夏季の諫早湾北部海域で発生する 貧酸素水塊と水温成層との関係

金 相嘩¹・多田 彰秀²・田井 明³・鈴木 誠二⁴

¹ 学生会員 修士(工) 長崎大学大学院 工学研究科生産システム工学専攻 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)
E-mail:bb52213181@cc.nagasaki-u.ac.jp

² 正会員 博士(工) 長崎大学教授 大学院工学研究科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)
E-mail:atada@nagasaki-u.ac.jp

³ 正会員 博士(工) 九州大学助教 高等研究院 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)
E-mail:tai@civil.kyushu-u.ac.jp

⁴ 正会員 博士(工) 長崎大学准教授 大学院工学研究科 (〒852-852 長崎県長崎市文教町 1-14)
E-mail:ssuzuki@nagasaki-u.ac.jp

諫早湾北部海域で頻繁に発生している貧酸素水塊の発生機構を解明するため、現地で計測した水質指標および潮流流速のデータを用いて検討を加えた。観測槽で取得されたデータから水温、塩分および Chl-a と底層の DO に関する重回帰分析を行った結果、底層の DO は、表層と底層との水温差、底層と表層との塩分差および 12 時間前の表層での Chl-a 値と負の相関関係を有し、それらの中でも特に、水温差が底層の DO の動態に大きく影響を及ぼしていることが分かった。さらに、観測槽 B4 の底層の DO の動態は、水温躍層が形成される水深によって制約を受けていることが明らかとなった。また、潮流流速のデータに基づけば、諫早湾北部海域の釜地区地先で発生する貧酸素水塊は、観測槽 B4 から移流される低酸素水塊の DO が消費されたためと判断される。

Key Words: *Isahaya Bay, hypoxic water, hydrothermal stratification, dissolved oxygen*

1. はじめに

近年、諫早湾北部海域では、夏季の貧酸素水塊や赤潮が頻繁に発生しており、魚貝類の斃死など水産業に甚大な被害を及ぼしている。特に、諫早湾北部海域に含まれる諫早市小長井町釜地区の干潟(図-1 の N1 地点と海岸線との間)にも、貧酸素水塊の発生に伴うアサリの斃死などの被害が報告されており¹⁾、エアレーションなどの対策が試行されてきた²⁾。当該海域では、貧酸素水塊の発生の主要因である密度成層の形成に対して塩淡成層の寄与度は 50~70% であると報告されている³⁾。塩淡成層の形成に関しては、筑後川および諫早湾干拓調整池から流入する淡水の影響が挙げられている⁴⁾⁷⁾。一方、諫早湾が位置する九州西部地方は、梅雨明けの 7 月中旬頃から 9 月初旬にかけて、日射量の増加とともに好天気で気温の高い日が続く傾向があり、水温成層が卓越する場合も数多く確認されている。さらに、諫早湾北部海域で頻繁に発生する *Chattonella* 属の赤潮は、高水温期に短期間で増殖する特性があるため⁸⁾、赤潮の異常繁殖後の死骸の沈降、それらの分解に伴う溶存酸素の消費といった一連

の過程の中で貧酸素水塊の発生が大いに懸念される。このように、夏季の諫早湾北部海域における貧酸素水塊の発生は、水温成層の影響に依存するものの、詳細な検討を加えた既往の研究がない。そこで、本論文では、2008 年から 2015 年まで、梅雨明け後の夏季に諫早湾北部海域で集中的に行った水質観測の結果に基いて、各年度における底層の溶存酸素濃度(以降、DO と略記)と水温成層との関係について重回帰分析を用いて検討する。なお、諫早湾北部海域で発生する貧酸素水塊は、数日間の短い時間スケールで発生・消長することが報告されている²⁾。このことから、密度成層の形成のみならず、流れに伴う貧酸素水塊の移動が重要な要因であることも考えられる。そこで、貧酸素水塊の短期的な移動を把握するために、夏季に諫早湾北部海域で行った潮流流速および底層の DO の連続観測データから、貧酸素水塊の発生と流動特性との関係についても検討を行う。なお、本論文で記述している表層および底層の定義は、海水面から 0.5m 直下および海底面直上から 0.5m 以内としている。また、甲殻類致死溶存酸素濃度(日本水産資源保護協会, 2005)の 3.5mg/l 以下を低酸素水塊、環境省の水質汚濁に係る

環境基準のうち、生活環境の保全に関する環境基準(海域)の C 類型の DO(2.0mg/l 以上)に基づき、2.0mg/l 以下を貧酸素水塊と定義して考察を行う。

2. 現地観測の概要

(1) 多項目水質計を用いた水質指標に関する隔日観測

2008 年から 2015 年にかけて、梅雨明け後の 7 月中旬から 8 月末まで、多項目水質計(JFE アドバンテック(株)製 Model-AAQ1183)を用いて図-1 に示す 7 観測点(M0, M1, M2, M3, M5, M6, K1)において、水温、塩分、DO、濁度およびクロロフィル a(以降、Chl-a と略記)の鉛直分布を隔日で計測した。観測時間は、植物プランクトンの日周期鉛直運動特性⁹⁾に配慮して毎回 8:30~10:30 とした。

