

# 離散ウェーブレット変換を用いた有明海 湾奥部の貧酸素水塊の変動特性と気象要素

VARIABILITY CHARACTERISTICS AND METROLOGICAL ELEMENT OF  
OXYGEN-DEFICIENT WATER IN ARIAKE SEA BAY INTERIOR PART WHERE  
DISCRETE WAVELET TRANSFORM WAS USED

矢北孝一<sup>1</sup>・滝川清<sup>2</sup>・園田吉弘<sup>3</sup>・増田龍哉<sup>4</sup>・

五十嵐学<sup>5</sup>・杉野拓之<sup>6</sup>・岩永豊<sup>7</sup>・村岡芳郎<sup>8</sup>

Kouichi YAKITA, Kiyoshi TAKIKAWA, Yoshihiro SONODA, Tatsuya MASUDA,  
Manabu IGARASHI, Hiroyuki SUGINO, Yutaka IWANAGA and Yoshiro MURAOKA

<sup>1</sup>正会員 熊本大学工学部技術部 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

<sup>2</sup>フェロー 工博 熊本大学教授 沿岸域環境科学教育研究センター (同上)

<sup>3</sup>正会員 熊本大学自然科学研究科 (同上)

<sup>4</sup>正会員 工博 熊本大学特任助教 大学院先導機構 (同上)

<sup>5</sup>正会員 研究員 沿岸域環境科学教育研究センター (同上)

<sup>6</sup>学生会員 熊本大学工学部社会環境工学科 (同上)

<sup>7</sup>九州農政局 整備部農地整備課 (〒860-8527 熊本市二の丸1-2)

<sup>8</sup>国際航業株式会社 社会基盤事業部 (812-0013 福岡市博多区博多駅東3-6-3)

The problem concerning the environmental deterioration of an increase of oxygen-deficient water and the red tide occurrence occurs in the littoral region in various places where Ariake Sea was included. A lot of investigations and the research on the generation mechanism of oxygen-deficient water are being executed by the government and laboratories. However, a complex system by the interaction of a physical process, the metrological element, and the living thing is formed in the littoral region. It is a current state that the generation mechanism of oxygen-deficient water is not clearly shown. In the present study, it paid attention to changes with the lapse of time such as oxygen-deficient water, the weathers, and hydrographic phenomenon generated in Ariake Sea. And, variability characteristics of oxygen-deficient water and the relativity of the metrological element were examined by using the discrete wavelet transform. As a result, it is expected for the generation cycle of oxygen-deficient water and the influence period of the metrological element to become clear, and to become the index of the site investigation and the evaluation approach.

**Key Words:** *Oxygen-deficient water, Discrete wavelet transform, Metrological element, Ariake sea*

## 1. はじめに

近年, 有明海を含めた各地の沿岸域において, 赤潮多発や底生生物種数の激減など環境悪化が顕在化している. この環境悪化の要因の一つとして, 溶存酸素濃度低下による貧酸素水塊の形成が指摘されている. 貧酸素水塊の発生機構に関する調査・研究に際しては, 海域全体の物理・化学的環境と生物生産過程を視野に入れた総合的な取り組みが必要であり, 各府省庁や研究機関等で数多くの調査・研究が実施されている.<sup>1), 2), 3), 4)</sup>

しかしながら, 沿岸域を含む海域では, 潮汐による移流・拡散, 有機物の堆積・巻き上げ等の物理的過程, また, 降水・風・日照等の気象要素の影響,

さらには多種多様な生物が存在しており, 各環境要因の相互作用による複雑なシステムが形成されていることから, 貧酸素水塊の発生機構が十分に明確化されていないのが現状である. 現在, 貧酸素水塊の大規模化, 長期化が有明海を含む閉鎖性の強い海域での大きな環境問題となっており, 発生パターンの定量的な評価が不可欠であり, その発生機構・条件の解明が急務である.

本研究では, 有明海で発生した貧酸素水塊と気象・海象等の経時変化に着目し, 波形の低周波から高周波への分解が可能である離散ウェーブレット変換を用いて, 貧酸素水塊の変動特性と気象要素等の関連性について検討した.

