

(31) 博多湾湾奥部における貧酸素水塊の発生予測

Prediction of the Occurrence of an Oxygen-deficient Water Body in the Closed Section of Hakata Bay

熊谷博史*, 鮎本健治**

Hiroshi KUMGAI*, Kenji SUSHIMOTO**

ABSTRACT; In this study, on the basis of survey data, we present the major incidents responsible for the formation of an oxygen-deficient water body in the closed section of Hakata bay. Further, we propose a method to predict the occurrence of the oxygen-deficient water body. Observations with regard to the oxygen-deficient water body in the closed section of Hakata Bay were noted in the summer seasons of both 2001 and 2002. In that area, oxygen deficiency occurred in 2001; moreover, it was not identified in 2002. By comparing these observed data, it was found that the major contributing factors for generating oxygen-deficient water in the summer season are (a) salinity stratification caused by the input of freshwater after rainfall and (b) an increased consumption rate of oxygen due to the degradation of sedimented organic matter of terrestrial and primary production origins. On the basis of these findings, we formulated a prediction relation expressed as a function of the effective accumulated precipitation. Furthermore, the following results were obtained. (1) The concentration of dissolved oxygen in the bottom layer of that area decreased with the effective accumulated precipitation. (2) An oxygen-deficient water body is generated when the effective accumulated precipitation exceeds 150 mm.

KEYWORDS; Oxygen-deficient water body; density stratification, oxygen consumption rate

1 はじめに

閉鎖性海域で生じる貧酸素水塊は、底生動物の斃死を招き漁業に影響を与えるため問題視されている。しかし、発生する貧酸素水塊の時期や程度を正確に予測することは困難である。その理由としては、降雨・日照・流入負荷・密度成層・底層での酸素消費等の多くの影響因子が貧酸素水塊の挙動に関与しているためである。通常、これらの因子を考慮に入れた生態系モデルを用いて発生予測が行われるが、その予測計算に時間を要すること、計算の際に必要な設定パラメータが多いことなどが課題となっている。

本研究では貧酸素水塊が発生した年と発生しなかった年において現地調査を行い、対象領域における貧酸素水塊の発生に係わる主要因子を調査した。そしてこれらの情報を用いて、貧酸素水塊予測式を作成し、貧酸素水塊が発生する条件について考察した。

* 福岡県保健環境研究所 (Fukuoka Institute of Health and Environmental Sciences)

** 日本ミクニヤ (Mikuniya Corporation)

2 方法

2.1 観測地点

Fig.1 に示す海域において観測を行った。当海域は、博多湾の中でも最も湾奥に位置しており、現在人工島（アイランドシティ）の建設が進められている海域である。

今回、和白干潟に面する浅瀬の中心付近に St.A（平均水深：約 2.0m），そこから約 1km 間隔に、St.B（平均水深：約 3.8m），St.C（平均水深：約 3.5m），St.D（平均水深：約 4.2m），St.E（平均水深：約 4.2m）の計 5 地点を設定した。本研究における博多湾湾奥部はこの 5 地点の総称とする。

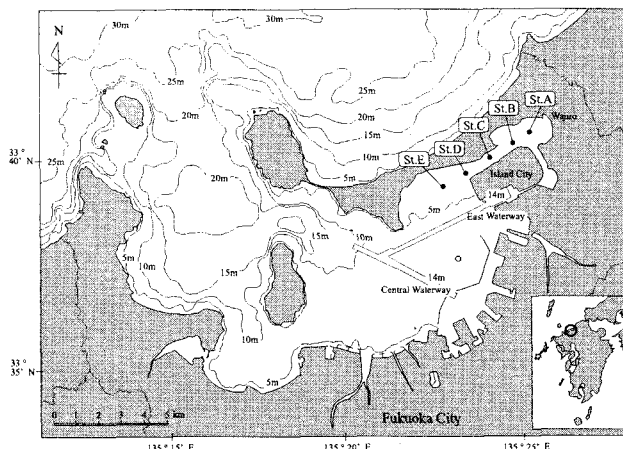


Fig.1 博多湾水質調査地点

●は本研究での調査地点を示す。

2.2 観測期間および観測項目

観測については 2001 年 5 月 22 日から 2001 年 9 月 23 日の 4 ヶ月間，2002 年 6 月 13 日から 2002 年 9 月 14 日の 3 ヶ月間，週に一度の割合で実施し，週周期の水質変動を把握した。また，半日周期の干満による水質変動を把握するため，干潮時と満潮時に観測した。その際，流動による影響を最小限に抑えるため，干・満潮時刻の前後 1 時間に観測した。

