

## 博多湾奥部における貧酸素水塊の発生・消滅機構

柳, 哲雄  
九州大学応用力学研究所

片山, 陽介  
九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

石井, 大輔  
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/27157>

---

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 144, pp.19-23, 2013-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：

# 博多湾奥部における貧酸素水塊の発生・消滅機構

柳 哲雄\*<sup>1</sup>・片山陽介\*<sup>2</sup>・石井大輔\*<sup>1</sup>

(2013年1月31日受理)

## Generation and Disappearance Mechanisms of Hypoxia at the head of Hakata Bay

Tetsuo YANAGI\*<sup>1</sup>, Yosuke KATAYAMA\*<sup>2</sup> and Daisuke ISHII\*<sup>1</sup>

E-mail of corresponding author: [tyanagi@riam.kyushu-u.ac.jp](mailto:tyanagi@riam.kyushu-u.ac.jp)

### Abstract

The generation and disappearance mechanisms of hypoxia at the head of Hakata Bay were investigated based on the observed data in the bottom layer with 30 minutes intervals in the summer, 2009.

**Key words :** Hypoxia, Chl.a, Light intensity, Hakata Bay

## 1. はじめに

九州北部の博多湾では毎年成層が発達する夏季に貧酸素水塊が発生するが、東京湾(松村ら、2002)、伊勢湾(高橋ら、2000)、大阪湾(城、1989)とは異なり、成層期間中に貧酸素水塊が維持されているわけではなく、成層期間中に短期間で貧酸素水塊の発生・消滅が繰り返される(柳・石井、2008)。したがって、毎月1回といった通常の海洋観測では博多湾における貧酸素水塊の発生・消滅機構を明らかにすることは出来ない。

柳・石井(2009)は2002-2006年夏季の1週間間隔の観測データを用いて、博多湾奥の貧酸素水塊は、1)夏季の大雨後、大量の栄養塩が博多湾に供給され、湾奥部表層で植物プランクトン密度が急増し、その自己遮蔽効果により湾奥部の浅い底層が無光層となり、表層から落下する有機物を分解するために酸素が消費され、塩分成層発達による表層からの酸素供給減少とあいまって湾奥部底層に貧酸素水塊が形成される、2)表層の植物プランクトンが枯死・沈降し、透明度が上昇すると、底層で植物プランクトンの光合成が活発化して、酸素が供給され、貧酸素水塊は消滅する、ことを明らかにした。しかし、底層の大きな酸素消費速度から考えると、このような貧酸素水塊形成・消滅過程は1週間以内の短い時間スケールで起こっている可能性がある。

そこで、2009年夏季、博多湾奥部に臨時の海洋観測塔を設置して、湾奥部の海底0.5m上に水温・塩分・濁度・DO(Dissolved Oxygen)・光量子・蛍光光度計を設置し、30分毎の記録を得た。

本稿では、この観測記録を解析して博多湾奥部底層における貧酸素水塊の発生・消滅機構を明らかにすることを試みる。

## 2. 観測

博多湾は九州東部に位置し、平均水深10m、湾長20km、湾口幅7.7kmの閉鎖的内湾である(Fig.1)。2008年に湾東部に人工島が建設され、湾奥部に在る和白干潟前面海域の海水停滞度が増して、貧酸素水塊の発生頻度が増加した(福岡市港湾局、2012)。

そこで、博多湾奥部の気象・海象の短時間変動を明らかにすべく、湾奥のSta.K(水深約3m)に臨時の海洋観測塔(Fig.2)を設置し、海底上0.5mに水温・塩分・DO・濁度・光量子・蛍光光度計を設置して(Fig.2)、2009年6月20日—同9月25日の約3ヶ月間、30分毎の記録を得た。

## 3. 観測結果

観測により得られた全期間における海底上0.5mのDOの連続記録をFig.3に示す。潮汐周期である約半日の短周期変動が目立つ。底層DO濃度は時々3.6mg/l以下(柳