なお, 本研究では, 海水中の酸素飽和度が 40%

( $\approx 3.0 \text{ mg/l}$ )を閾値とし貧酸素状態とした<sup>5)</sup>。

## 2. 観測結果の考察

### (1) 観測地点・期間

観測地点は、図-1に示すように諫早湾中央付近のP1、水道部のP2、西側沿岸P3、P4、東側沿岸P5、P6の6地点とした。表-1に観測期間での平均水深を示す。表より観測点の水深は、P2地点を除き3~8mと比較的浅い海域に位置している。気象要素の気温、降雨量、風向・風速等のデータは、図-1に示したA1~A3の有明海沿岸域の気象庁アメダスデータ(<http://www.jma.go.jp/jma/>)を使用し、潮位は大浦検潮所を代表とした。解析期間は、酸素飽和度(以下D0)の連続データが得られた2007年7月~9月の夏期を対象とし、観測データのサンプリング時間は1時間としている。

### (2) D0と潮位・河川流量・風速ベクトル

図-2に、P1~P6での底層付近におけるD0の経時変化を示す。図より各地点での変動には、スパイクノイズ的な変動を示す高周波成分と貧酸素状態となる約2週間周期が6期確認できる。特に、8月中旬から濃度低下が約10日以上連続する期間は、ほぼ湾奥全域で確認できる。しかし、長期低下の発生時期は、地点間にタイムラグがあることから、時・空間的な変動を捉える必要性が示唆される。

上記に示したD0の経時変化との関連性を検討するために、図-3に大浦での潮位変動、図-4に筑後川と矢部川のハイドログラフ、図-5に各アメダス観

表-1 観測地点の平均水深

地点	(m)	地点	(m)
P1	8.0	P4	4.3
P2	23.0	P5	3.1
P3	5.1	P6	3.5

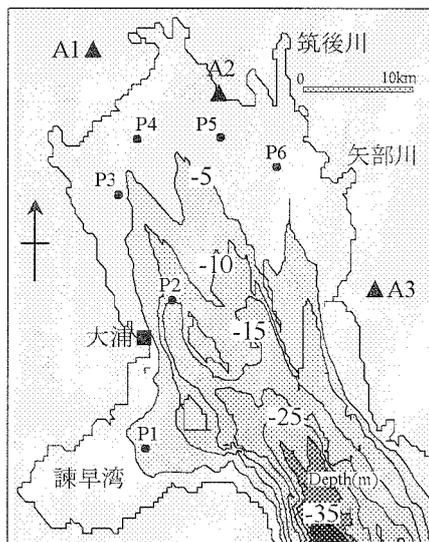


図-1 観測地点

測点での風速ベクトルの変化を示す。図-3には、潮位の25時間移動平均値も併記している。図より潮位変動には、図-4に示した台風接近時の小潮時の潮位の増加が捉えられている。また、8月中旬以降の貧酸素の時期は、大潮から小潮へ変化する時期になることが確認できる。図-4に示した流出量は日平均値であり、降雨量はA3地点の日量である。図中での下向き矢印は、台風4, 5, 11号の接近時期を示している。両河川からの流出量は7月上旬に、1000~3500m<sup>3</sup>/sec, 8月上旬には、300~1000 m<sup>3</sup>/secを記録している。

柳ら<sup>6)</sup>は、有明海全域における1990年~2000年のデータを基に、河川水の平均滞留時間を求めている。それによると平均滞留時間は、河川流量に依存し約2ヶ月と示されている。ここでは、有明海全域