観測項目は以下の通りである。

水温・塩分・溶存酸素濃度（以下 DO 濃度）については，マルチ水質モニタリングシステム（株 堀場製作所，U-22 U-23）を用いて，水面から水深方向 0.5m 毎と水表面下 0.1m，海底上 0.1m で測定した。

Chlorophyll-a（以下 Chl-a）については，水面下 0.5m と海底上 0.5m，その間を 3 等分する 2 水深の計 4 点で採水した後，実験室に持ち帰り分析した。試料をガラス繊維濾紙（Whatman GF/C）でろ過した後，85% アセトン溶液で 1 日間抽出した抽出液を，紫外可視分光光度計（株島津製作所 UV1600PC）を用いて吸光度法により測定した。

全天日射量と降水量については，福岡管区気象台における観測データを用いた。

なお本研究では貧酸素水塊を $3.0\text{mg} \cdot \ell^{-1}$ 以下の水塊と定義する。

3. 結果

博多湾湾奥部における満潮時の DO 濃度分布の経時変化を示す（Fig.2:2001 年満潮時，Fig.3:2001 年干潮時，Fig.4:2002 年満潮時）。満潮時については 6 月 16 日の St.D・E，6 月 30 日の St.D・E，7 月 7 日の St.E，8 月 12 日の St.E，干潮時については 2001 年 5 月 22 日の St.E，6 月 30 日の St.D・E が，悪天候のため欠測となっている。

2001 年については，6 月 30 日 - 8 月 12 日にかけて貧酸素水塊が発生した。貧酸素水塊は下方に留まっている場合もあれば，水面付近まで発達している場合もあった。貧酸素水塊は 8 月 26 以降は解消していた。

2002 年については，6 月 13 日 - 9 月 14 日にかけて貧酸素水塊は確認されなかった。

2001 年・2002 年ともに DO 濃度分布は，水平方向の変動に比較して鉛直方向の変動の方が大きかった。

図中において，観測期間中の全天日射量および日降水量の経日変化を示す。これによると 2001 年には 200mm を越える降雨（6 月 19 日）や，100mm 程度の降雨が 3 回（6 月 23 日・7 月 6 日・7 月 12 日）あったが，一方で 2002 年には 100mm 以上の降雨はなかった。両年で 6 月から 9 月までの 4 ヶ月の降水量を比較すると，2001 年で 1091mm，2002 年で 508mm であった。過去 10 年間（1990 - 2000 年）の同期間の平均降水量

