

鹿島灘における広域海水流動と河川水挙動に関する現地観測

灘岡 和夫* ・ 二瓶 泰雄** ・ 小西 伸英*** ・ 中山 哲厳****
足立 久美子**** ・ 藤井 智史***** ・ 佐藤 健治***** ・ 山下 俊彦*****

1. はじめに

開放性沿岸域では、最近まで「海の砂漠」と呼ばれるほど貧栄養で生物的生産力が低い海域と見なされていた。それに対して、足立ら(1994)は、外洋性砂浜海岸が、実は意外に高い生産力を有していることを鹿島灘海岸での長期的な観測により明らかにしている。しかし、その生産力の基礎となる栄養塩の具体的な供給過程については明らかではなく、開放性沿岸域の水環境・流動構造は未解決な部分が多い。

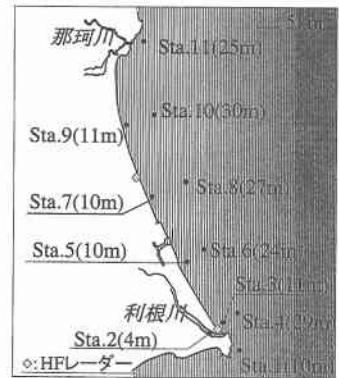
このような開放性沿岸域において想定される栄養塩供給経路としては、周辺の河川からの供給、沖側海域からの供給、地下水を經由した海岸背後地からの供給などがあげられる。このうち、地下水による栄養塩供給に関する研究としては内山ら(1998)の研究等により、いくつか具体的な検討が行われている。一方、外洋からの栄養塩動態についてはその重要性が指摘されているが、未だ明確な知見は得られていない。また、河川を通して陸域から供給される栄養塩の輸送過程についても、陸域からの直接的な環境負荷を担う重要な factor であるにもかかわらず、その流動構造の詳細については明らかにされていない。河川水の沿岸域での流動に関しては、密度流的な効果に加えて、地球自転の影響を受けることが知られている(例えば、松野、永田 1983)。しかし、実際の沿岸域における河川水流動は、さらに地形や気象、外洋の流れなどの様々な影響を受けて複雑な挙動を示すものと考えられる。このような河川水等の広域流動に関して、航空機を利用したりモートセンシングによる研究や、RAR (real aperture radar) を用いた研究(例えば、Sletternら, 1999)などが行われつつあるが、こうした研究では河川水の面的な拡がりについての情報は得られる

ものの、河川水流動を支配する沿岸域での流動構造の鉛直情報は、当然のことながら得ることはできない。

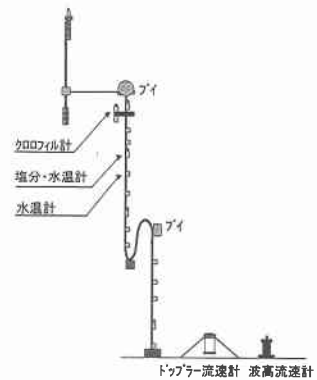
そこで本研究では、時空間構造に着目し、栄養塩や土砂の carrier としての河川水の時空間変動構造を具体的に明らかにするべく、そのベースとなる三次元流動構造の把握を目的として、代表的な開放性沿岸域である鹿島灘において広域的な長期連続観測を実施した。

2. 現地観測概要

現地観測は、夏期成層期の 1998 年 8 月 24 日～9 月 25 日の約 1 ヶ月間実施した。対象海域は、図-1(a)に示す



(a) 観測点配置図



(b) 計測器の配置例 (Sta. 8)