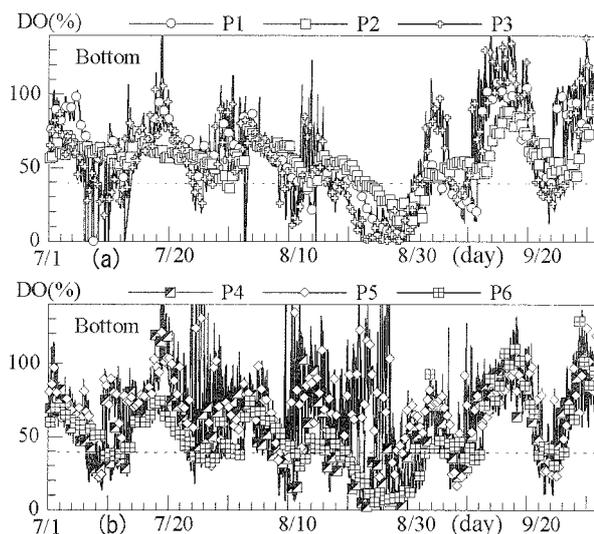


図-2 D0の経時変化

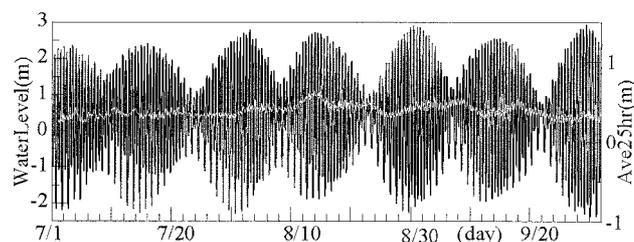


図-3 大浦験潮所の潮位変化

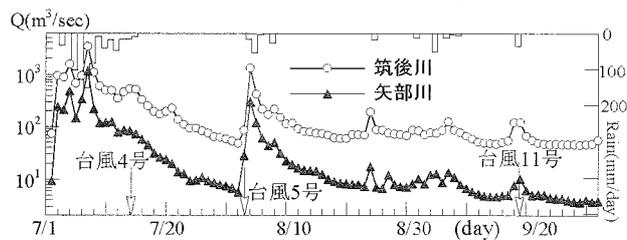


図-4 筑後川、矢部川のハイドログラフ

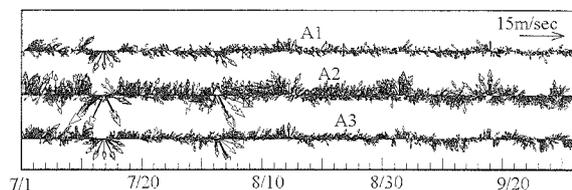


図-5 風速ベクトル

における河川流量を調査していないが、この7・8月上旬の流出量が8月中旬以降の貧酸素水塊の形成に寄与した可能性は否定できない。また、八木ら<sup>7)</sup>によると、潮汐が卓越する有明海干潟前縁域においても残差流に与える海上風の影響が大きいことが指摘されている。そこで、図-5に示した風速ベクトルを検討する。A2地点に注目すると、D0が低下傾向を示す8月中旬から、風速は湾奥へ向かう弱い南風が卓越し、貧酸素状態が解消される9月上旬に、約10m/secの南東からの風が連吹していることが分かる。有明海は、南東方向へ開いた形状となっており、風の吹送距離は、湾軸方向と直交する方向より長いことから、南東の風が卓越する場合は、エクマン輸送と波の成長等へ影響し、貧酸素水塊の解消に寄与することが推察される。

### (3) 密度躍層

貧酸素水塊の形成には、密度躍層の存在が指摘されている。しかし、全地点で鉛直プロファイルが取得されていないため、表・底層付近での塩分濃度、水温、気温、日照時間の変化を検討する。

一例としてP1, P2, P3, P5地点での塩分濃度の変化を図-6に、図-7に水温の変化、そして図-8にアメダス地点の代表として、A1地点での気温・日照時間の変化を示す。図-6より、各地点では7・8月上旬に表層付近で河川水の影響による塩分濃度の低下が全地点で観測され、底層との濃度差が生じている。それ以外の期間は、若干底層付近の塩分濃度が高めの値で推移し、貧酸素状態が海域全体で長期化する8月下旬では、表・底層での塩分の濃度差は小さい。一方、図-7の水温変化より、全地点において7・8月上旬の筑後川等の河川水の流入と台風による擾乱の影響で、表・底層での水温が等しい。その後、表層では30°C付近まで上昇し、P1, P2, P3地点では、貧酸素状態となる9月上旬まで表・底層での水温差が確認できる。その後、9月上旬に底層の貧酸素状態が解消する時期まで、底層の水温は徐々に上昇し、表層の水温約27°Cと等しくなる。この時期の図-8に示した海水温に影響する気温、日照時間の変化に注目すると、気温の変動と表層の水温の変動には、定性的に気温の上昇傾向から下降傾向への変化点に重なり、8月下旬を境として気温が低下傾向を示すことが分かる。観測期間でのD0変動の大きな特徴は、8月中旬～下旬の貧酸素状態は、大潮～大潮まで約14日連続しており、その他の短期的な貧酸素化が小潮時、回復期が大潮時となる形態と違う点である。

以上の観測結果の考察からD0、海水温、塩分濃度、気象要素等の変動には、台風等の擾乱による短期的な変動と徐々に進行する長期的な変動が混在していることが確認できた。次章以降では、離散ウェーブレット変換の概略を述べ、D0の変動特性と気象要素等との関連性を検討する。

