

有明海北部海域における夏季洪水期の物理的環境と溶存酸素の変動 ——2003 年 7 月の係留系による定点観測から——

安田 秀一* ・松永 信博**・徳永 貴久***
阿 部 淳****・高島 創太郎*****

有明海北部海域の DO など環境要素の変動に関わる物理的過程を解明するために、洪水などが期待される 7 月の 19 日間、流入淡水の影響を受けやすい佐賀県大浦沖の定点に多機能流速計や DO 計などの係留系観測機器を設置した。測定期間内には大潮が 2 度、多量の降雨や洪水による淡水流入も 3 度あり、それに伴う再懸濁や DO の変動などが観測された。淡水流入の振舞によって残差流の鉛直分布が異なり、溶存酸素の変動にも大きく関わることを示された。また、潮位などの調和解析から、約 8 時間 20 分周期のところにもピークが認められ、理論的な考察から、この周期の振動は有明海の副振動として、半日周期潮汐を増幅していることも推察された。

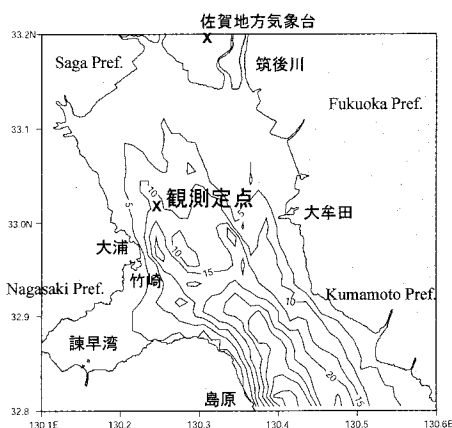
1. はじめに

諫早湾口部より北に位置する有明海北部海域では、底質汚染や底層水の貧酸素化、赤潮の発生などの環境悪化が社会的な問題となっている。本研究では、北部海域の貧酸素化過程の解明を目的として、2002 年 9 月の大潮期の昼夜観測（阿部ら、2003）に引き続いて、2003 年 7 月の夏季洪水期に、大潮期を 2 回含む 19 日間（7/12～7/31）の係留系設置による定点観測を実施した。前報においては、この海域の底泥が溶存酸素を効果的に消費することを室内実験で明らかにしたこともあって、この度も底泥の再懸濁過程や低酸素化に関わる沿岸海洋過程の解明を目指し、係留系の設置点は前報の測点の近くにした（図—1）。この測点は北部海域の中でもかなり西側に位置しているが、降水量の多いときの塩分分布（有明プロジェクト研究チーム、2002）や地元の漁業者の話によると、洪水時には河川水は佐賀県沖の西岸沿いを南下するようで、この地点周辺の現象は北部海域の環境変動に重要な役割を果たすものと考えている。

2. 現地観測と観測結果

係留系から有効なデータが取れた期間は、7 月 12 日 12 時から 31 日 9 時までの約 19 日間で、期間中は熊本県では大被害が出るほどの洪水もあった。今回の係留装置、測定項目、測定水深などは下記のとおりである。

- (1) Aquadopp (ADP)：海底上 0.4 m から 12 m まで、0.4 m 毎 (30 層) の流れと濁度 (音響散乱強度) および潮位変動
- (2) C/T タワー：海底上 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m の 4 層における流れと濁度、および海底上 2.2 m における水温と塩分
- (3) 電磁流速計：海面下 2 m と 4 m における流れと



図—1 有明海北部海域と係留観測地点

水温

- (4) DO 計：海底上 2 m における溶存酸素 (DO)

以上の装置は 5 分毎に測定し、その他のデータとして、

- (5) 装置設置直後と回収直前および中日の保守点検時における CTD 測定を行い、
- (6) 国土交通省筑後川河口堰（大堰）の河川流量
- (7) 佐賀地方気象台の気温・気圧、風向・風速、降水量、日照時間

等を利用した。なお、C/T タワーの濁度は赤外後方散乱方式で測定したもので、カオリナイトに換算しており、Aquadopp の濁度は、C/T タワーのデータを基準とした音響散乱強度からの換算値（横山ら、2002）である。