\*1 九州大学応用力学研究所

\*2 九州大学総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

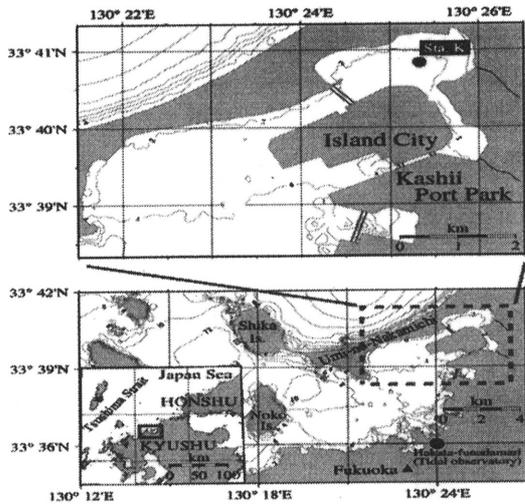


Fig.1 Hakata Bay with the site of observation station (Sta.K).

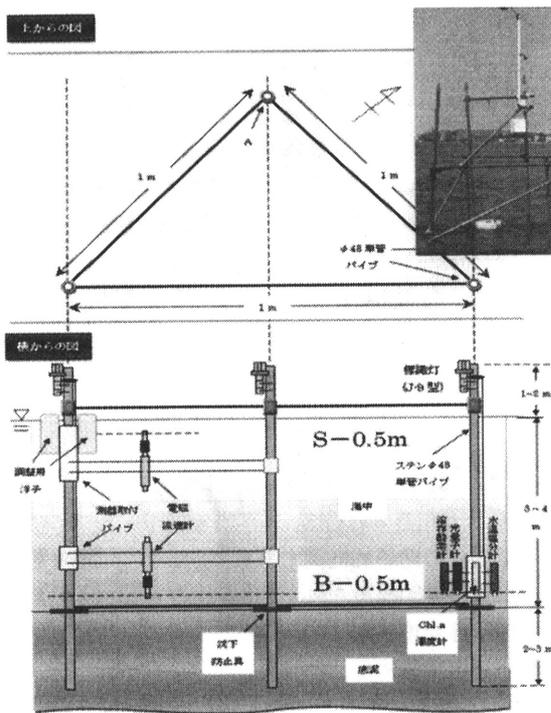


Fig.2 Observation tower and setting of observation instruments.

(1989)による貧酸素水塊の定義)以下となり、約3ヶ月間に計13回、貧酸素水塊が発生している。貧酸素水塊維持の時間スケールは短いもので1日弱、長いもので10日程度である。例えば、7月1日DO濃度が下降し貧酸素化が始まったが、7月6日DO濃度が上昇し、貧酸素化が解消されている。同様な貧酸素化一回復という過程が7月24日—8月1日、8月10日頃、8月17日頃、8月30日頃、9月15日頃にも起こっている。

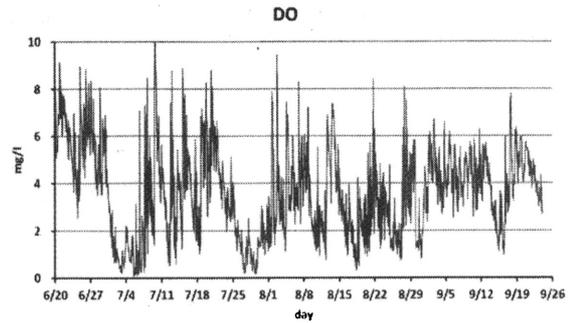


Fig. 3 Observed variation in DO 0.5 m above the sea bed at Sta.K

1-10日の時間スケールを持つ貧酸素水塊の発生・消滅機構に対して周期1日以下の短周期変動は解析の邪魔になるので、タイド・キラーフィルター(花輪・三寺、1985)により短周期変動を除去して様々な気象・海象要素の変動比較を行なった後、貧酸素水塊が約8日間継続した7月24日—8月1日前後の観測データを詳細に解析した(Fig.4)。ここで、気温と雨量は福岡地方気象台(Fig.1中に三角印で示す)のデータを用いている。また、密度差は1週間ごとに観測した表層の水温・塩分を用いて計算した密度と、底層で観測された密度との差をプロットしてある。