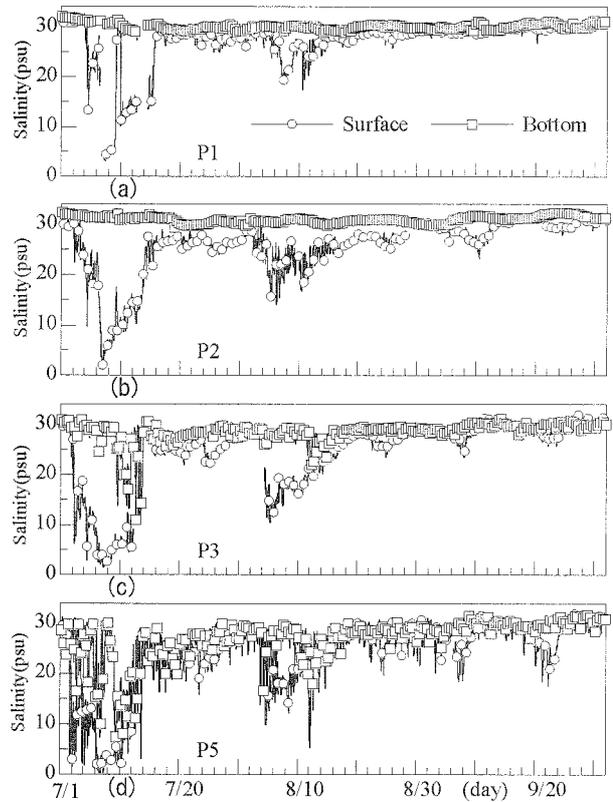


図-6 表層と底層付近の塩分濃度変化

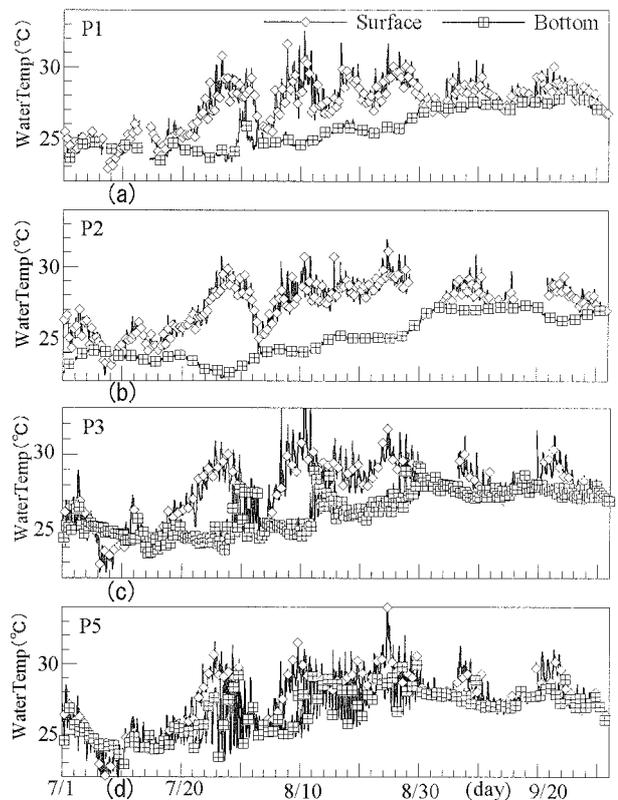


図-7 表層と底層付近の水温変化

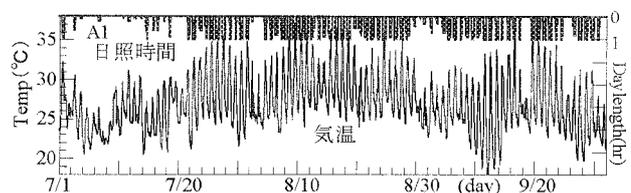


図-8 A1地点気温と日照時間の変化

### 3. 離散ウェーブレット変換

#### (1) 離散ウェーブレット変換の概略

これまで周波数特性を解析する場合、三角関数や指数関数を基底とした直交変換である FFT 等のスペクトル解析が用いられている。しかし、局所的に激しく変化する波形に対して解析精度が低下すること、周波数特性は定常な信号として取り扱い時間領域の情報が失われる等の欠点がある。上記に対して離散ウェーブレット変換（以下 DWT）は、信号中の様々なスケールの分布を元の時間軸情報を失わずに抽出し、周波数特性に合う局所フィルタを作用させながら変換を行う。これによって周波数精度は若干低下するが、時間・周波数分解が可能となり、多種多様な分野で利用されている。また、収束性のよい正規直交系となるため、データ圧縮やエネルギー解析等に用いられている<sup>8)</sup>。ただし、単一のウェーブレットでは、分離・解析し得る周波数帯域には限界があり、分離可能域外にあれば 2 波の波動でも判別できないケースもある。