(2) 九州農政局所管の観測槽で取得された水質データ

2008 年から 2015 年までの 7 月と 8 月を対象に、農林水産省九州農政局所管の観測槽 B4(図-1 参照)および観測槽 B6(図-1 参照)において毎正時鉛直方向に 0.5m 間隔で計測されている水温、塩分、DO、Chl-a および濁度の鉛直分布のデータを情報公開によって取得して考察を行う。また、風向・風速については、毎正時に観測槽 B3(図-1 参照)で取得されたデータを用いる。

(3) 潮流流速、底層における DO と水温の連続観測

2015 年 8 月 2 日から 9 月 11 日にかけて、N1 地点(図-1 参照)に ADCP(RD-Instruments 社製ワークホース 0.6MHz)およびワイパー式メモリ DO 計(JFE アドバンテック AROW-USB)を沈設し、10 分間毎に潮流流速および DO、水温の連続観測を行った。なお、流速は、海底面上 1.26m から水面まで 0.5m 間隔で計測した。DO は、海底面上 0.5m で計測した。さらに、同年 7 月 1 日から 9 月 5 日にかけて観測槽 B4 および観測槽 B6 の近傍で計測された潮流流速データを加えて貧酸素水塊の移動についても考察を行う。

3. 結果および考察

(1) 諫早湾北部海域の底層における DO と各種水質指標との相関関係

表-1 は、観測槽 B4 で取得された 2008 年から 2015 年までの夏季(7 月と 8 月)の水温および塩分の観測データから算出した密度を用いて、底層と表層との密度差と底層の DO との回帰分析結果を示したものである。従前より指摘されているように、底層の DO と密度差との間に負の関係が認められるものの、 R^2 が 0.083 と非常に小さい相関係数を示した。すなわち、底層の DO と密度差と

図-1 諫早湾における観測点および観測槽の位置

の相関関係が有意とは言えず、密度を決定する水温と塩分(圧力除く)に着目して詳細な検討を行う必要がある。

表-2 は、観測槽 B4 で取得された 2008 年から 2015 年までの夏季(7 月と 8 月)の水質データを対象に底層の DO に対する底層と表層との塩分差、表層と底層との水温差、12 時間前の表層における Chl-a 値との重回帰分析を行った結果である。表-2 に示すように、底層の DO は 12 時間前の表層の Chl-a 値、塩分差および水温差ともに負の相関関係にあることが分かる。特に、DO の動態に対しては、表層と底層との水温差が最も大きい相関係数を有していた(標準化 β 値: -0.570)。ここで、表層の Chl-a の値として 12 時間前の値を採用した理由は、表-3 に示す底層の DO と表層の Chl-a 値の時間別データ(総 9045 個)を対象に行った重回帰分析の結果、12 時間前の Chl-a 値のみが $p < 0.01$ であったためである。

また、底層の DO と 12 時間前の表層の Chl-a 値との間の負の相関関係は、以下のように解釈される。すなわち、日射量の増加とともに表層で増殖した植物プランクトンの光合成によって底層への酸素供給が増加し、12 時間後の夜間には、光合成による酸素の供給がなくなるとともに、植物プランクトンの呼吸や底層での有機物分解などにより DO の消費が行われるためである。なお、表-2 および表-3 に記載の VIF(Variance Inflation Factor)の値が 10 以下であり、独立変数間には多重共線性(multicollinearity)が無いものと解釈される。このため、変数はお互いに独立していると見做して支障はないと判断される。

一方、深山らの研究結果³⁾に基づけば、有明海の貧酸素水塊形成の主要因として塩分差の寄与が顕著であるとの報告がなされているものの、本論文の結果と異なっ

表-1 夏季の観測槽 B4 における底層の DO と密度差の重回帰分析結果

従属変数	独立変数	B	β	t	P
	(定数)	3.741		207.853	.000
底層の DO	密度差(表層-底層)	-.100	-.288	-28.883	.000

$p < 0.01$, $R = 0.288$, $R^2 = 0.083$, number of used data : 9254

表-2 夏季の観測槽 B4 における底層の DO と水質指標の重回帰分析結果

従属変数	独立変数	B	β	t	p	VIF
	(定数)	4.436		203.615	.000	
底層の DO	塩分差(底層-表層)	-.009	-.033	-3.357	.000	1.194
	水温差(表層-底層)	-.448	-.570	-63.039	.000	1.119
	12 時間前の表層の Chl-a 値	-.005	-.028	-.3119	.002	1.077

$p < 0.01$, $R = 0.586$, $R^2 = 0.343$, number of used data : 9254

表-3 観測槽 B4 における底層の DO と Chl-a の時間別の重回帰分析結果

従属変数	独立変数	B	β	t	p	VIF
	(定数)	3.582		130.657	.000	
	Chl-a 値	-.001	-.003	-.225	.822	1.699
底層の DO	6 間前の表層の Chl-a 値	-.004	-.023	-1.481	.139	1.927
	12 時間前の表層の Chl-a 値	-.008	-.044	-2.819	.005	1.941
	18 時間前の表層の Chl-a 値	-.007	-.036	-2.328	.020	1.946
	24 時間前の表層の Chl-a 値	-.005	-.027	-1.702	.089	2.046
	30 時間前の表層の Chl-a 値	-.000	.000	.007	.994	1.983
	36 時間前の表層の Chl-a 値	-.000	.000	.011	.991	1.961
	42 時間前の表層の Chl-a 値	-.007	-.038	-2.433	.015	1.946
	48 時間前の表層の Chl-a 値	.002	.010	.680	.496	1.702