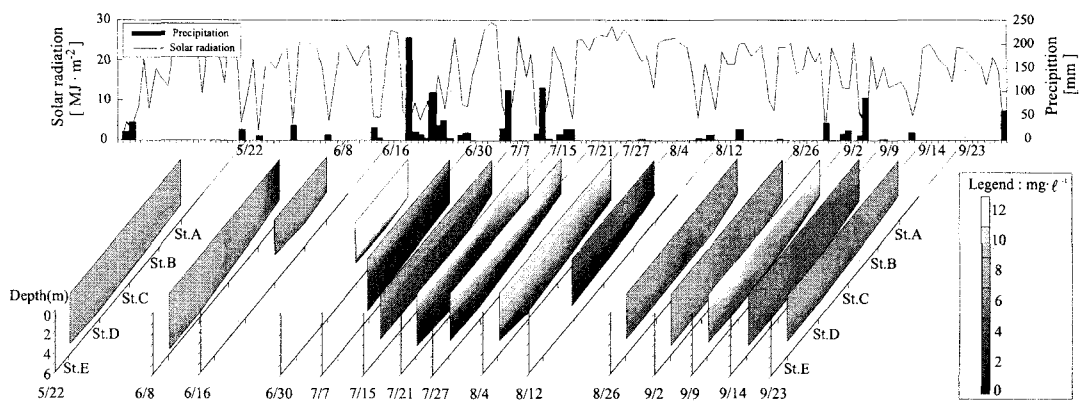


Fig.2 2001年満潮時におけるD0分布とその間の降雨量及び全天日射量

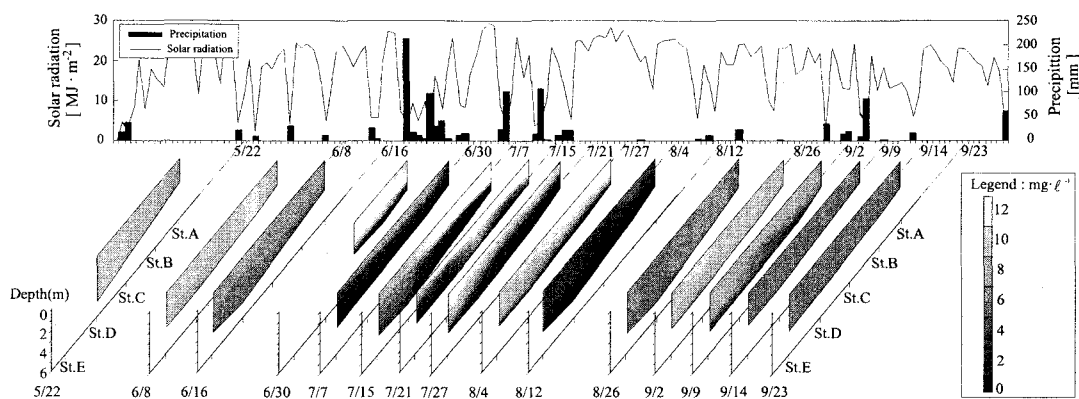


Fig.3 2001年干潮時におけるD0分布とその間の降雨量及び全天日射量

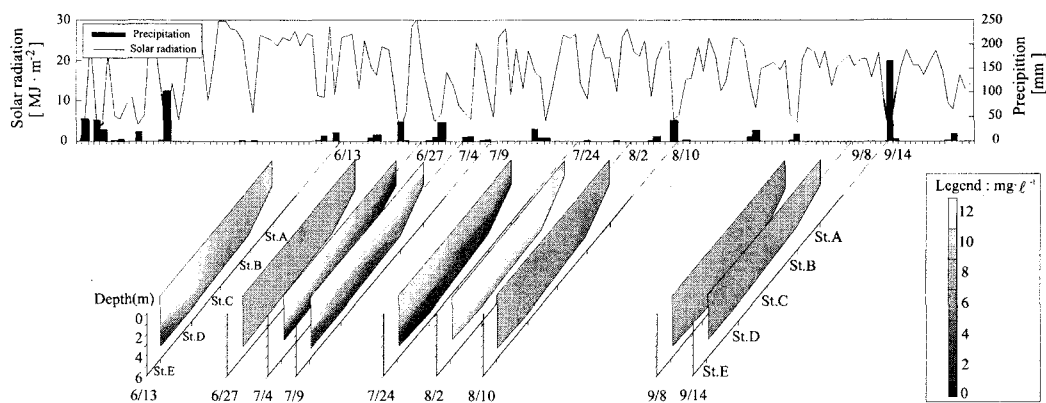


Fig.4 2002年満潮時におけるD0分布とその間の降雨量及び全天日射量

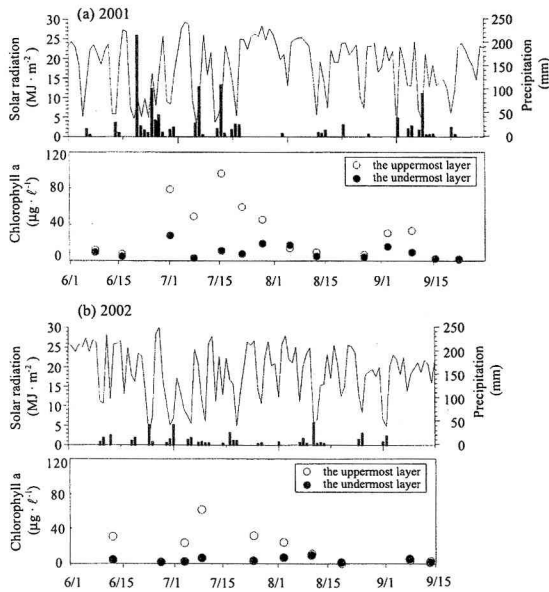


Fig.5 (a)2001 年と (b)2002 年の上段：気象データ (全天日射量・降水量)、下段：最上・最下層のクロロフィル a (St.C)