離散ウェーブレット変換を行列形式で表現すると式(1)で示される。ここで  $S$  は、ウェーブレットスペクトラム、 $W$  は、アナライジングウェーブレット行列、 $X$  は、入力データである。 $W$  は、変換行列  $C$  より和と差の演算として求めることができる。

一例として、式(2)に示したように、行列  $C$  をドビッシーの  $k=4$  次基底関数とする。行列式の一行は 4 ケの係数からなり、 $C^T C = I$  の正規直交関係が存在する。行列  $C$  の 1 行目は、スケーリング係数、2 行目は、ウェーブレット係数と呼ばれる。また、入力データ行列  $X$  を式(3)のように、 $N=3$  として  $2^N=8$  個からなるものとする。第 1 回目の変換は、式(11)に示した行列  $P$  と式(2)の  $C$  によって、式(4)の  $W^{(1)}$  が算出され、式(5)のように終了する。ここで、 $P_8$  と  $C_8$  は、 $8 \times 8$  行列を示し、式(5)の要素  $s, d$  は、和と差の演算（内積）を行っていることを示す。また、

$$S = W X \quad (1)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_0 & c_1 & c_2 & c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_3 & -c_2 & c_1 & -c_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_0 & c_1 & c_2 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 & -c_2 & c_1 & -c_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_0 & c_1 & c_2 & c_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_3 & -c_2 & c_1 & -c_0 \\ c_2 & c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_0 & c_1 \\ c_1 & -c_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_3 & -c_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ただし、 $c_0 = \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$ ,  $c_1 = \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$ ,  $c_2 = \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$ ,  $c_3 = \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8]^T \quad (3)$$

$$W^{(1)} = P_8 C_8 \quad (4)$$

$$S_1 = W^{(1)} X = [s_1 \ s_2 \ s_3 \ s_4 \ d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4]^T \quad (5)$$

$$L_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4]^T \quad (6)$$

$$W^{(2)} = (P_8' C_8') W^{(1)} \quad (7)$$

$$S_2 = W^{(2)} X = [ss_1 \ ss_2 \ dd_1 \ dd_2 \ d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4]^T \quad (8)$$

式(6)に示すのが逆ウェーブレット変換の際に使用する波形要素である。第 2 回目以降の変換は、式(7)～(9)と図-9 に示したアルゴリズムのように、データ個数  $2^{N-k}$  が  $k$  次数より少なくなるまで繰り返す。

ドビッシーのウェーブレット係数の場合、正規直交系であるため逆ウェーブレット変換は、 $W^{(1)}$  の転置行列となり、式(10)で示される。式(10)より入力波形は、各レベルに分解でき、その各レベルの波形成分は、 $[W^{(1)}]^T L_1$  である。観測データ数は、2208 個であったが DWT では  $2^N$  個のデータを取り扱うため、2048(= $2^{11}$ ) 個のデータについて解析した。また、ドビッシーのウェーブレット係数は、 $k=20$  次数とした。この場合、分離できるレベルは、1～7 まで存在する。各レベルに対する FFT によるパワースペクトルを図-10 に示す。図より、実測値よりレベル 2～7 の高周波成分を除去する場合、サンプリング時間の 1hr を掛ければ周波数帯が 0.01～0.5/hr となり、分離可能な周期は、100～2hr となる。

以上より DWT は、離散データを順次低周波から高

$$L_2 = [ss_1 \ ss_2 \ dd_1 \ dd_2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (9)$$

$$X = [W^{(2)}]^T L_2 + [W^{(2)}]^T L_1 \quad (10)$$

$$P_8 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad P_8' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

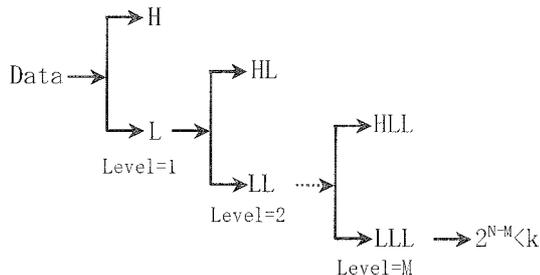


図-9 離散ウェーブレット変換のアルゴリズム

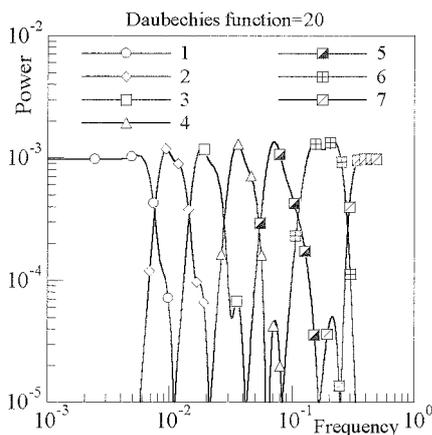


図-10 各レベルのパワースペクトル

周波成分で表すデータの線形結合に分解する解析手法<sup>9)</sup>であり、図-10 に示したように、特定周波数帯域を通過させるフィルタと考えることができる。

