流フラックスの絶対値は大きく、上げ潮時の最大値は、下げ潮時の最大値の6倍程度である。潮汐流によって河床砂泥は浮上、上昇するから、鉛直方向の浮遊砂泥フラックスは、正の値を示している。これに対し、主流方向の浮遊砂泥フラックスは、下げ潮時は正、上げ潮時には負となる。これは、河床砂泥を浮上させる流体が平均流速より遅いため(下げ潮時 $u > 0$, 上げ潮時 $u < 0$)で、浮遊砂泥は平均流速より遅い速度で移流されている。最初の下げ潮時とそれに続く上げ潮時について、乱れによる鉛直方向の浮遊砂泥フラックスと平均浮遊砂泥濃度の関係を、Fig. 4と同様に示したのが Fig. 8である。上げ潮時、平均浮遊砂泥濃度は、鉛直方向の乱流フラックスと同時に最大になっており、両者の間に位相差はみられない。これに対し、下げ潮時では、平均浮遊砂泥濃度の最大は、鉛直乱流フラックスの最大より遅れて生じている。

次に、浮遊砂泥の鉛直乱流フラックスと平均流速の関係を Fig. 9に示す。下げ潮時、鉛直乱流フラックスは、平均流速とほとんど同時に最大になるが、流れの加速期より減速期の方が、フラックスは小さい。上げ潮時の鉛直乱流フラックスは平均流速より早く最大になっており、これは、流れの加速期より減速期の方がレイノルズ応力が大きく、河床堆積物の浮上もレイノルズ応力と同様な履歴を示すとの従来⁶⁾の予想⁶⁾に反する結果である。

4. 組織乱流と河床砂泥の浮遊

(1) 組織乱流の検出法

最近の Head and Bandyopadhyay⁷⁾による可視化研究から、乱流境界層の大規模構造は細長く引き伸ばされたヘアピン渦の集合であると考えられる。ejection は全くランダムに発生するのではなく、接近した ejection の集合が存在する^{5), 8)}。(ejection の発生確率分布は指数分布からずれ、形状母数が1より小さなガンマ分布で近似される。) ejection が大規模構造中に存在するヘアピン渦によって引き起こされると考えれば、接近した ejection の集合が大規模乱流に対応することになる。Bogard and Tiederman⁸⁾はこの接近し

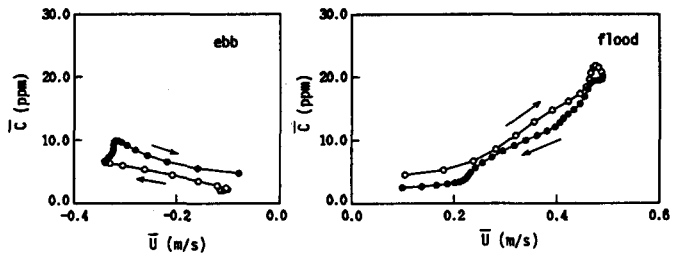


Fig. 4 Hysteresis of the mean concentration of suspended sediment with mean velocity.

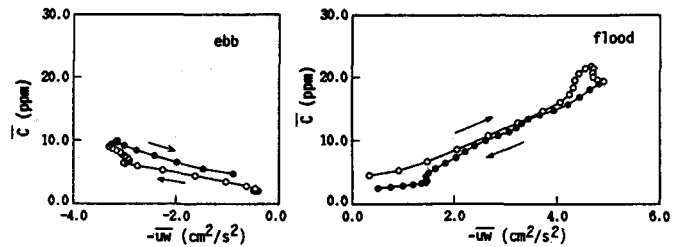


Fig. 5 Hysteresis of the mean concentration of suspended sediment with the Reynolds stress.

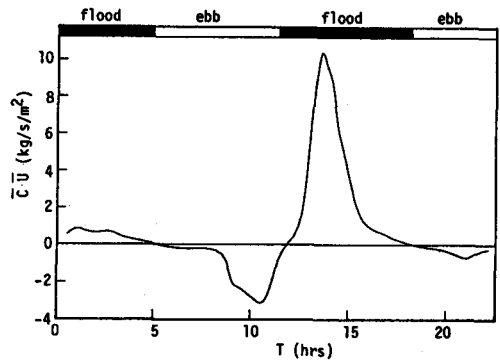


Fig. 6 Temporal variation of mean component of the suspended sediment flux.