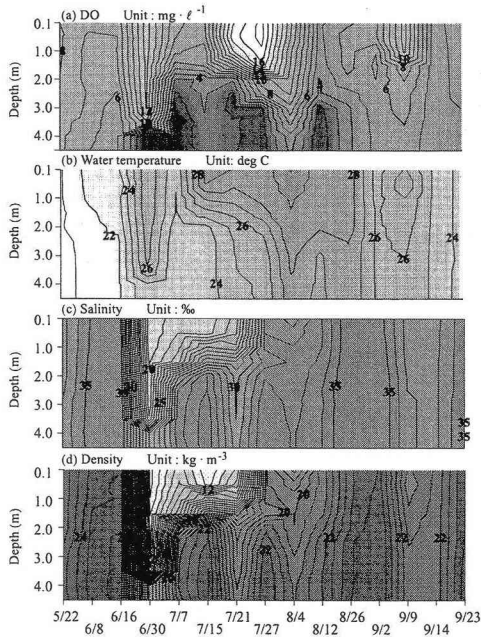


Fig.6 St.C における (a)DO, (b)水温, (c)塩分, (d)密度の経時変化 (2001 年)

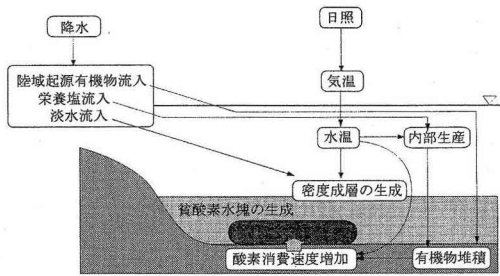


Fig.7 貧酸素水塊発生の模式図

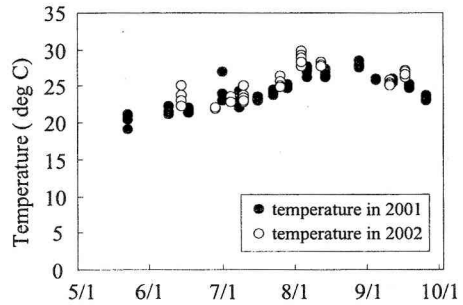


Fig.8 2001 年と 2002 年の最下層水温の経時変化

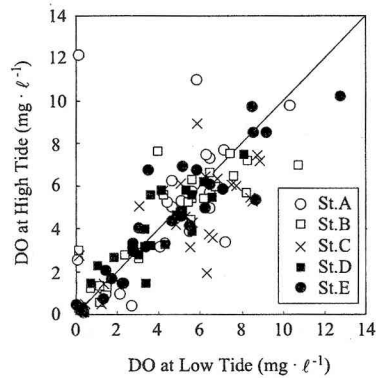


Fig.9 満潮時と干潮時の底層 DO 濃度の比較

Table 1 各地点の満・干潮時の底層 DO 濃度の最小 2 乗誤差 (RMSE)

Sampling Point	RMSE
St.A	0.605
St.B	0.307
St.C	0.396
St.D	0.254
St.E	0.263

が、868mmであることから、2001年は平年以上、2002年は平年以下の降水量であった。

観測中、100mm程度の降雨時には、上層のChl-aが増加し（Fig.5(a)）、その結果上層のDO濃度も過飽和になる傾向がみられた。これは、陸域からの栄養塩流入により植物プランクトンが増加したものと考えられる。また降雨とその後の過飽和の生じる時期について着目すると、降雨の直後ではなく数日後に過飽和になる場合（例えば2001年7月7日、7月15日）がみられた。これは植物プランクトンの増殖制限因子（例えば日射量・水温等）が最適条件になるまでの時間差によって生じていると考えられる。

