内湾河口部浅海域の夏期の水塊構造と流れの特性

Structures of Water Mass and Current in Shallow Waters off River Mouth Located in a Bay

青木伸一¹・矢部泰貴²・Syamsidik³・陸 眞姫⁴・井上隆信⁵

Shin-ichi AOKI, Taiki YABE, SYAMSIDIK, Jin-Hee YUK and Takanobu INOUE

Intensive field measurements of water quality and current were carried out in summer 2010 off the Toyogawa river mouth located at the head of Mikawa Bay. Structures of water density and dissolved oxygen concentration and their variations were discussed based on the data. The residual currents were compared with wind data and freshwater discharge from the river. The estuarine circulation observed in the measurement seemed to be caused mainly by wind action, but large amount of freshwater discharge may cause current toward the river mouth near the bottom. Dissolved nutrients especially phosphorus may be transported upstream by the bottom flow and used in the primary production in shallow waters.

1. はじめに

内湾に流入する河川の河口部に広がる浅海域は、湾全体の生物生産や物質循環において非常に重要な役割を担っているが(鈴木ら, 2002), 河川からの間欠的な淡水流入や沖合底層の貧酸素水塊の影響を強く受けるため, 特に夏期は時間的・空間的に環境変化が大きく, その実態把握が難しい水域である(八木ら, 1998). 陸ら(2010)は, 三河湾奥に位置する豊川河口部で現地観測を実施し, エスチュアリー循環の発生要因および循環にともなう栄養塩の輸送過程を調べた. その結果, エスチュアリー循環の強さ(流量)は河川流量よりもむしろ風との相関が高いこと, およびエスチュアリー循環は貧酸素状態の底層水に含まれる高濃度の溶存態リンを河口部に戻す機能を有していることなどを示した. しかしながら, 限られた地点・頻度での観測であったため, 詳細な水塊構造や流れの変動特性については, 全体像を明らかにするまでには至っていない.

本研究は, 河口部で夏期に形成される密度構造や溶存酸素濃度の面的な分布を明らかにするとともに, それらが淡水流入および風の影響を受けてどのように変化するか, またその変化をもたらす流れ, 特にエスチュアリー循環がどのように発生・発達するかを明らかにすることを目的として, 三河湾における現地観測データをもとに検討を行ったものである.

2. 現地観測の概要

豊川河口沖での水質の観測を, 2010年7月12日~10月16日の間に約10日間隔で計11回実施した. 観測点は, 図-1に示すように, 豊川の流軸上に約1km間隔で設定した8地点であり, 河口から約10kmの範囲内にある. 観測項目は, 塩分, 水温, DO, クロロフィル濃度, 濁度および栄養塩濃度であり, 栄養塩濃度以外は船上から計測機(ASTD-102, JFEアドバンテック社製)を投入して鉛直プロファイル測定した. 栄養塩濃度については表層および底層(それぞれ水面および海底から1mの位置)から採取した水を分析して求めた. 流れの観測は, 8月1日から開始した. 河口沖(A点: 34°46'18.60"N, 137°17'51.30"E)およびその南側約850mの干潟沖合地点(B点: 34°45'51.00"N, 137°17'50.50"E)の2地点(いずれも水深約8m)にADCP(Aquadop 1MHz, Nortek社製)を設置し, 流速の鉛直プロファイル(1分平均値, 1m間隔)を10分間隔で連続観測した. また, A点においては底層DO濃度(海底上2m)の連続観測も行った. 豊川の河川流量は, 河口から約

図-1 豊川河口沖の観測点
(●は定点観測地点, ★はADCPの設置位置A, Bを表す)

1 正会員	工博	豊橋技術科学大学教授
建築・都市システム学系
2 正会員		東北電力(株)
3 正会員	博(工)	インドネシアシャークアラ大学
津波減災研究センター研究員
4 学生会員	博(工)	韓国科学技術情報研究所研究員
5 正会員	博(工)	豊橋技術科学大学教授
建築・都市システム学系

20km上流の当古観測所で、風速は三河港で取得されたデータを用いた。

3. 観測結果と考察

(1) 密度構造の変化特性

図-2は、11回の観測データから求めた測定ライン上での平均密度とその変動の標準偏差をコンターで示したものである(図の左が河口部)。図の横軸は東端の観測点からの距離である。これより、観測点における夏期の平均的な密度は σ_t で15–22の範囲であり、水面下2m、河口沖合5km程度の範囲内では、淡水流入の影響を受けて密度勾配および密度変動が大きいことがわかる。密度構造は塩分分布にほぼ対応しており、平均塩分で26–32PSUの範囲であった。