た ejection の集合を 1 つにまとめることによって burst を検出する方法を提案し、検出された burst が可視化で観察されるものと一致することを示している。そこで本研究では、Bogard and Tiederman⁸⁾の方法を用いて、大規模乱流の検出を行った。大規模乱流 (ejection の集合) の検出関数の一例を流速変動、瞬間レイノルズ応力とともに Fig.10 に示す。ただし、 x は移流距離 $\bar{U}t$ である。

(2) 大規模乱流と浮遊砂泥濃度

大規模乱流が検出されたときの変動浮遊砂泥濃度 $\langle c \rangle$ を条件付平均

$$\langle c(x, z) \rangle = \frac{\int_0^x c(\xi - x, z) I(\xi, z_0) d\xi}{\int_0^x I(\xi, z_0) d\xi} \quad (1)$$

から求めた。ここに、 x はずらし移流距離 $x = \bar{U} \tau$ 、 I は Fig.10 に示したような大規模乱流の検出関数で、 z_0 で大規模乱流が検出されたとき $I = 1$ 、それ以外は $I = 0$ である。最も河床に近い測点 $z_0 = 0.15\text{m}$ で大規模乱流が検出されたときの条件付平均変動濃度の経時変化を Fig.11 に示す。図の上が ejection の集合が検出された時、下の図が sweep の集合が検出された時のものである。ただし、濃度変動の標準偏差 c' で無次元化しており、sweep の集合を検出関数とした下の図は見やすくするため $\langle c \rangle$ の符号を逆にしてある。条件付平均値は浮遊砂泥濃度が最大になる 2 回目の上げ潮時以外の時間では大きな値は示していない。

浮遊砂泥濃度が最大になる 2 回目の上げ潮時、 $T = 13.8\text{hrs}$ における条件付平均値を Fig.12 に示す。図の上を示した ejection の集合検出時の条件付平均値は移流距離で 10m、時間にして 21 秒程度 ejection の集合より早く最大になっている。 $\langle c \rangle$ の変化はずらし移流距離 x に対し左右対称ではなく、大規模乱流の前面で浮遊砂泥濃度の増加は急で、後面ではゆるやかである。

一方、sweep の集合に対しては、sweep の集合の検出とほぼ同時に、条件付平均値は最小値を示している。条件付平均濃度の変化は sweep の集合の後面の方が前面よりやや急である。

同一の大規模乱流に属する ejection の最大発生時間間隔^{5), 8)}を時定数にもつフィルターによって、流速変動、濃度変動を大規模な組織成分と小規模成分に分離し、大規模乱流と小規模乱流による浮遊砂泥の鉛直フ

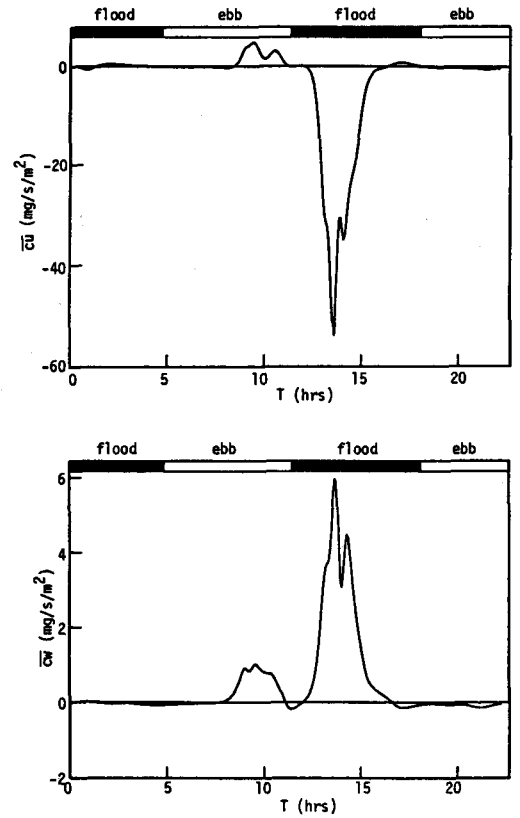


Fig. 7 Temporal variations of $\overline{cu}$ (upper) and $\overline{cw}$ (lower).

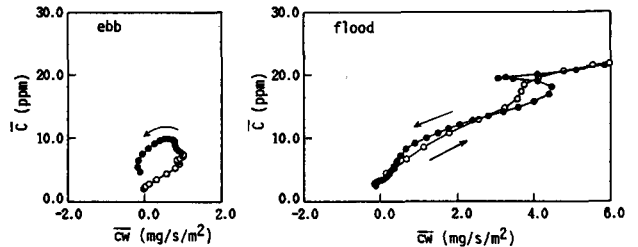


Fig. 8 Hysteresis of $\overline{C}$ with $\overline{cw}$.