図-1 観測概要

* フェロー 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究所 情報環境学専攻

** 正会員 博(工) 東京工業大学助手 大学院情報理工学研究所 情報環境学専攻

*** 学生会員 東京工業大学大学院情報理工学研究所 情報環境学専攻

**** 正会員 水産工学研究所

***** 郵政省 通信総合研究所 沖縄電波観測所

***** 正会員 工 博 北海道大学助教授 大学院工学研究科環境資源工学専攻

ように、那珂川河口付近から利根川河口付近にかけての沿岸方向約 70 km、岸沖方向に数 km、水深約 10~30 m の鹿島灘沿岸海域で、測点を 11 点 (Sta.2 は利根川河口内) 設けた。計測器の配置は同図 (b) に示すように、係留ブイに設置した水温・塩分計の鉛直アレイによる水温・塩分鉛直分布と表層の Chl.a 濃度および濁度、そして海底設置型 ADCP を用いた鉛直流速分布、波高・流速計による波高・波向き・底層流速、採水による栄養塩と濁度である。さらにこれらに加えて、HF レーダーを用いた表層流速分布の広域観測を実施した。

3. 観測全期間における気象・海象データ概要

3.1 気象データ

まず、観測期間中における気象変動を把握するために、図-2(a), (b) に全観測期間中における風向・風速と那珂川流量の時系列データを示す。観測初期 (期間①) では、10 m/s 程度の卓越した南風が 8 月 30 日頃急激に強い北風へと変化しているとともに、那珂川の流量は最大で約 4000 m³/s にも達している。この大出水は、台風 9804 号の小笠原諸島沖での停滞に伴って暖かく湿った空気が前線の活動を活発化して発生したことによるもので、記録的な大洪水となった。また、この大洪水により、Sta. 11 における係留ブイは流され、この点での観測データは 8 月の下旬までしか得られていない。その後、しばらく北風が維持されているが、観測期間後半 (期間③) では、台風 9805 号の接近によって最大で 20 m/s に及ぶ強風が時計回りに風向を変える形で発生しており、このときにも大きな出水が生じている。また、同様の風向変化パターンは 9 月 21 日頃に台風 9807 号が接近した際にも現れている。

3.2 水温・塩分データ

図-3(a), (b) は、代表的な水温・塩分変動記録の例として、それぞれ、岸側測点である Sta. 7 と沖側測点である Sta. 8 でのデータを示したものである。

観測期間①では、初期において Sta. 7, 8 ともに、水温データに明確な成層構造が現れているが、南風から北風への風向の急変に対応して、水温が次第に全層的に一樣化している。また、ここでの塩分変動に着目すると、Sta. 7 では北風に吹き変わると同時に塩分においても一樣化していることがわかる。観測期間②では、Sta. 7, 8 ともに全層的に水温が徐々に増加しているが、Sta. 8 の底層では長周期的に水温が上昇・低下を繰り返している。この現象は他の沖側測点においても確認することができ、9 月 5 日から 16 日にかけて北側より低水温塊が長周期的に貫入しているものと考えられる。また、塩分変動に着目すると、この期間では河川からの出水がなかったにも関わらず、Sta. 7 においては 9 月 8 日すぎに表層・中層

ともに急激な塩分低下現象が見られ、また、沖側の Sta. 8 においても 9 月 11 日頃から徐々に表層塩分が減少しており、複雑な河川水広域挙動が捉えられている。