図-3は、特徴的な2日(9月19日および9月28日)について、密度のコンターを比較して示したものである。これより、19日には成層状態にあった水塊が、28日にはその構造が大きく変化し、河口近傍で表層の淡水が混合するとともに、底層から中層付近まで高密度の水塊が遡上している様子が確認できる。このような短期間での密度構造の大きな変化が、河口付近における水塊構造変化の特徴である。

(2) 溶存酸素濃度の変化特性

図-4は、溶存酸素濃度について、図-2と同様に平均値とその変動の標準偏差を示したものである。平均的には酸素濃度は水深が大きくなるにつれて低下する傾向を示すが、その変動の大きさは河口近傍の中層付近および海底から2–3m上方で大きな値を示していることがわかる。

図-2 平均密度(上)および密度変動の標準偏差(下)

図-5は、図-3に対応する日の溶存酸素濃度のコンター図であるが、溶存酸素濃度の変化は密度の変化とよく対応しており、9月28日には水塊の鉛直混合により河口付近で表層のDOが減少するとともに、底層の0.5ppm以下の貧酸素水塊が中層まで遡上していることがわかる。

(3) 流れの特性

以下では、ADCPによる流速の測定結果から、河口沖合での平均流れの特性とその要因について考察を加える。今回2地点で同時に観測を行った理由は、陸ら

図-3 密度分布の比較(上:9月19日,下:9月28日)

図-4 平均溶存酸素濃度(上)および濃度変動の標準偏差(下)

図-5 貧酸素水塊遡上時の溶存酸素濃度の分布 (9月28日)

(2010) で見られた2008年と2009年の特性の違い(観測点が700m程度離れていた)について確認するためである。なお、以下で取り扱うデータは、すべて25時間移動平均を行って潮流成分を除去したものである。

a) 風および河川流量

流速を測定した8月1日以降の平均風速(5分毎の平均風速を1時間で移動平均したもの)および河川流量(1時間毎)の変化を図-6(下段)に示す。ただし、風については、流れと対比するために、東西方向(EW-wind)および南北方向(NS-wind)として別々に示してある(それぞれ東および北から吹く風が正)。観測期間中は猛暑が続いたが、8月12日、9月8日、9月27日、10月9日は台風等の影響で風速および河川流量が増大している。風については、東西風速では一方向の風が連続して吹くケースが見られるのに対し、南北風速では平均的に南風が卓越しているものの日変動を繰り返す場合が多かった。

b) 平均流れの概要

図-6の上段の図は、A地点のADCPデータから求めた平均流の鉛直分布の時間変動をコンター図で表したもの

図-6 流速分布の時間変化(上)および風速成分と河川流量(下)

図-7 A点での表層および底層の流速，底層のDO濃度，東西風速成分，河川流量

である。東西方向流速（EW-current）および南北方向流速（NS-current）は、それぞれ東方向および北方向へ流れる場合を正としており、図中の赤が正、青が負の値に対応し、濃淡は流速の強さを表している。紙面の関係でB地点の図は省略したが、平均流の時空間変動は両地点ともよく似たパターンを示す。

これらの図を風および流量のグラフと比較すると、平均的に東風の成分が卓越する8月には表層で西向き流れ、底層で東向き流れのエスチュアリー循環的な鉛直循環が明瞭に認められる。一方、9月中旬以降西風成分が大きくなってくると、表層でも東向きの流れが見られるようになり、上記の鉛直循環が弱まっていることがわかる。一方、南北方向の流速については、平均的に南風成分が卓越する8月には全体的に北向き流れが支配的である。ただし、8月20日前後には中層で南向きの流れが発生している。9月中旬以降は流れの向きが頻繁に変化している。

c) 水塊構造に及ぼす風の影響

図-7は、9月23日から10月12日までの20日間を抽出し、河川流量、東西風速成分に加えて、A点での表層（海底から6.4m上）および底層（海底から2.4m上）の流速、および底層（海底上2m）のDO濃度の変化を示したものである。なお、流速については表層と底層で大きさが異なるため、縦軸を左右に分けて示してある。これより、9月26日から27日にかけて東風が連吹しており、これに対応する形で、表層では強い西向き流れが発生している。