Fig.4を見ると、DO濃度の変動はChl.a濃度、密度、風の南北成分の変動と相関が高いことがうかがえる。すなわち、Chl.a濃度が減少し(酸素生産減少)、北風が吹き(エクマン輸送により表層水が湾口向きに輸送され、底層に重い外洋水が侵入して成層発達密度が大きくなり)、底層水の密度が増加すると(成層が発達—酸素供給減少)、底層DO濃度が減少し、逆に、底層DO濃度が増加する傾向が伺える。

そこで、Fig.4に示した期間中の、DOとChl.a・風の南北成分・密度の相互相関係数を求めた。結果をFig.5に示す。Fig.5を見ると、Chl.aに関しては時間差7時間で正(Chl.a濃度が高くなって7時間後にDO濃度が高くなる)、密度に関しては時間差0時間で負(底層密度が大きい時、DO濃度は低い)、北風に関しては時間差23時間で負(北風が吹いて23時間後にDO濃度が低くなる)の相関が高いことがわかる。そこで、同期間内のそれぞれの時間差をとって、DOとChl.a・密度・風の南北成分の相関関係を求めた。結果をFig.6に示す。DOとChl.aは正の相関、DOと密度・北風は負の相関が見られる。これらの相関は統計的には有意である。

次に重回帰分析により、Chl.a・密度・北風の変動によりDO濃度の変動がどの程度説明できるかを考える。すなわちDO(t)を目的変数、7時間前のChl.a(t-7)、密度(t)、23時間前の北風(t-23)、を説明変数として次式のa~dを求める。