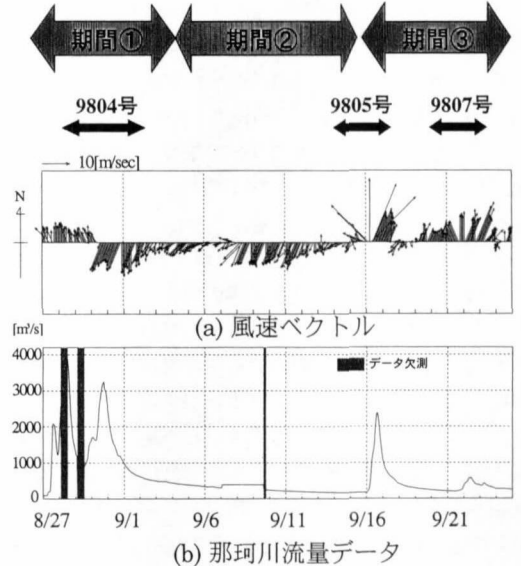


図-2 気象データ

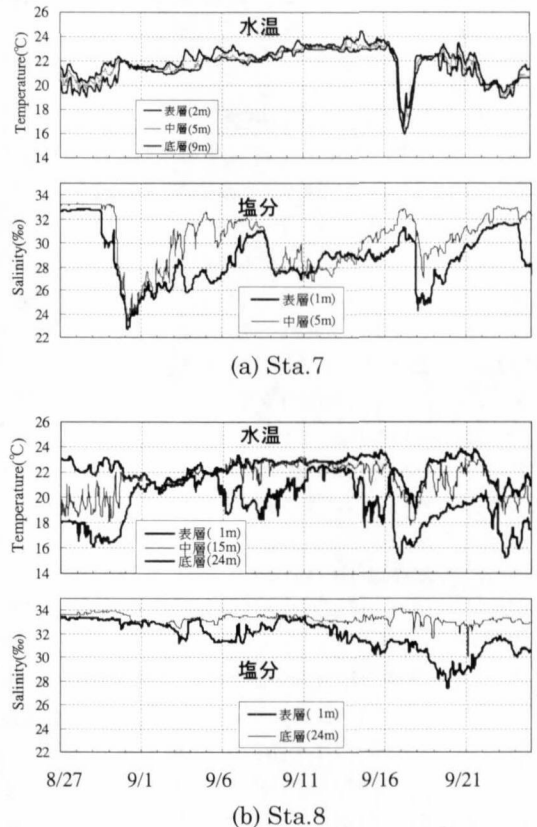


図-3 水温・塩分データ

観測期間③に着目すると、台風 9805 号の接近による卓越した南風に伴って、水温の全層的な低下およびその後の上昇が見られる。特に Sta. 8 では、期間①とは対照的に成層構造が維持されており、さらに注目すべきポイントとして、Sta. 7 においては台風通過直後の水温レベルが通過直前の水温レベルに比べて全層的に約 1 度低下していることがわかる。これは、台風の接近という episodic event が、沿岸浅海域の温熱特性を不連続的に変化させることを示す例として興味深い現象である。次に塩分に着目すると、Sta. 7 において河川水による明確な塩分低下が 9 月 18 日頃に見られるが、Sta. 8 では塩分濃度は徐々に低下しており、そのピークが 9 月 20 日頃に現れている。このことは、河川水影響の現われ方が岸側と沖側とで大きく異なっていることを示している。

本節では水温・塩分変動データに着目し全観測期間における大局的な海象データについて議論したが、以下では、特に河川からの出水の大きかった期間①における河川水流動と海水流動構造を、ならびに、期間③における河川水挙動パターンについて検討を行う。なお、以下では期間①を「那珂川大出水時」、期間③を「台風 9805 号による出水時」と呼ぶこととする。

4. 河川出水時に着目した広域海水・河川水挙動

4.1 那珂川大出水時

(a) 広域海水流動と鉛直構造

図-4 は、8 月下旬の那珂川大出水時における HF レーダーによる表層流速ベクトルを表している。これを見ると、那珂川出水前の図-4(a)では、沿岸域では風向きに対応した沖向き流れとなっているが、観測点より沖では基本的に南下流が卓越していることがわかる。また、風が南風から岸よりの北風へ吹き変わると、風向きにほぼ対応した広域にわたる岸向きの流れが発生しており(図-4(b))、さらに表層の流れは次第に岸に沿った方向へと変化している(図-4(c))。その後の沿岸域の平面流動パターンは、ほぼ岸に沿った流動をしているが、Sta. 6 (鹿島港南沖観測点)付近の流れに着目すると、蛇行した形の流行パターンが確認できる。このような蛇行流は、岸に沿った流れが形成された後に明確に現れており、鹿島港の存在が沿岸近傍の海水流動に影響を及ぼす可能性が示唆される。

次に海水流動の鉛直情報に関して、Sta. 6 における ADCP データに 25 時間移動平均操作を施した鉛直流速分布を示す(図-5)。この図より、図-4(d)の HF レーダーにおける岸に沿った流れは、全層的に強い南下流を示していることがわかる。具体的には、表層においては 50 cm/s 強、底層においても 30 cm/s 程度の非常に強い