またこれに呼応して底層では東向きの流れ（河口に向かう流れ）が生じている。図-3および図-5に示したように、9月28日の観測データには河口付近での混合と底層水の遡上が見られたが、これはこの風によるものと考えられる。なお、28日には河川流量も急激に増大しているが、観測時点（早朝）では淡水の大きな流入はまだ生じていなかった。

一方、DO濃度の変化についてみると9月28日前後の風と淡水流入により一気に上昇し、4日間程度高濃度が続くものの、その後の底層水の遡上に呼応する形で再び貧酸素に転じていることがわかる。ただし、その後も底層では継続して河口方向に流れが生じているにもかかわらず、DO濃度は上昇している。これは、図-8に示す10月8日の密度とDOのコンター図からわかるように、密度成層の弱まりとともに沖合底層の貧酸素水塊が縮小しているためと考えられる。

d) 淡水流入に対する応答

9月28日には豊川流量が $1000\text{m}^3/\text{s}$ を越えるまで急激に増大しているが、表層（海底面上6.4m：水面下1-2m程度）での流れは、むしろ風との対応の方が強く現われており、淡水流入が表層の流速を増大させるまでには至っていない。一方、底層では、流速は小さいものの、淡水流入後は継続的に東向き（河口向き）の流れが生じており、必ずしも表層流れと逆向きの変動を示していない。

以上のことより、淡水流入によって引き起こされる流

図-8 10月8日の密度と溶存酸素濃度の分布

2010 September 28

図-9 溶存態窒素およびリンの濃度分布 (9月28日)

れは、風によって生じる流れほど明確ではないものの、底層水の河口方向へのゆっくりとした輸送を引き起こしていることが伺える。

(4) 物質輸送に関する考察

図-9は、定点観測を行った8地点の表層（水面下1m）および底層（海底面上1m）での9月28日の溶存態窒素濃度（DN）および溶存態リン濃度（DP）の分布を示したものである。ここに、横軸の1-8は測点番号であり、測点1は図-1中の河口に最も近い点に対応している。これ

より、河口付近では表層に比べて底層の溶存態リンの濃度が高く、これが風および淡水流入の作用による河口浅海域への遡上と河口付近での鉛直混合によって表層に輸送され、1次生産に寄与していることが推定される（山尾ら，2002；陸ら，2010）。

4. おわりに

本研究では、夏期に集中的に行った豊川河口沖での水質観測データを用いて、河口浅海域の水塊構造の変化と流れの特性について、特にエスチュアリー循環に着目して考察を行った。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 河口沖合の水塊の密度は、水深2m、沖合5km程度の範囲でその勾配や変動が大きく、河口付近では主として風の影響により鉛直混合と底層水の遡上が生じている。またこの底層水の遡上にともなう、沖合底層で生じた貧酸素水塊および高濃度の溶存態リンが河口浅海域に輸送されていることが確認された。
- (2) 河口付近に生じるエスチュアリー循環（鉛直循環）は、短期的には風による応答として顕著に現われる。ただし、多量の淡水流入があった場合には、底層の河口向きの流れが継続して生じる傾向がみられた。

謝辞：本研究に利用したデータの一部は、国土交通省中部地方整備局豊橋河川事務所および愛知県三河港務所が取得したものである。また、本研究は、環境省環境研究総合推進費（B-0908，代表者：井上隆信）の支援により実施された。さらに、現地観測は豊橋技術科学大学大学院生 Ms. Ernawaty とともにに行った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 鈴木輝明・市川哲也・桃井幹夫（2002）：リセプターモードモデルを利用した干潟域に加入する二枚貝浮遊幼生の供給源予測に関する試み-三河湾における研究事例-。水産海洋研究，66（2），pp.88-101。
- 八木 宏・鯉渕幸生・日向博文・灘岡和夫（1998）：東京湾湾奥部の水環境に与える河川水の影響について，海岸工学論文集，第45巻，pp.986-960。
- 山尾 理・笠井亮秀・藤原建紀・杉山陽一・原田一利（2002）：河川流量の変動にともなう伊勢湾のエスチュアリー循環流量・栄養塩輸送量の変化，海岸工学論文集，第49巻，pp.961-965。
- 陸 真姫・青木伸一・井上隆信・杉山佳幸（2010）：エスチュアリー循環による河口浅海域への物質輸送に関する研究，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.361-365。