Fig.6に2001年のStCにおける(a)DO濃度・(b)水温・(c)塩分・(d)密度の経時変化を示した。密度については水温・塩分により海水の状態方程式³⁾より算出したものである。

これによると、2001年6月30日-7月7日、7月21日-27日、8月12日に貧酸素水塊が発生しているが、これらは同時期の密度成層の発達に伴い生じている。また、密度成層の発達時には上層水のDOが飽和状態になっている。一方、貧酸素水塊の発生は、密度成層の発達時及びDOの飽和時に対して時間遅れがみられる。その要因のひとつとして、密度成層発達後の底層酸素消費に時間を要することが挙げられる。なお鮎本²⁾は博多湾のStC付近における植物プランクトンの沈降速度を約 $0.72\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ と推計している。StCの平均水深は3.5mなので、この沈降速度を用いると、表層の植物プランクトンは4.8日で海底に到達する。下層に沈降する植物プランクトンはさらなる酸素消費源となり、底泥での酸素消費速度を増大させる。このように、植物プランクトンの発生から底層への沈降までの時間経過も、貧酸素水塊発生の時間遅れの原因と考えられる。

4 考察

4.1 各種作用が貧酸素水塊へ与える影響

貧酸素水塊の生じた2001年と貧酸素水塊の生じなかった2002年に対して、貧酸素水塊の発生要因を比較し考察する。

貧酸素水塊の生成機構は一般に次のように考えられている³⁾。海面からの日射による加熱と、河川から淡水流入によって密度成層が生成される。このような条件下で、富栄養化により表層で赤潮が発生し、大量の植物プランクトンの死骸や排泄物等が沈降すると、下層ではバクテリアの作用によって有機物がDOを消費し分解される。しかし、密度成層によって鉛直混合による酸素供給が少ないために供給が消費に追いつかず、貧酸素水塊が発生する（Fig.7）。観測結果によれば、博多湾湾奥部においてもこれらの要因に支配されていると考えられる。ここでは、(1)密度成層、(2)酸素消費速度、(3)潮流による移流拡散について取り上げる。

(1) 密度成層への水温・塩分の影響

密度成層には水温によるものと塩分によるものがある。Fig.6によると、密度の空間分布の経時変化は、塩分の空間分布の経時変化とほぼ同様の傾向を示していた。そして密度勾配の増大時に対応して、貧酸素水塊が発生していた。特に2001年6月19日の降雨に伴う密度成層の生成が顕著であった。このように、密度と塩分の空間分布が対応していることは、密度成層の生成原因が降雨に伴う淡水流入によるものであることを示している。

水温の空間分布の経時変化についても、おおよそ密度の空間分布の経時変化と同様の傾向を示していた。ただし、調査地点の平均水深が2.0-4.2mと浅海域であることから、温度成層は日照効果によって生成したものというよりも、降雨により海水と異なる温度を持った淡水が流入したことによるものと考えられる。

以上から博多湾湾奥部では密度成層の生成には降雨に伴う淡水流入の影響が大きいといえる。

(2) 水温と海底堆積物の分解に依存した酸素消費速度

酸素消費速度は細菌による海底堆積物の分解や底生動物の呼吸、窒素の酸化反応等の要因が関係しているといわれる⁴⁾。ここでは海底堆積物の分解に着目し、その変動要因である泥温と海底堆積物についてとりあげる。

泥温については、今回の現地観測で測定していない為、底層水温を対象する。兼子⁹⁾の調査によれば、博多湾の底層水温と泥温は1℃未満の差であり、両者は同様の季節変動を示している。5地点の底層水温の経時変化を Fig.8 に示す。底層水温は5月22日から8月26日にかけて上昇していき、それ以降は下降している。この傾向については、2001年・2002年とも同様の結果を示している。酸素消費速度が泥温のみに依存すると仮定すれば、酸素消費速度は両年で変化がないこととなるが、実際には2001年に貧酸素水塊が生じていることから、2001年の貧酸素水塊の発生については別の要因が影響していると考えられる。