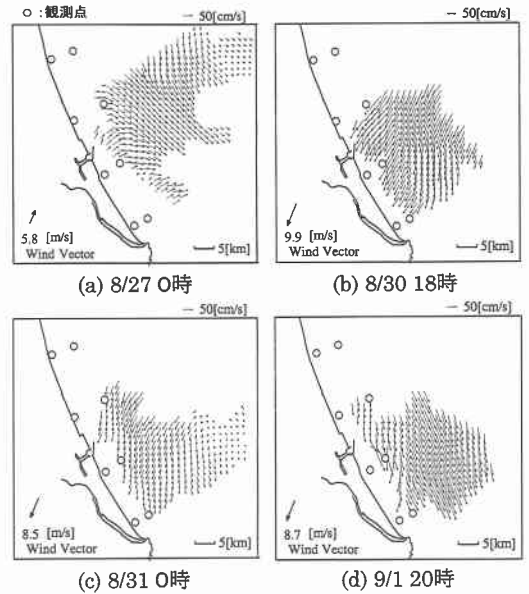


図-4 表層流速分布

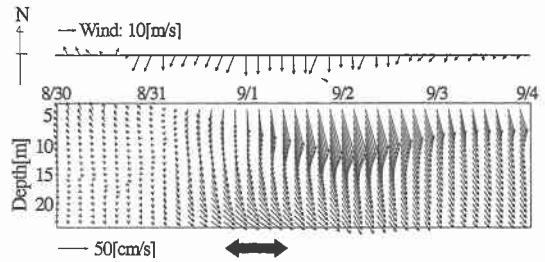


図-5 ADCP による鉛直流速分布 (Sta. 6)

流れが全層的に生じていることが明らかとなった。

(b) 河川水の三次元挙動と水温構造

那珂川大出水時における河川水の広域、鉛直構造を把握するために、表層から 1 m と 5 m の塩分濃度(図-6)と水温の平面コンター図-7を示す。また、図-6においては、さらに各観測点における底層流速(25 時間平均値)、および同時刻での風ベクトルを示した。以下では、表層より 1 m を「表層」、5 m を「中層」として扱うことにする。また、ここでのコンター図は仮想荷重法(日野, 1975)を用いて空間補間を行い作成している。

図-6(a)の表層塩分濃度分布図において、那珂川河川水は Sta. 7 付近まで岸に沿って及んでいるが、中層においては明確な塩分低下がないことから、那珂川河川水は岸に沿って表層を薄く広がってきていることがわかる。また、ここでの水温分布(図-7(a))は塩分濃度分布に対応していないことから河川水による明確な水温変動は生じていないものと考えられる。ここでは、岸沖方向に