## (2) D0. 気象要素等の離散ウェーブレット変換

D0 の観測期間中に長期の欠測があった P1, P6 を除く、P2, P3, P4, P5 地点を対象に DWT を行った。その一例として湾奥部 P3 地点の解析結果を図-11 に示す。図では、分離した波形のレベル 2~7 をマイナス側へシフトしている。図に示したレベルの数値が 1~7 へ変化するに従って低周波から高周波へ分離されたことを意味し、全てを合計すると観測値のレベル 0 となる。図-12(a)~(e) に潮位、気象要素のレベル 1 の波形を示す。図-12(a) より、潮位変動は長期的には 8 月 14 日付近にピークを持ち、約 10 日周期の変動があることが分かる。一方、気象要素の変動には、定性的には D0 との関連性が示唆され、その値は同様な傾向を示している。そこで、地形的な影響を受けない沿岸域に位置する A2 地点を気象要素の代表地点として、次章での D0 の変動特性と気象要素との関連について検討する。

この低周波の物理的な意味として、D0 等のスカラ量が流体に含まれると、流体によって混合されたスカラ量自身の変動スペクトルが形成され、低周波の変動は、ほぼ流体の速度変動のスケールに一致する。また高周波の変動は、分子拡散係数と粘性係数の比であるプラントル数(熱輸送)やシュミット数(濃度拡散)等によって決まることが示されている<sup>10)</sup>。以上のことを踏まえ、D0 濃度等のスカラ量の低周波成分は、流体の移流や鉛直混合的な運動に左右されるとし、流体に影響を与える気象要素等の外力についても低周波成分であるレベル 1 を対象とする。なお、河川からの流出量の変動については、日平均値であるため今回の解析では対象としていない。

## 4. D0 の変動特性と気象要素等との関連

### (1) 底層の D0 の変動特性

図-13 に P2~P5 地点のレベル 1 を抜粋して示し、この変動特性について考察を進める。図より、P3, P4 地点では、貧酸素となる変動周期が、ほぼ同程度で振幅が大きい傾向を示す。これに対し、P5 地点は、観測期間を通して D0 が閾値以下となることがなく、特に 8 月下旬に P2, P3, P4 地点の D0 が低下する時期に、80%以上の値を記録している。一方、P2 地点は、8 月下旬までは閾値以上で推移し、9 月上旬より上昇傾向を示す。また、水道部 P2 と湾奥部 P3, P4 地点での D0 値が 40%以下となる 8 月下旬の時期に約 6 日間の遅れが確認できる。以上のことは、有明海での大きな潮汐作用により河口部付近で生じる成層が維持できず、有明海湾奥の残差流系の特徴である反時計回りの影響を受け<sup>11)</sup>、筑後川等の出水に伴う栄養塩を P3, P4 から P2 地点へ表層から