海底堆積物については、陸域起源のものと内部生産起源のものがある。石田⁹⁾らは、博多湾で炭素同位対比を用いて海底堆積物中の有機物を調べた結果、約4割を陸域起源と見積もっている。前述のように、2001年の6-9月の降水量は2002年に比較して約2倍であったことから、2001年には2002年に比較して大量の陸域起源有機物が湾内に流入・堆積したと考えられる。また、内部生産についても、2001年と2002年の最上層のChl-aを比較すると、Fig.5 から明らかなように2001年は2002年よりもChl-aが高く植物プランクトンの増殖が盛んであったことを示している。増殖した植物プランクトンの大部分は沈降し、酸素要求源である海底堆積物となることから、この内部生産に起因する海底堆積物量の差異も、2001年の貧酸素水塊発生に関わっていると考えられる。

降雨による淡水流入は、陸起源有機物・内部生産有機物からなる海底堆積物を増大させ、貧酸素水塊の発生要因となる。

(3) 潮流による移流・拡散

2001年の博多湾湾奥部(St.D付近)における連続調査^{7),8)}では底層DO濃度の急激な低下が確認されているが、これは付近で発生した貧酸素水塊が潮流の移流・拡散によって移動したものと考えられる。本調査でも、貧酸素水塊が湾奥部以外で生成し、潮流の効果によって湾奥部に輸送された可能性がある。しかし、Fig.2, Fig.3によれば、満潮時と干潮時では成層の厚さに変動は生じるものの、水平方向にほぼ様な傾向を示している。2001年及び2002年の全観測地点における満・干潮時の底層DO濃度を比較した結果を Fig.9 に示す。満潮時と干潮時の底層DO濃度は幾分変動はみられるものの同程度の値となっている。底層DO濃度の変動の要因としては、局所的な貧酸素水塊の潮流による移動や、密度成層厚の変動が挙げられる。Table 1に、満潮時と干潮時の底層DO濃度の平均2乗誤差(RMSE)を示す。湾奥側調査地点のRMSEが湾央側調査地点のRMSEよりも大きくなる傾向がある。湾奥側調査地点では、水深が浅くなるため密度成層の安定性が低くなり、変動が大きくなるためと考えられる。

すなわち湾奥全体でみると、貧酸素水塊は湾奥において発生したものであり、湾奥以外の場所で発生したものが湾奥に輸送されたものとは考えにくい。

以上の結果から、博多湾湾奥部における貧酸素水塊発生に対する寄与の高い要因として、(a)降雨時の淡水流入に伴う密度成層の発達と(b)酸素要求源となる海底堆積物の増加が挙げられる。

4.2 濃度予測モデルの作成と酸素濃度の予測

篠原⁹⁾は、博多湾における夏季の平均底層DO濃度と6,7,8月淡水流入量の関係を調べている。それによれば1980年から1996年の間では統計学的な関係がみられなかったが、1980年から1992年の13年に限ると95%信頼区間で相関係数-0.5の有意な相関を得ている。ここで淡水流入量と貧酸素水塊の間で明確な関係がみられなかったのは、博多湾内の数カ所の平均底層DO濃度と3ヶ月分の淡水流入量を対象にしていることが原因として考えられる。今回の現地調査結果では、毎日の降雨量に応じて週以下の時間スケールでDO濃度分布は変動している。そのため貧酸素水塊に対する降雨量や淡水流入量の影響を考慮する場合には少なくとも日スケールで解析する必要がある。