図—2 は、観測期間中の潮位、海底上 2 m の DO [%]、海底上 0.5 m と 2 m の濁度 [ppm]、および筑後川の日平均流量 [m³/s] である。DO は 1 時間平均値とそれを 24 時間で移動平均したものを描いている。図—3 には、この海域に入り込む淡水流入を把握するために、7 月の筑後川の流量とともに、佐賀地方気象台の毎日の降水量を描いた。筑後川の平常時の流量は 80 m³/s 前後と言われているが、7 月 12 日前後は九州地方では洪水警報も出され、21 日も熊本県では記録的な大雨が報告されるなど、

* 正 会 員 理博 (独法) 水産大学校教授 水産情報経営学科
** 正 会 員 工博 九州大学教授 大学院総合理工学研究院
*** 学生会員 工修 九州大学大学院総合理工学研究科博士後期課程
**** 正 会 員 工修
***** 国土環境株式会社

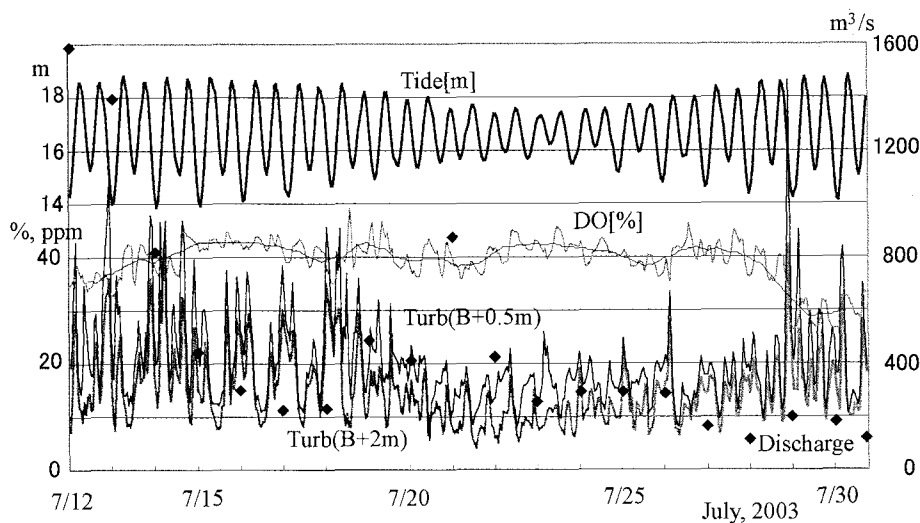


図-2 係留期間中の潮位, DO (海底上 2 m), 濁度 (海底上 0.5 m と 2 m), 筑後川日平均流量

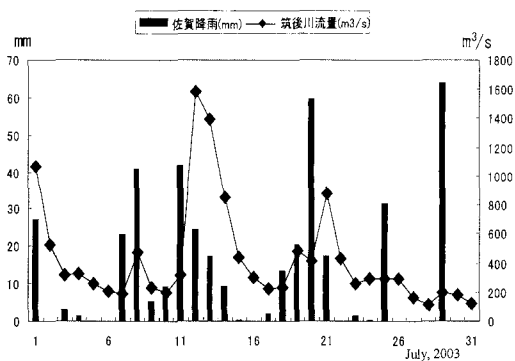


図-3 2003 年 7 月の筑後川日平均流量と佐賀市の日降水量

この期間は全体的に淡水流入の多いときと言える。

図-2 を見ると, 濁度は短周期変動を伴いながら大潮の時に大きい値を示しており, 潮流による再懸濁が推測される。DO の変動は大潮期の 7 月 29 日頃からは減少して, 懸濁物質による酸素消費が考えられるが, その前の大潮期である 7 月 13 日から 15 日にかけては, むしろ上昇する傾向にあり, 懸濁物質が酸素消費を促しているとは思われない。また, DO は潮位に追従して半日周期でも変動しているように見受けられる。