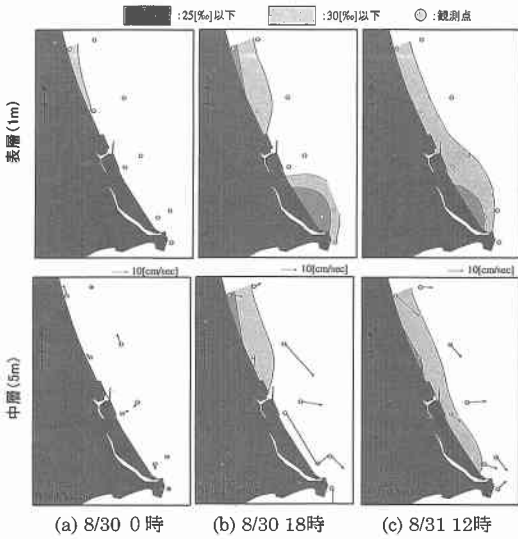


図-6 表層および中層における塩分濃度分布と底層流速

水平勾配をもつ水温構造を形成していることがわかる。その後(図-6(b)), 那珂川河川水は鹿島港近傍にまで及ぶが、ここでの表層と中層データをみると、卓越した北風が吹き続いたことによる沿岸沈降が生じ、表層と中層での塩分濃度がほぼ等しく、低塩分の層厚が増加したことがわかる。一方、利根川河川水に関しては表層を薄く広がっており中層での塩分低下は見られない。さらに16時間後の分布(図-6(c))から、表層の塩分濃度分布においては利根川と那珂川河川水はすでに混合しているが、中層においては30‰の等値線が利根川ごく近傍にまで及んでいる。ここで、同時刻の ADCP による鉛直流速分布(図-5 中矢印)において、基本的には南向きであり、全層的な流動となっていることから、ここでの底層流速の流向は、表層での流向をある程度代表しているものと考えられる。したがって、那珂川河川水は利根川ごく近傍にまで及んでいる可能性が示唆される。また、ここでの水温分布に着目すると(図-7(c))、水平方向にはほぼ一様化し、全体的に水温が低下していることがわかる。以上のことから、出水後の河川水挙動は、このほぼ全層的な強い南下流に基本的に支配されていたことが示唆された。

(c) 外洋水温変動

那珂川大出水時における沿岸域での外洋状況を把握するため、茨城県漁業無線局発行の「漁海況速報」を図-8に示す。これを見ると、那珂川大出水時(図(a))と、その後(図(b))では、黒潮の流軸構造やそれに伴う外洋の水温構造が大きく変動しており、その影響が沿岸域にまで及んでいることがわかる。したがって、沿岸域における海水流動および河川水挙動の支配要因の一つとし

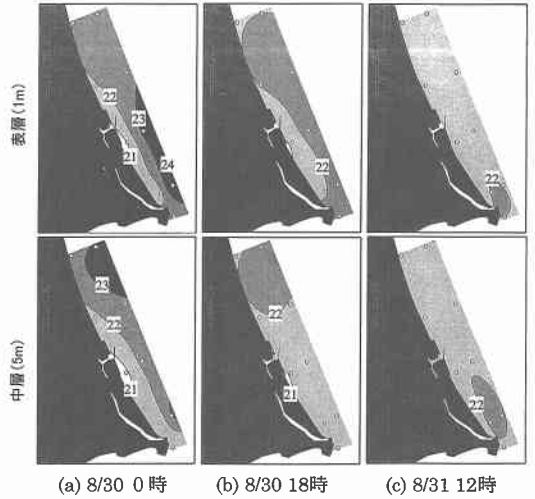


図-7 表層および中層における水温分布

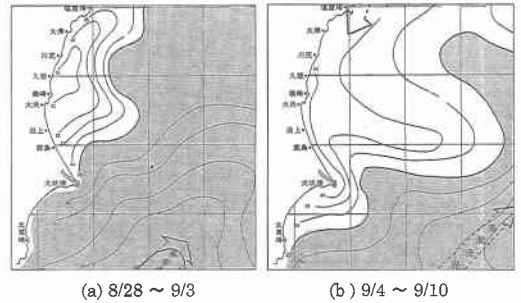


図-8 表層水温分布

て、このような外洋影響の実態をより詳細に明らかにしていく必要がある。

4.2 台風9805号に伴う出水時

次は、那珂川大出水時との河川水の広域挙動の比較を通じて、台風5号に伴う出水時の河川水の広域挙動を明らかにする。まず、期間③における表層塩分濃度分布(1m)と同時刻での風ベクトルを図-9に示す。まず、この出水の起こる前には、3.2で述べたように、沖側測点においても低塩分となっており、広域にわたって複雑な河川水挙動の影響が生じているものと考えられる。台風に伴う利根川からの出水が生じると、卓越した南風により、鹿島港近傍にまで利根川河川水が運ばれている(図-9(a))。その後、那珂川河川水が鹿島港付近にまで及んでくるが(同図(b))、このときの那珂川河川水は期間①と同様におもに岸に沿って南下していることがわかる。さらに数日の後には、利根川河川水と混合し観測海域全域にわたって塩分低下が顕著に見られることがわかる(図-9(c))。さらにここでの鉛直流動を把握するため、図-10に Sta. 6 における期間③中の ADCP データを示