ラックス $\overline{c_c w_c}$, $\overline{q w_l}$ を求めた。結果を Fig.13 に示す。小規模乱流によるフラックス $\overline{q w_l}$ はほとんど 0 で、浮遊砂泥の鉛直方向への輸送は、ほとんど大規模乱流によって行われていることがわかる。

5. おわりに

本研究は、乱流構造と密接な関係があり、工学上重要な問題である河床砂泥の潮汐にともなう浮遊について検討したものである。

潮汐にともない河川感潮部の流況や乱流構造は時々刻々変化するため、河床砂泥の浮遊も著しい非定常性を示す。潮差の大きさと上げ潮であるか下げ潮であるかによって、浮遊砂泥濃度は大きく異なる。平均流速が大きく、乱れの強い上げ潮時は、下げ潮時にくらべ、平均浮遊砂泥濃度で 2 倍、平均流による輸送率で 3 倍弱の大きさがある。

平均浮遊砂泥濃度 $\overline{C}$, 浮遊砂泥フラックス $\overline{C U}$, $\overline{cw}$ の経時変化と平均流速, レイノルズ応力の経時変化の間には位相差がある。 $\overline{C}$, $\overline{C U}$, $\overline{cw}$ の最大は、平均流速, レイノルズ応力の最大に対し、上げ潮では進んで、下げ潮では遅れて生じる。上げ潮時、平均浮遊砂泥濃度は、浮遊砂泥の鉛直乱流フラックス $\overline{cw}$ と同時に最大になり位相差はないが、下げ潮では $\overline{cw}$ より遅れて最大になる。

最も河床砂泥の浮上が活発な上げ潮の最大流速時、大規模乱流の検出関数を用いた浮遊砂泥濃度の条件付平均値の最大は、ejection の集合の中心より下流側で生じ、条件付平均濃度は下流側で急激に上昇し、上流側では緩やかに減少する。一方、sweep の集合に対する条件付平均濃度の位相差は僅かで、濃度変化は大規模乱流の下流側で緩やか、上流側で急である。

鉛直方向への浮遊砂泥の乱流輸送は、ほとんど大規模乱流によって行われている。

今後、潮汐にともなう河床材料の粒度分布の変化や、河川感潮部の流れは、非定常性ととも空間的な非一様性も強いもので、河道内全体にわたる河床堆積物の浮遊特性を明らかにする必要がある。

参考文献

1) Jackson, R. G.: Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows, J. Fluid Mech., Vol. 77, pp. 531-560,1976.

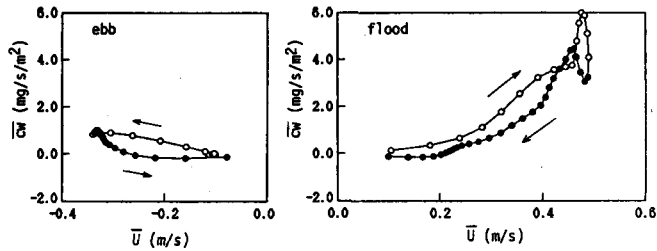


Fig. 9 Hysteres of $\overline{cw}$ with $\overline{U}$.

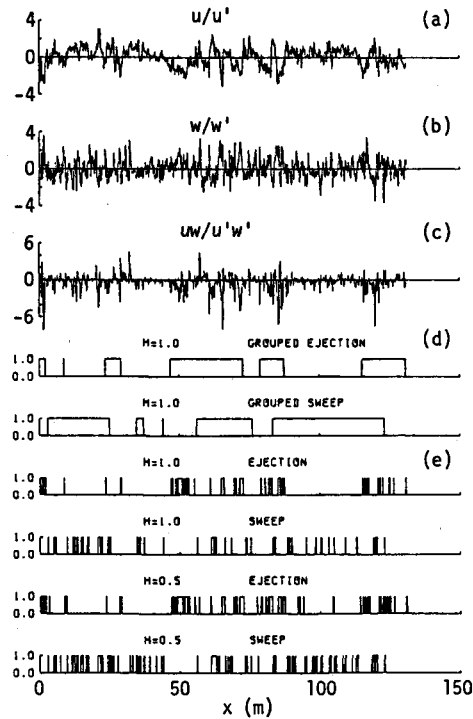


Fig.10(a)–(c)Typical analogue records of u , w and uw .