供給し、底層付近での有機物分解に伴う酸素消費による貧酸素化が進行したと示唆される。

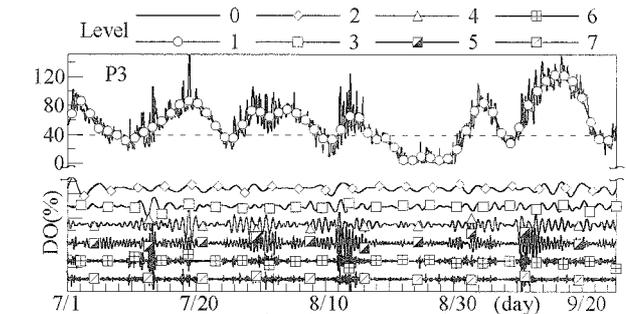


図-11 P3地点の離散ウェーブレット変換

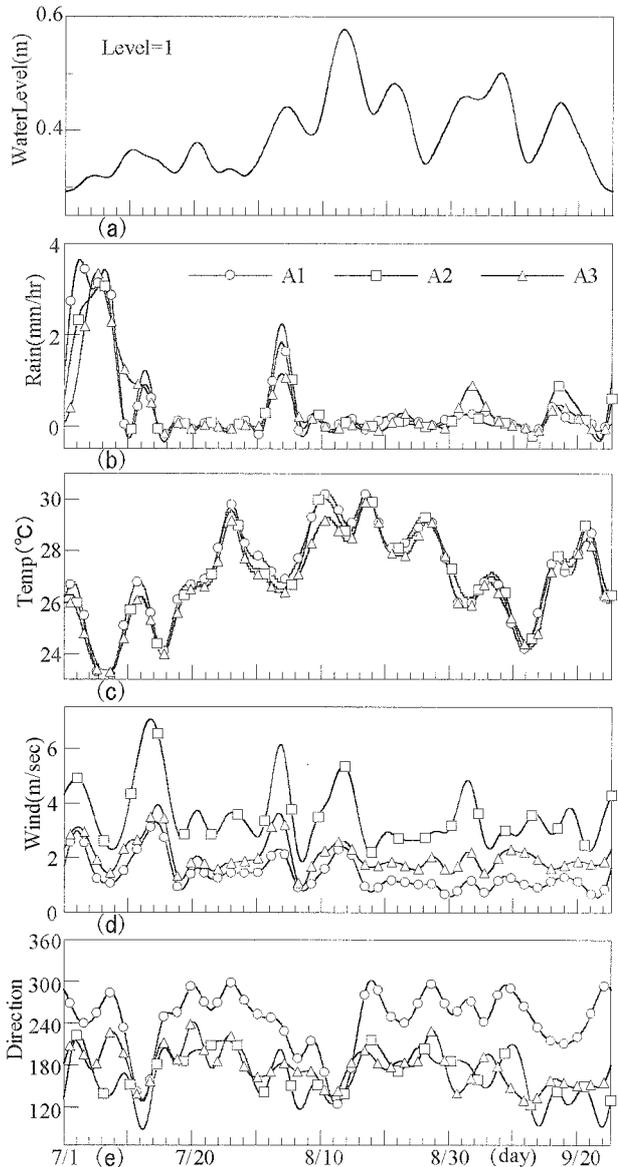


図-12 気象要素のレベル1

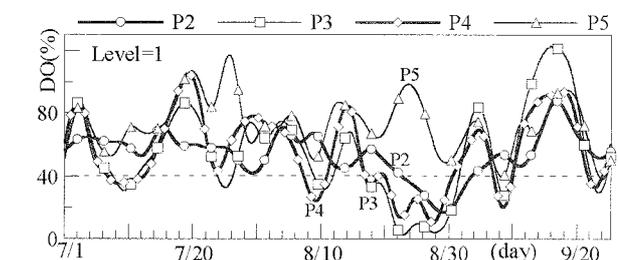


図-13 各地点のD0レベル1

以上のレベル1の考察を踏まえ、D0の自己相関を検討する。自己相関の値は、現象に偶然性が強い場合、長期間に渡って測定を継続するとゼロに収束することが知られている。その傾向を検討するため、図-14にP2~P5地点でのD0レベル1の自己相関を示した。図より、P3, P4地点に注目すると、第1ピークが約14日後に見られ、第2ピークが30日後となり、約2週間の周期が確認される。それに対し、P2地点では、約30日後に第1ピークがある。また、P5地点では、明確な周期が確認できないがゼロには収束していない。自己相関を求める場合、ナイキストの定理よりデータ数が半減するためD0が最も低下する8月中旬以降を捉えられていない。しかし、前駆的な気象等の外力の影響によってD0低下が引き起こされたと仮定すると、8月中旬までの気象要素との関連を検討する意味はあると考えられる。

## (2) 気象要素・潮位との相互相関

一例として、レベル1のP2~P5地点のD0と大浦潮位、P3地点D0とA2地点の気象要素の相互相関を図-15(a), (b)に示す。図-15(a)より、8月10日以前の相互相関に注目するとP5とP2, P3, P4地点の変化には位相があり、P5→P4→P3→P2と移行することが分かる。このことは、先に述べた定性的な考察となっている栄養塩の供給と貧酸素化の進行を説明する結果となった。

また、図-15(b)よりP3地点のD0と気象要素との相互相関には、降雨・風速は短期的、気温・風向には長期的な傾向が含まれていることが確認できる。さらに、8月下旬(24日頃)のD0が長期に低下する時期から自己相関の周期約14日を考慮すると8月10日付近となる。この時期の観測値を確認すると、