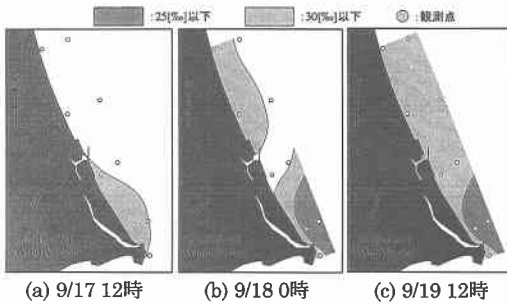


図-9 観測海域での台風 9805 時の表層塩分分布

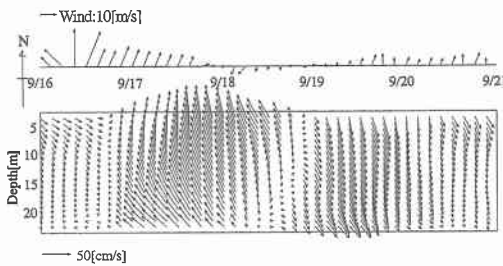


図-10 Sta. 6 における ADCP による鉛直流速分布 (台風 9805 時)

す。台風に伴う卓越した南風により、全層的に強い北上流が生じていることが分かる。その後、南風が弱まると、流れは一樣な南下流を形成していることがわかる。ここでの南下流は、那珂川大出水時と同様に強い全層的な流れを形成しているが、北風が卓越してないにも関わらず、全層的に非常に強い南下流が形成されていることが特徴的である。

5. おわりに

鹿島灘沿岸域において河川水の広域挙動・海水流動構造を明らかにすべく広域的長期連続観測を行った結果、河川水の大局的挙動とその要因として以下の知見が得られた。

1) 那珂川大出水時の河川水の挙動は、那珂川河川水が岸に沿って、利根川河口のごく近傍にまで及んでいたことが明らかとなった。

2) 台風 9805 による出水時の河川水挙動は、河川水の影響が全観測点に及んでおり、那珂川大出水時よりも広域に河川水の影響が及んでいることが明らかとなった。

3) 河川水の挙動を支配する大規模流動として、岸に沿った強い南向きの流れが、那珂川大出水時・台風 9805 時ともに確認され、河川水、特に那珂川河川水の挙動の大きな支配要因であることが明らかとなった。ただし、この強い南下流については、那珂川大出水時には卓越した北風との良い対応関係が見られたが、台風 9805 時の南下流についてはそのような関係は見られない。したがって、この南下流の発生原因については今後、より詳細に検討する必要がある。

謝辞：本研究に用いた観測器等の一部は、(株)協和商工、(株)アレック電子、(株)SEA より借用したものである。また、現地観測実施の際には(有)アイオーテック、水産工学研究所仲宗根琢磨氏の多大なる協力と漁業組合の方々のご理解を頂いた。ここに深甚なる謝意を表します。

本研究は、平成 11 年度文部省科学研究費補助金(基盤研究 (B) (1)) (研究代表者：灘岡和夫 課題番号 10450181) の補助を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 足立久美子・日向野純也・木元克則 (1994): 鹿島灘砂浜海岸における一次生産 (1992 年) 水産工学研究所, Vol. 16, pp. 13-24.
- 内山雄介・Peter Rölke・灘岡和夫・足立久美子・仲宗根琢磨・八木 宏 (1998): 海岸地下浸透流およびそれに伴う沿岸域への栄養塩供給過程の解析, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 1076-1080.
- 松野 健・永田 豊 (1983): 温排水の拡がりに及ぼす地球自転効果の数値的研究, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 536-540.
- 日野幹雄 (1975): 近似計算法としての仮想荷重法の提案と解説, 東工大土木工学科研究報告, No. 18, pp. 89-96.
- Slatten, M. A, George O. Marmorino, and Tim F. Donato, David J. McLaughlin and Elizabeth Twarog (1999): An airborne, real aperture radar study of the Chesapeake Bay outflow plume, Journal of geophysical research, Vol. 104, No. C1, pp. 1211-1222.