(d)The detection functions of large-scale coherent structure.

(e)The ejections and sweeps detected by the Quadrant technique.

- 2) Gyr, A. : Towards a better definition of the three types of sediment transport, J. Hydro. Res., Vol. 21, No. 1, pp. 1-15, 1983.
- 3) Heathershaw, A. D. and Thorne, P. D. : Seabed noises reveal role of turbulent bursting phenomenon in sediment transport by tidal currents, Nature, Vol. 316, pp. 339-342, 1985.
- 4) 川西 澄・余越正一郎：太田川河口部の非定常乱流構造, 第29回水理講演会論文集, pp. 845-850. 1985
- 5) 川西 澄・余越正一郎：河川感潮部の組織乱流, 広島大学工学部研究報告, Vol. 35-1, pp. 116-129, 1986.
- 6) Gordon, C. M. : Sediment entrainment and suspension in a turbulent tidal flow, Marine Geology, Vol. 18, pp. M58-M64, 1975.
- 7) Head, M. R. and Bandyopadhyay, P. : New aspects of turbulent boundary-layer structure, J. Fluid Mech., Vol. 107, pp. 297-338, 1981.
- 8) Bogard, D. G. and Tiederman, W. G. : Burst detection with single-point velocity measurements, J. Fluid Mech., Vol.162, pp. 389-413, 1986.

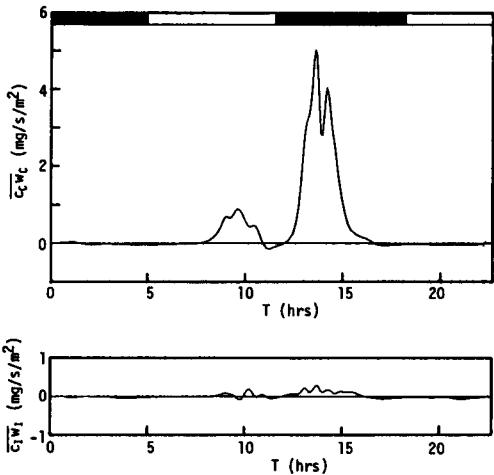


Fig.13 Temporal variations of the vertical sediment fluxes by large-scale and small-scale turbulence.

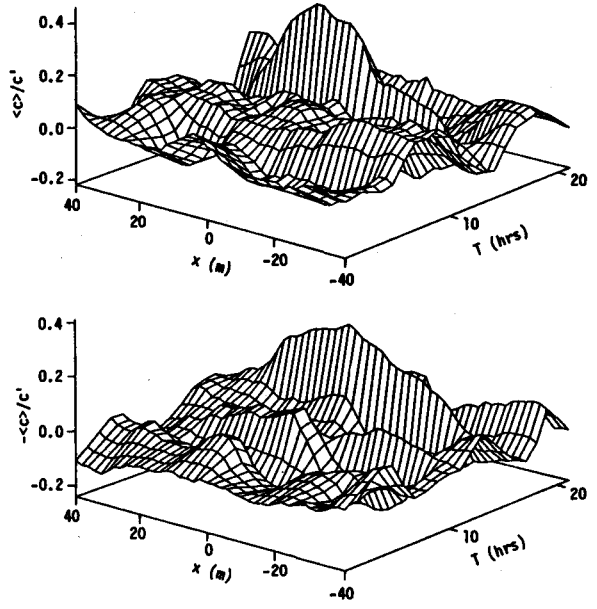


Fig.11 Temporal variations of conditional average of c .
Upper : for ejection-groups.
Lower : for sweep-groups.

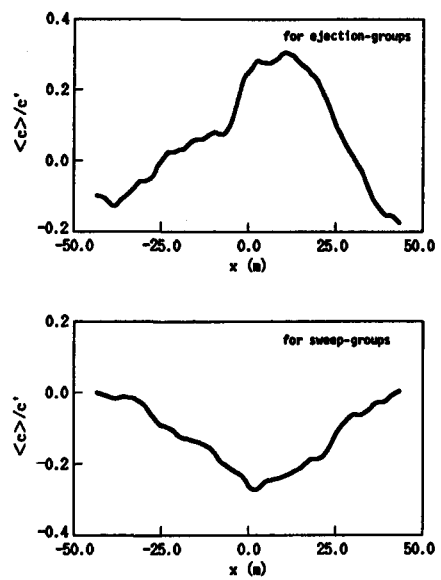


Fig.12 Conditional average of c . (13.8hrs)
Upper : for ejection-groups.
Lower : for sweep-groups.