3. データ解析

すべての時系列データは 15 日間の調和解析を行った。図-4 は, 潮位 [m] と海底上 2 m の濁度 [ppm], DO [%] の調和解析結果で, 横軸に周期をとって, 縦軸はそれぞれの振幅を対数軸で表したものである。潮位については, M2, S2, O1, K1 の主要 4 分潮が大きい³⁾, 周期が 8

時間 22 分のところにもピークがあることがわかる。この周期のピークは濁度や DO にも現れている。図-2 から認められるが, DO についても M2 潮の変動が認められ, その位相遅れは潮位に比べて 27° と近く, このことは底層の DO が潮流の縦方向に分布をしていることを暗に示している。濁度については M4 潮成分の周期のところに顕著なピークが認められる。これは, 図-2 における濁度の短周期変動に対応しており, この変動からも底泥からの再懸濁が伺える (Yasuda ら, 1997)。

風や淡水流入による流れへの影響を見るためには, 潮流データから潮汐成分を除く必要があるが, 本研究では, 生データから主要 4 分潮を差し引き 24 時間で移動平均することによって潮汐の影響を取り除いた。図-5 は, 観測期間中の佐賀地方気象台における 24 時間移動平均した風と, 海面下 2 m, 4 m, 海底上 2 m の各層の潮汐の影響を取り除いた流れのベクトル変動図である。理論的には, 風が吹き出すと表層から風下方向に流れが引き起こ

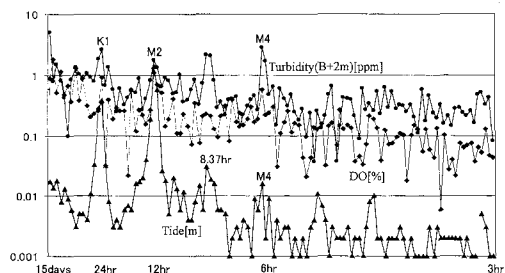


図-4 海底上 2 m の濁度と DO および潮位の各調和成分の振幅

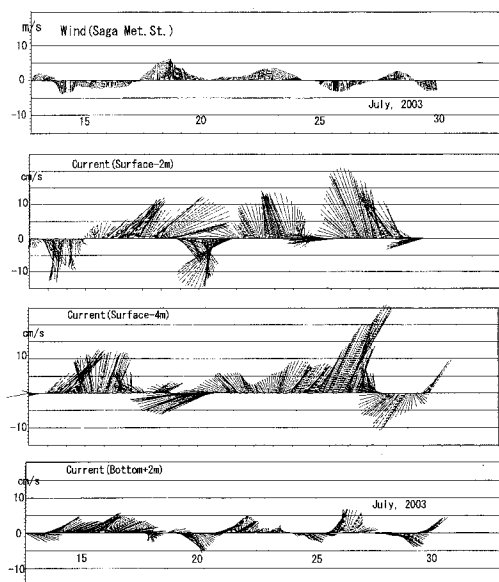


図-5 観測期間中の日移動平均した風と海面下 2 m, 4 m および海底上 2 m の潮流成分を除いた流れのベクトル変動図（上方が北）

され、次第にエクマン輸送が生成されながら、経過時間が慣性周期を超える頃から海面勾配が形成され、それに伴う傾斜流が生じる。その時に下層では反流が生じ始めるが、この図においても、海底上 2 m の流れにおいて、風による反流の傾向を部分的に伺うことができる。

この観測においては、潮流は全装置から 36 層のデータが 19 日間に亘って測定されているが、25 時間毎の調和解析も行い、半日周期 (M_2 周期) 成分や残差成分の鉛直分布の振舞にも注目した。本研究では、これらの結果を気象データと比較したが、淡水の流入とこれらの流れに非常に興味深い関連性があることが認められた。