博多湾湾奥では、(a)降雨時の淡水流入に伴う密度成層の発達と及び(b)酸素要求源となる海底堆積物の増

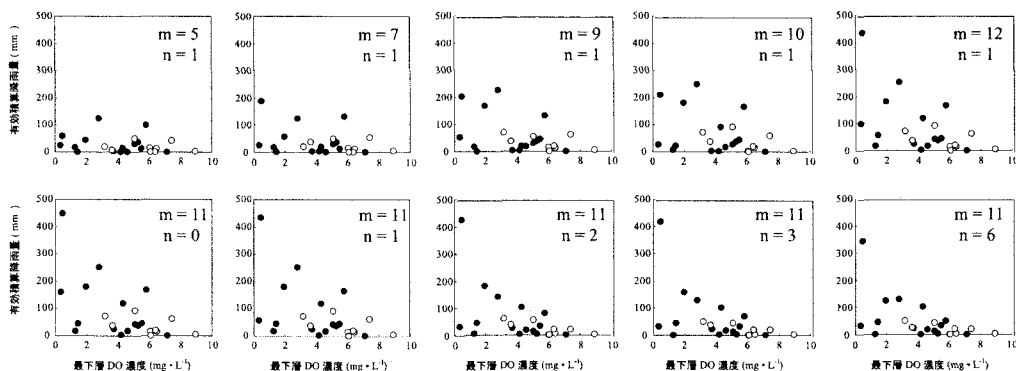


Fig.10 m, n を変化させた際の有効積算降雨量と最下層 DO の関係

加が、底層 DO 濃度に対して寄与の高い要因であることから、貧酸素水塊の発生は予測対象日の以前の日降水量の積算によって予測可能であると考えられる。さらに底層酸素消費にはある程度の時間を要するため、予測日近傍の降雨量は、酸素消費には直接関与しない。つまり底層 DO 濃度は、過去 m 日にさかのぼる降雨積算量から最近 n 日(但し $m > n$)の降雨積算量を除いた量が実質的に貧酸素水塊の濃度に影響を及ぼすと考えられる。ここでは、この降雨量を有効積算降雨量 r_e とする。

$$r_e = \sum_{k=1}^m r_k - \sum_{k=1}^n r_k \quad [1]$$

ここで、 r_k : 予測日から k 日前の降雨量 (mm) である。有効積算降雨量は、 m, n という二つのパラメータによって規定されるので、これらを設定する必要がある。以下、2001 年および 2002 年の St.C における満潮時底層観測 DO 濃度と有効積算降雨量との関係を Fig.10 に示し設定を行う。

経験的に、有効積算降雨量が多いほど、(a)・(b)の影響度が大きくなり、貧酸素化が進むと考えられる。ここでは底層 DO 濃度が減少するほど、有効積算降雨量は指数関数的に増加すると仮定する。

まず m の値について考察する。 m を過大に見積もると、貧酸素水塊に影響のない降雨を含めることとなり、過小に見積もると、貧酸素に影響のある降雨を除外することとなる。Fig.10 の上列は、 $n=1$ に固定して m を変化させた結果である。 $m \leq 10$ では、 $m \geq 11$ で考慮される有効積算降雨量 420mm のデータが除外されてしまうため $m=11$ とした。

次に n の値について考察する。 n を過大に見積もると、必然的に m との降雨間隔が少なくなり、貧酸素に影響のある降雨を除外することとなる。一方、過小に見積もると貧酸素に影響のない降雨を含めることとなる。Fig.10 の下列は、 $m=11$ に固定して n を変化させた結果であるが、 $m=0-2$ では、現在の貧酸素化に関係のない前々日から前日の降雨が含まれているため、包絡線の曲率が小さくなっている。以上から $n=3$ とした。

$m=11, n=3$ としたときの図中のデータ群の上部外縁に対して次の式を当てはめる (Fig.11)。

$$r_e = 500 \cdot \exp(-0.4 \cdot DO) \quad [2]$$

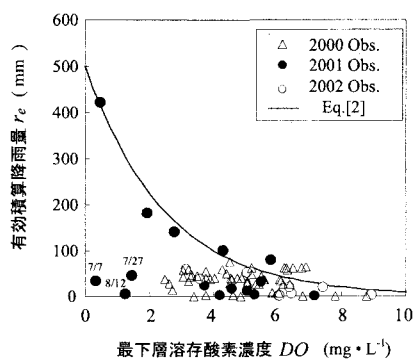


Fig.11 有効積算降雨量と最下層 DO の関係 ($m=11, n=3$)