$$DO(t) = a \cdot Chl.a(t-7) - b \cdot 密度(t) - c \cdot 北風(t-23) + d \quad (1)$$

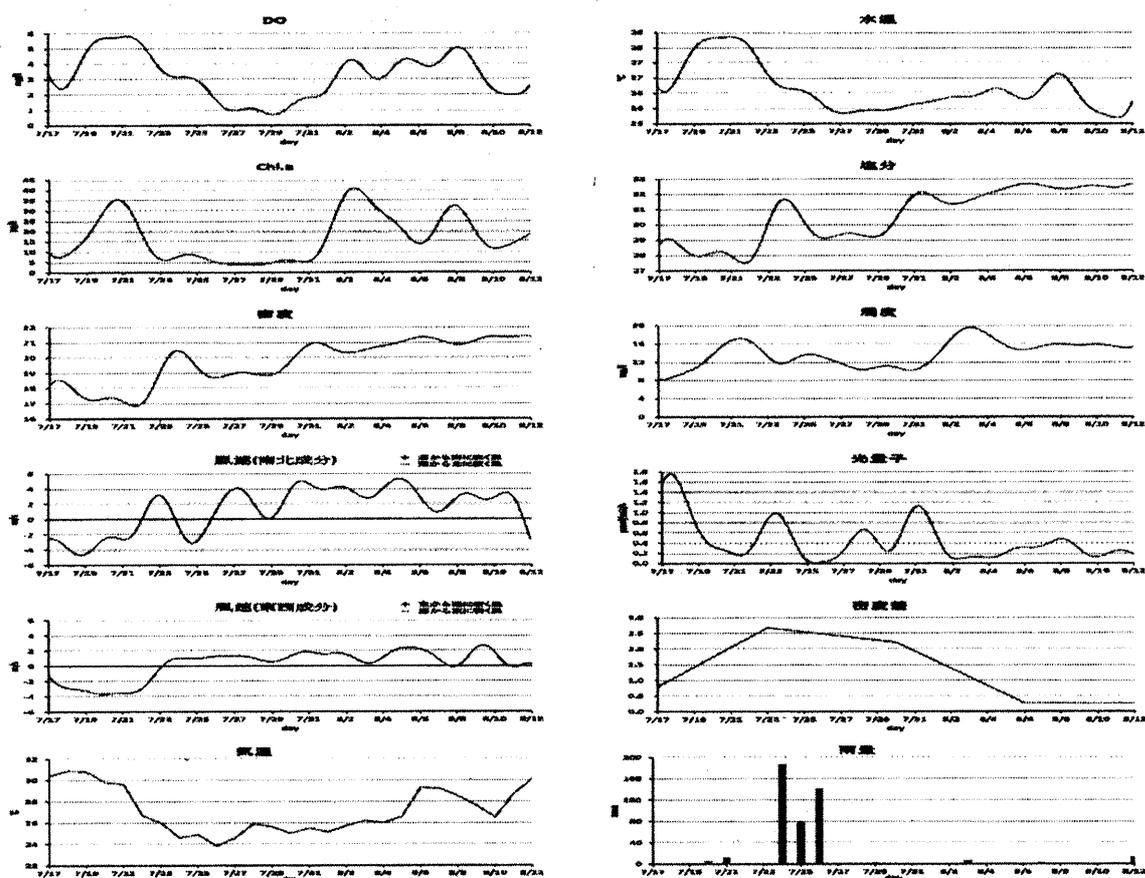


Fig.4 Low-passed DO, Chl.a, density, north wind, east wind, air temperature, water temperature, salinity, turbidity, photon, density difference between surface and bottom layers and precipitation.

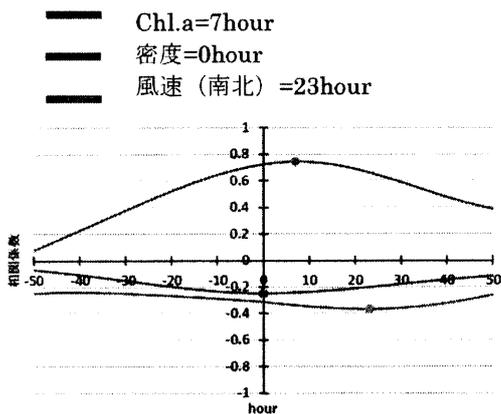


Fig.5 Cross correlation coefficients between DO and Chl.a, density, and southward wind.

ここで Fig.5 に示したそれぞれの相関の時間差が考慮してある。また、DO・Chl.a・密度・南北風の時系列はそれぞれの平均値と標準偏差を用いて正規化した。

DO(t)の観測値と(1)式による計算値を Fig.7 に、重回帰

分析結果を Table 1 に示す。Fig.7 によると計算値は観測値の変動をよく再現していて、Table1 によると DO 濃度の変動は Chl.a の変動の影響が最も大きく、次に北風の変動が影響していることがわかる。

Table 1 Results of multi-regression analysis

	回帰係数	標準誤差
重相関 (R)	0.82 a (Chl. a)	0.74 0.02
標準誤差	0.58 b (密度)	0.05 0.02
観測数	601 c (風速)	0.40 0.04
	d (定数)	0.12 0.04

#### 4. 酸素消費速度

Fig.4 によれば博多湾底層の DO 濃度は 7 月 22 日の 5.8mg/l から 7 月 26 日の 1.3mg/l まで 4 日間で 4.5mg/l も急減していて、底層の酸素消費速度は 1.13mg/l/day = 1.13gO<sub>2</sub>m<sup>-3</sup>d<sup>-1</sup> となる。この値はかつて周防灘で報告さ

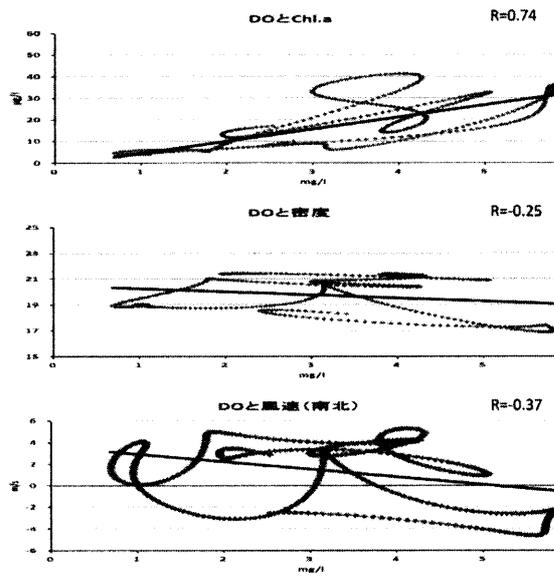


Fig.6 Correlation with time lag between DO and Chl.a, density and southward wind.