まず、降水量もなく河川水量も小さいとき (7 月 17 日 0 時～18 日 0 時 50 分) の残差成分の鉛直分布を図-6 に示す。流速ベクトルは南北 (濃い棒) と東西 (薄い棒) の各方向成分で表しているが、この方向は、調和解析による潮流の M_2 成分の主軸の方向が、有明海の縦軸方向に一致して約 -23° となったために、実際の東西南北を -23° 回転させた方向に投影している。従って、南流は流出方向、北流は流入方向と考えることができる。同図の左は Aquadopp によるもので、海底上 0.4 m から 0.4 m 毎に 8 m までのもの (全水深の半分程度) を描いており、右図は C/T タワーによる海底上 2 m までのものと、上層の海面下 2 m の電磁流速計によるものである。◆印は、それぞれの水深における M_2 潮流楕円の楕円率を示している。この時は風も比較的弱いときに当たり (図-5 参照)、このような流れは、この測点における潮汐起源

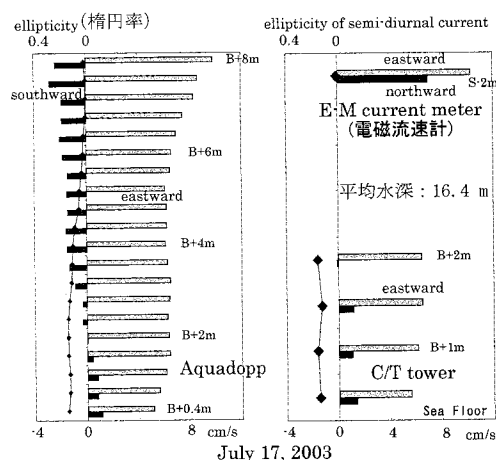


図-6 7 月 17 日 (淡水流入が少ない時) の 25 時間調和解析による残差流 (濃い棒が南北方向成分, 薄い棒が東西方向成分) と半日周期成分の潮流楕円率 (◆印) の鉛直分布

の基本的な流動を表しているものと考えられる。つまり、潮流の鉛直分布の解析解によると、地球自転影響下では、上層では直線的に振動する潮流も、ストークス境界層内では海底に近づくほど楕円率が大きくなる傾向にあるが (Yasuda 1988)、この図の楕円率の分布はその特徴を表していると言える。また、残差流は全水深で東向きの傾向にあり、海底近くで、左方向 (反時計回り) に偏向しているが、このことも定常流の海底 Ekman 境界層として地球自転効果を現していると考えられる。

図-7 は、筑後川の流量が非常に多いときの 7 月 13 日 0 時から翌日 0 時 50 分までの調和解析による残差流と M_2 潮流の楕円率の鉛直分布である。このときには上層で湾外に向かい下層では湾内に向かう残差流が認められ、エスチャリ循環のような鉛直循環流の形成が伺える。また、 M_2 潮流の楕円率は全水深で大きくなって、潮流の向きが安定することなく揺らいでいる様子が推測される。因みに係留系設置後の 12 日 14 時の CTD 測定によると、表層の塩分は 2 psu で、水深 1 m から 1.5 m のところに極めて強い塩分躍層が形成され、海底近傍では 29.6 psu であった。

図-8 は、筑後川の流量はそれほど多くはないが降水量が多いときの 7 月 20 日における同様の図である。また、図-9 は、筑後川の流量はさらに小さく降水量が多いときの 29 日の図である。これら両図は、淡水が干潟の上に供給されている場合と考えることができるが、このときの残差流は、鉛直循環流を形成することなく全水深で沖合に向かう傾向にある。