ここで DO : 予測日の DO 濃度 ($\text{mg} \cdot \ell^{-1}$), r_e : 有効積算降雨量 (mm) である。また, [2]式は次のように書き換えることができる。

$$DO = (r_e / 500)^{-2.5} \quad [3]$$

ここでは貧酸素水塊の定義を $3\text{mg} \cdot \ell^{-1}$ 以下の水塊としているが, [3]式によれば有効積算降雨量が 150mm 以上であるときに, 博多湾の湾奥部において貧酸素水塊が底層で生じることが予測される。すなわち 2002 年において貧酸素水塊が発生しなかったのは, 夏季に 150mm 以上の有効積算降雨量がなかったためと検証される。

Fig.11 に, 2000 年に博多湾湾奥部 (StD 付近) で行われた連続観測¹⁰⁾の満潮時のデータを付記する。多くの値が式の下側にプロットされている。このような値については, 有効積算降雨量が少なかつたにもかかわらず底層 DO 濃度が低くなる結果である。これは有効積算降雨量の算出開始時の DO 濃度 (8 日前の DO 濃度) を考慮していないことにある。つまり式から導かれる予測値は, 起こりうる DO 濃度の最大値となり, 実際にはそれより前の貧酸素の履歴により予測値以下の DO 濃度となる。2001 年では特に 7 月 7 日, 7 月 27 日, 8 月 12 日については, 有効積算降雨量が少ないにもかかわらず低い DO 濃度値を示している。これらも前回の観測 (6 月 30 日, 7 月 21 日, 8 月 4 日) から明らかなであるが, 既に底層は貧酸素化状態にあり, それらの履歴を受けている。

この式によれば現時点から 8 日前の降水量データを用いることで, 3 日後の貧酸素化がある程度予測できる。なお, この式を適用する為には, 対象海域が博多湾湾奥部と同様の貧酸素水塊発生条件下にあることを確認する必要がある。そのような条件下にあれば, データを収集し, 式中のパラメータおよび変数のパラメータ m, n を調整することで適用可能となる。本モデルの特徴はパラメータの少なさにあり, パラメータの調整及び計算自体も容易である。また, 計算に必要なデータは降雨データのみであり, 気象庁電子閲覧室により入手可能である。

今後の課題は, この予測式を事前の貧酸素状態を考慮したものに改良することである。これにより正確な貧酸素水塊の発生予測が可能になると考えられる。

5. 結論

以上から次のように結論付けられる。

- (1) 博多湾湾奥部の底層 DO 濃度に対して寄与の高い要因は, (a) 降雨時の淡水流入に伴う密度成層の発達と (b) 酸素要求源となる海底堆積物の増加である。
- (2) 博多湾湾奥部では有効積算降雨量が大きいほど底層の DO 濃度が低下し, 有効積算降雨量が 150mm を超えると $3\text{mg} \cdot \ell^{-1}$ 以下の貧酸素水塊が発生する。
- (3) 2002 年において貧酸素水塊が発生しなかったのは, 夏季の有効積算降雨量が 150mm に満たなかったためである。

参考文献

- 1) 気象庁 (1999): 海洋観測指針第一部
- 2) 鮎本健治 (2002): 博多湾奥部にける水質変動と貧酸素水塊発生機構に関する研究, 九州大学大学院工学府修士論文
- 3) 湯浅一郎 (1989): 瀬戸内海の貧酸素水塊, 海の気象, 35 巻, 5・6 号, 90-102
- 4) 松梨順三郎 (1993): 環境流体汚染, 森北出版
- 5) 兼子由起子 (2003): 博多湾におけるホトトギスガイとシズクガイの変動に関する研究, 福岡大学工学部学位論文

- 6) 石田知行, 有馬立身, 稲垣八穂広, 出光一也, 川村秀久, 中嶋雅孝, 松岡信明 (2005) : 夏季の博多湾における有機態懸濁物および堆積物の炭素同位対比, 水環境学会誌, Vol. 28, No. 6, pp. 405-410
- 7) 前掲 2)
- 8) 熊谷博史・鮎本健治・楠田哲也 (2001) : 長期連続観測と数値解析による貧酸素水塊の生成消滅機構の解明, 第 38 回環境工学フォーラム講演集, pp. 97-99
- 9) 篠原満寿美 (2002) : 福岡湾における貧酸素水塊の発生状況, 福岡水技研報, 第 12 号, p. p. 81-87
- 10) 前掲 8)