れた  $1.29 \text{ gO}_2\text{m}^{-3}\text{d}^{-1}$  (Table 2) に次いで、日本では最も大きな値で、博多湾奥部における極度な富栄養化状態の有機物が好氣的に分解される度合いの高さを示唆している。そこで Table 2 に示した各海域と博多湾の表層年間平均栄養塩濃度を比較した (Fig. 8)。各海域表層の栄養塩濃度は 2009 年の年平均値の観測結果で (独) 国立環境研究所の HP から取得した。

Table 2 Observed oxygen consumption rates in the bottom water and TP and TN concentrations in the surface water in the Japanese coastal seas.

	$K_2(\text{cm}^2\text{s}^{-1})$	$R(\text{gO}_2\text{m}^{-3}\text{d}^{-1})$	Reference
博多湾		1.13	
志津川湾		0.93	野村ら(1996)
東京湾	0.5~41.7	0.19~1.48	松村ら(2002)
			森ら(1995)
三河湾	0.02~3.2		Suzuki and Matsukawa(1987)
		0.65	Uno et al.(1985)
燧灘	0.12	0.29	Takeoka et al.(1986)
		0.2	Ochi and Takeoka(1986)
周防灘	0~15	0.22~2.61	磯辺ら(1993)
		0.10~0.89	神蘭ら(1995)
		1.29	神蘭ら(1996)
洞海湾		0.15~0.72	東ら(1998)
大村湾	0.1	0.21~0.28	野上・松野(2001)

Fig. 8 によると、TP (全リン)・TN (全窒素濃度) が最も高い東京湾で底層の酸素消費速度は小さく、TP・TN 濃度の低い周防灘・博多湾・志津川湾などで酸素消費速度は大きくなっている。このことは貧酸素水塊の発達度、すなわち底層の酸素消費速度を決める大きな要因は表層の栄養塩濃度一有機物生産量ではなく、有機物の底層への停滞度一海域の海水交換の低さ一閉鎖度、であることを推測させる。

今後さらに研究を進め、海域の閉鎖度と貧酸素水塊

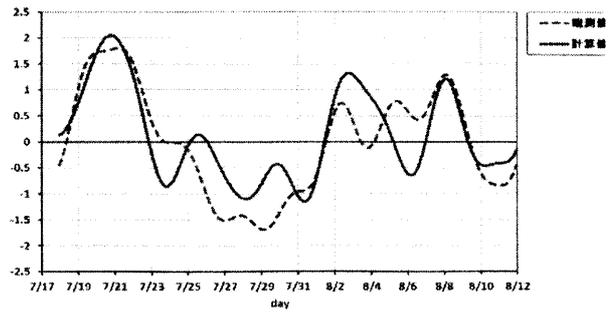


Fig.7 Observed and calculated variation in DO concentration 0.5 m above the sea bed of Sta.K

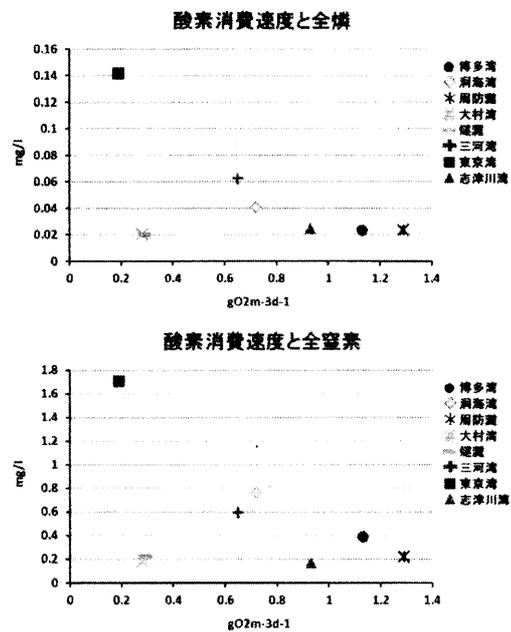


Fig.8 Relation between oxygen consumption rates in the bottom water and TP and TN concentrations in the surface water in the Japanese coastal seas.