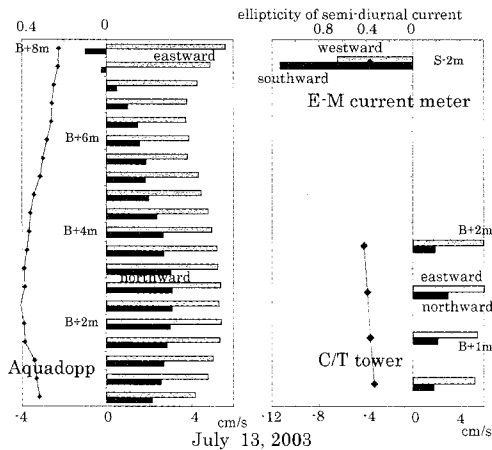


図-7 7月13日(筑後川の流量が非常に多い時)の残差流と潮流楕円率の鉛直分布

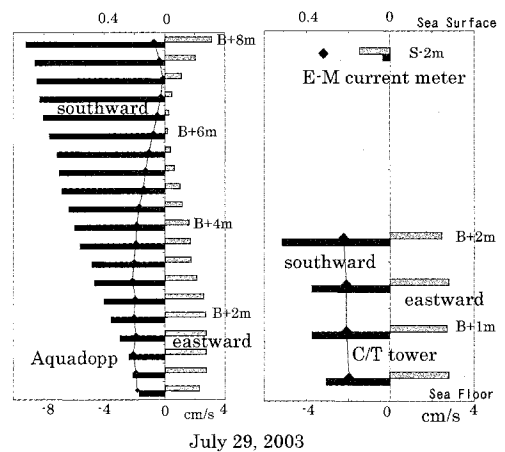


図-9 7月29日(筑後川流量に比べてさらに降水量が多い時)の残差流と潮流楕円率の鉛直分布

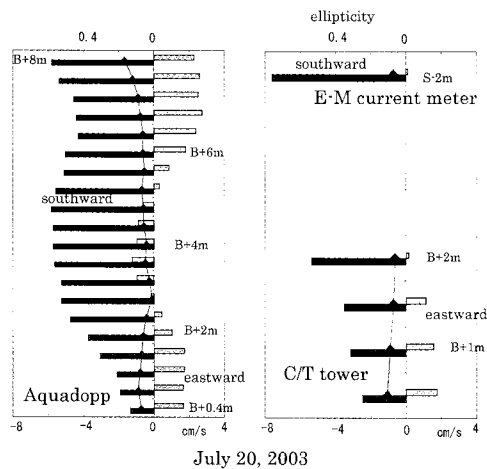


図-8 7月20日(降水量が非常に多い時)の残差流と潮流楕円率の鉛直分布

4. 考 察

有明海のように一端が開いた半閉鎖的で単純な地形の内湾においては、有効湾長を L 、重力加速度を g 、平均水深を H とすると、副振動周期 T は、 $4L/\sqrt{gH}$ の式から近似的に求めることができる。有明海を想定して $L=90$ km、 $H=15$ m を代入すると、 T は約8時間10分となり、潮位の調和解析で現れた8時間22分のピークは、有明海の副振動と推測される。また、このような単純地形の内湾では、副振動周期がこの程度で平均水深が振動流のストークス層厚より大きい場合には、外から進入する半日周期の潮汐は、共振に近い増幅効果によって、湾奥で潮汐振幅が2~2.5倍になるが(Yasuda, 1980)、有明海の国内最大の潮差は、このような副振動周期によって潮汐

の半日周期成分が増幅した結果であると考えられる。内湾の副振動は、風などの外的要因や非線形効果に伴って現れ易いが、有明海は干潟が広がって浅い領域が広く分布するなど非線形効果が生じやすい環境にあると考えられる。これについては、今後、数値計算等で明らかにしていく必要があると考えられる。

図-7の残差流は、大量な筑後川河川水の流入に伴う、鉛直循環を形成する場合であるが、図-8と図-9は河川流入水の量は少ないが、降雨によって干潟に淡水が供給されたような場合で、このときには鉛直循環流は形成されず全水深的に残差流が湾奥から流出するような傾向を示している。そのメカニズムは、現段階では次のようにものと推測している。

干潟に降った淡水は、水深が浅いことから、底面摩擦は相対的に大きくなって流速は小さく、位置エネルギーを伝達する $\sqrt{gH}$ も非常に小さいために、干潟の上に留まりやすく、結果的に干潟から沖合に向かって弱い海面傾斜が維持されるのではないかと考えられる。また、海底近傍で沖合に向かう残差成分はこのような海面傾斜に引き起こされるものではないかと考えられる。この現象は、通常の密度流に伴う鉛直循環流と異なり、底層の残差流を干潟から押し出すように流れ、干潟を広げる効果を持つものとして遠浅の干潟を形成維持する上で重要な役割を果たすものと考えられる。