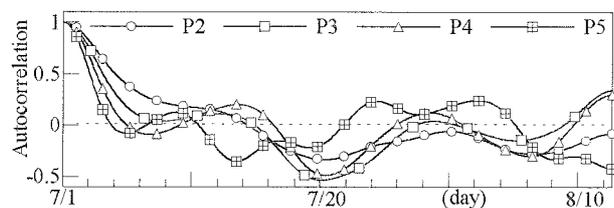


図-14 D0のレベル1の自己相関

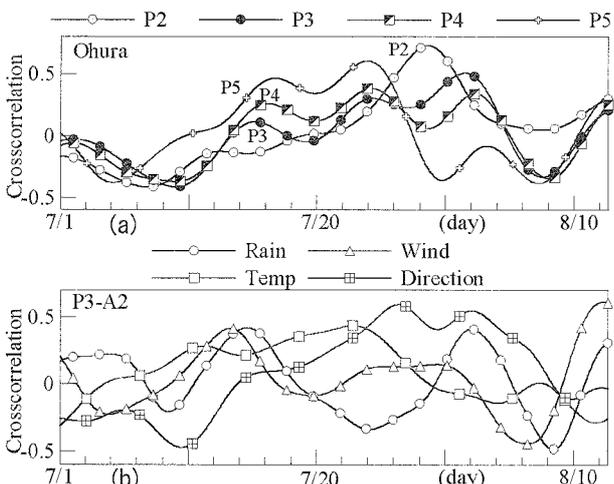


図-15 D0と潮位・気象要素との相互相関

潮位は小潮~大潮時、気温30℃、表・底層での塩分差約10psu、水温差約5℃である。風速は約4m/sec、風向は南~南西を記録している。

以上のように、この観測期間での現象と限定するが、これまで、一般的に述べられている貧酸素化の発生と解消のパターンと多少異なっており、気象・海象の時空間変動の把握が重要となることが分かる。

## 5. おわりに

本研究では、離散ウェーブレット変換を用いて溶存酸素濃度の変動特性を検討した。これによって、分離された波形の自己相関、気象要素との相互相関を実施することで、今後の貧酸素水塊の発生機構の分析・評価に関する指標となる可能性が示された。

しかし、底質、流動等との関連性の議論がなされておらず、今後検討する予定である。

**謝辞:** 本研究では、貧酸素水塊漁業被害防止法対策事業(水産庁)並びに有明海・八代海再生重点課題対策調査(環境省)による調査結果を西海区水産研究所からご提供いただいた。ここに、謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 梶原義範, 富田友幸, 中野拓治, 磯部雅彦: 有明海湾奥西部海域における2002年夏期の貧酸素水塊の発生状況について, 土木学会論文集, 第747巻, pp. 187-196, 2003.
- 2) 中山哲巖, 佐伯信哉, 時吉学, 木本克則: 有明海北西部で発生する貧酸素水塊に着目した現地調査, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 976-980, 2003.
- 3) 滝川清, 田中健路, 外村隆臣, 西岡津恵, 青山千春: 有明海の過去25年間における海域環境の変動特性, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1001-1005, 2003.
- 4) 九州農政局: 「有明海の再生に向けた新たな取組」環境変化の仕組みの更なる解明のための調査報告書, 2008.
- 5) (社)日本水産資源保護協会: 水産用水基準(2005年度版)
- 6) 柳哲雄, 阿部良平: 有明海の塩分と河川流量から見た海水交換の経年変動, 海の研究, 12(3), pp. 269-275, 2003.
- 7) 八木宏, 松村航裕, 井瀬肇, 木元克則: 夏季有明海干潟前縁域における流動構造と貧酸素水塊の動態に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 986-990, 2006.
- 8) 関根太郎, 武居昌宏, 岡野道治, 長江啓泰, 斎藤兆古, 堀井清之: 離散ウェーブレット多重解像度解析によるドライブ精神負担度の可視化, 可視化情報学会論文集, Vol. 20 No. 79, pp. 62-70, 2000.
- 9) 石川康宏: 臨床医学のためのウェーブレット解析, 医学出版, pp. 118-122, 2000.
- 10) H.Tennekes and J.Lumley(1972)藤原仁志, 荒川忠一訳: 乱流入門, 東海大学出版会, pp. 340-342, 1998.
- 11) 田中昌宏, 稲垣聡, 山本克則: 有明海の潮汐及び三次元流動シミュレーション, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 406-410, 2002.