形成の関連の有無を調べたいと考えている。

### 5. おわりに

以上、博多湾奥部底層における 30 分ごとの海況観測データを解析して、博多湾奥部の貧酸素水塊は北風が1日以上連吹して、エクマン輸送により湾奥表層水が湾口に輸送され、底層に湾口部の重い海水が浸入して成層が強化されると同時に、天候が悪化して、太陽光が底層まで届かなくなり、底層の植物プランクトンの光合成が不可能になることにより数日で発生する。しかし、天候が回復して、太陽光が底層まで届くと、植物プランクトンの光合成により酸素が供給されて数日で回復する、ことが明らかになった。また、博多湾奥部底層の酸素消費速度は日本国内の貧酸素水塊発生海域の中でも非常に大きい部類に属し、表層から落下した

有機物が底層に停滞しやすい構造－閉鎖度が高い構造を有していることも明らかになった。

今後流動モデルと結合した数値生態系モデルを用いて、上記の観測・解析結果を定量的に再現し、博多湾奥部における貧酸素水塊のより詳細な発生・維持・消滅機構を明らかにしたいと考えている。

### 参考文献

- 1) 福岡市港湾局 (2012) アイランドシティ整備事業環境監視結果 (平成 23 年度) .
- 2) 花輪公雄・三寺史夫 (1985) 海洋データの日平均操作について. 沿岸海洋研究ノート, 23, 79-87.
- 3) 東 輝明・山田真知子・門谷 茂・広谷 純・柳 哲雄 (1998) 過栄養な内湾洞海湾における貧酸素水塊の形成過程とその特性について. 日本水産学会誌, 64, 204-210.
- 4) 磯辺篤彦・神菌真人・俵 悟 (1993) 周防灘西部における貧酸素水塊. 沿岸海洋研究ノート. 31, 109-119.
- 5) 城 久 (1989) 大阪湾の貧酸素水塊. 沿岸海洋研究ノート, 26, 87-98.
- 6) 神菌真人・磯辺篤彦・江藤拓也・俵 悟・小泉喜嗣 (1995) 周防灘南西部における貧酸素水塊形成機構－酸素消費速度の変動要因. 沿岸海洋研究ノート. 32, 167-175.
- 7) 神菌真人・江藤拓也・佐藤博之 (1996) 周防灘南西部の浅海域下層における酸素収支. 海の研究. 5, 87-95.
- 8) 松村 剛・石丸 隆・柳 哲雄 (2002) 東京湾における窒素とリンの収支. 海の研究, 11, 613-630
- 9) 森 真朗・安藤晴夫・曾田京三 (1995) 東京都内湾の底層の貧酸素化に関する研究. 東京都環境科学研究所年報. 127-136.
- 10) 野上真子・松野 健 (2001) 大村湾の海洋構造と第 2 躍層の形成・消滅過程. 海の研究, 10, 191-202.
- 11) 野村宗弘・千葉信男・徐 開欽・須藤隆一 (1996) 志津川湾における貧酸素水塊の形成. 沿岸海洋研究, 33, 203-210.
- 12) Ochi, T. and H. Takeoka (1986) The anoxic water mass in Hiuchi-Nada Part 1. Distribution of the anoxic water mass. J. Oceanogr. Soc. Japan, 42, 1-11.
- 13) Suzuki, T. and Y. Mastukawa (1987) Hydrography and budget of dissolved total nitrogen and dissolved oxygen in the stratified season in Mikawa Bay, Japan. J. Oceanogr. Soc. Japan, 43, 37-48.
- 14) 高橋鉄哉・藤原建紀・久野正博・杉山陽一 (2000) 伊勢湾における外洋水の浸入深度と貧酸素水塊の季節変動. 海の研究, 9, 265-271.
- 15) Takeoka, H., T. Ochi and K. Takatani (1986) The anoxic water mass in Hiuchi-Nada Part 2. The heat and oxygen budget model. J. Oceanogr. Soc. Japan, 42, 12-21.
- 16) Unoki, S., Y. Saijo and S. Tawara (1985) In situ measurement of oxygen consumption rate in the bottom layer in Mikawa Bay. J. Oceanogr. Soc. Japan, 41, 59-62.
- 17) 柳 哲雄 (1989) シンポジウム「貧酸素水塊」のまとめ. 沿岸秋用研究ノート, 26, 141-145.
- 18) 柳 哲雄・石井大輔 (2008) 博多湾奥における水質の季節・経年変動. 海の研究, 17, 255-264.
- 19) 柳 哲雄・石井大輔 (2009) 博多湾奥部における貧酸素水塊発生・消滅機構. 海の研究, 18, 169-176.