先にも記したように、底層のDOは潮流の主軸方向に分布していると推測されるが、図-2に示す前半の大潮時のDOの上昇は、図-7のような鉛直循環流に伴う底層で北上する残差流に引き起こされていると考えられる。一方、後半の大潮時にはDOが減少しているが、これは図-9のように降雨に伴う底層で流出する残差流に引

き起こされているものと推測される。このような傾向は、図-8の20日過ぎや25日過ぎにも、わずかではあるがDOの低下として認められる。観測期間の前になるが、7月7日、8日、11日も降水量が多くなっており、観測開始日の12日にDOが低下していたことは、このような残差流の存在を裏付けていると思われる。なお、底層のDOは、底泥の $Md\phi$ の複雑な分布(陶山ら, 2002)や植物プランクトンなどとも関連しており、その変動過程は一側面からの説明では割り切れないが、ここにあげた物理現象はDO変動に関わる沿岸海洋過程の一つと考える。

5. おわりに

この度の夏季洪水期の定点観測から、今後の課題として次のようなことを挙げることができる。

(1) 周期8時間22分の副振動と半日周期潮汐の増幅について

有明海の埋め立てなどのによって、最近では潮差が小さくなり(宇野木, 2002)、さらにはそのために潮流が弱くなって、分散係数や海水交換性が減少しているのではないかと言われているが(有明プロジェクト研究チーム, 2002)、このことは副振動の周期の変化にも現れているはずで、過去から現在に至るまでの長期間の潮汐データを解析して、副振動の周期や振幅の変化を調べることは、有明海の長期的な環境変動を理解し、今後の埋め立てなどを計画する上で有意義であると考えている。

(2) 淡水流入に伴う残差流の鉛直分布について

干潟への降雨が底層で流出する残差流を生み出すメカニズムは、ここでは仮説として提示したが、このような現象はマングローブ周辺海域でも期待され、沿岸海洋過程の重要な物理現象の一つになるものと考えられる。こ

れについては、理論的解析や数値実験によってモデル化を進めている。

DOの変動に関わる再懸濁現象については、C/TタワーやAquadoppから貴重なデータが得られたが、これについては別のところで報告する(安田ら, 投稿中)。

謝辞: 本研究は文科省科研費補助金(基盤研究(B)(2)15360268, 研究代表者: 松永信博)の助成を受けて行われたもので、ここに記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 阿部 淳・松永信博・児玉真史・徳永貴久・安田秀一 (2003): 有明海西部海域における高濁度層の形成と酸素消費過程, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 966-970.
- 有明プロジェクト研究チーム (2002): 有明プロジェクト中間報告書(その1), 161 p.
- 宇野木早苗(2002): 有明海における潮汐と流れの変化, 海と空, 78-1, pp. 19-30.
- 陶山典子・奥石裕一・須田有輔・村井武四 (2002): 底質から見た有明海北部の海域区分とマクロベントスの分布, 水産大学校研究報告, 51-4, pp. 105-114.
- 安田秀一・松永信博・徳永貴久・阿部 淳・高島創太郎・河野晋悟・宇都帝信・鬼塚 剛・伊澤瑞夫・河野史郎 (2004): 有明海北部海域の物理的環境特性—洪水に伴う潮流・濁度・DOの変動—, 水産大学校研究報告(投稿中)
- 横山勝英・宇野誠高・森下和志・河野史郎 (2002): 超音波流速計による浮遊土砂移動量の推定方法, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1486-1490.
- Yasuda, H. (1980): Generating mechanism of the tidal residual current due to the coastal boundary layer, J. Oceanogr. Soc. Japan, 35-6, pp. 241-252.
- Yasuda, H. (1988): Vertical structure of tidal current ellipse in a rotating basin, J. Oceanogr. Soc. Japan, 43-5, pp. 309-318.
- Yasuda, H., Y. Takasugi and T. Higo (1997): Generation of high turbidity layers in the Seto Inland Sea, J. Coast. Res., SI, 25, pp. 31-40.