$p < 0.001$, $R = 0.114$, $R^2 = 0.013$, number of used data : 9045

いる。塩分差の寄与は主に大規模な出水時に発生し、イベント的に底層の貧酸素化が生じる。重回帰分析では、これらの単発的に発生する現象を捉えることが極めて難しい。今後、塩淡成層の形成時における塩分差と DO の動態との関連性を詳細に把握する必要がある。

(2) 年度別の底層の DO と水温差および塩分差との関係

上述したように、観測槽 B4 で計測された 8 年間のデータから底層の DO と水温差および塩分差が負の相関関係にあることが明らかとなった。しかし、当該海域では、冷夏など年度によって気象条件が異なっており、水質動態への影響も大きく変化するものと推測される。このため、各年度毎に底層の DO と水温差および塩分差との関係についてより詳細な検討が必要である。さらに、観測槽 B4 は、諫早湾口部の近傍に位置しているので有明海に在る水塊の影響を受ける可能性もある。諫早湾北部海域における DO と水温差の詳細な検討を行うためには、諫早湾北部海域を対象として、より小さな空間スケールで行った隔日観測データを用いて考察を行う必要がある。

図-2 は、夏季の諫早湾で 2008 年から 2015 年にかけて行った隔日観測によって取得したデータの中から、諫早湾北部海域に位置している 6 つの観測点(M0, M2, M3, M5, M6, K1)における底層の DO(平均値)、底層と表層

との塩分差、表層と底層との水温差の期間平均値、底層 DO の期間最小値を示している。底層の DO の平均値が低酸素状態の 3.5mg/l 以下となった年は、2008 年、2010 年と 2012 年である。一方、底層の DO の平均値が 3.5mg/l 以上であった年は、2009 年、2011 年、2013 年、2014 年と 2015 年である。前者の年度には、底層の DO の期間最小値(瞬間値)が約 0.5mg/l 以下となっており、無酸素に近い水塊の発生が確認される。さらに、後者の年度に比べて水温差の平均値が大きいことも認められる。一方、後者の年度では、前者の年度に比べて水温差の平均値が小さい。また、図-3 に示すように、2008 年、2010 年と 2012 年度の夏季には、表層の平均水温が 28℃以上、底層の平均水温が 27℃以下となっている。さらに、2009 年、2011 年、2013 年、2014 年と 2015 年の夏季には、2013 年を除く全年度で表層の平均水温が 27℃以下を呈している。

図-4 は、長崎アメダスのデータ¹⁰⁾に基づいて、各年度の夏季(7 月～8 月)における総雨量と夏季の平均日射量の偏差(各年度の平均日射量-30 年間の平均日射量)とを比較したものである。水温差が大きかった 2008 年と 2012 年の平均日射量は、30 年間の夏季平均日射量(17.87MJ/m²)より大きいことが分かる。しかし、2013 年の日射量は大きいものの、水温差が小さく DO の平均値

も 3.5mg/l 以上となっている。これは、2013 年の夏季には風が強く(平均風速 4.7m/s, 表4 参照), それに伴う鉛直混合が顕著であったためと推測される。さらに、水温差が小さかった 2009 年, 2014 年と 2015 年は、日射量が少ないことが分かる。一方、2010 年は、日射量が少ないものの、水温差が大きく DO の平均値も 3.5mg/l 以下となっている。これは、2010 年の夏季の弱い風が DO の挙動に影響を及ぼしたものと考えられる。したがって、諫早湾北部海域における底層の DO は、日射量および風の影響を強く受け、水温差が大きい夏季に減少傾向となり、さらに無酸素に近い水塊が出現していることが確認された。

(3) 諫早湾北部海域で形成される貧酸素水塊と流れとの関係

諫早湾北部海域の小長井町釜地区地先の干潟(図-1 参照)では、底層の水塊が昼間には飽和状態に、夜間には貧酸素化の傾向が確認されている²⁾。特に、*Chattonella* 属の赤潮の発生期間中で、日平均風速 5m/s 以下、潮差が極小になった日、またはその翌日に貧酸素水塊の発生が報告されている²⁾。また、中山ら¹¹⁾は、2004 年の夏季に小長井沖で流速および底面近傍の水質の連続観測を実施した。その結果、底層の DO は、流速が弱く成層が発達した時に低下する傾向があることを明らかにした。さらに、小潮期に小長井中央港地先で発生した貧酸素水塊は、流れとともに諫早湾中央部へ移流・拡散されるとの報告もなされている¹¹⁾。このように、当該海域で数日間のスケールで発生する貧酸素水塊は、流れと密接な関係があるものと考えられる。したがって、潮流流速データを用いて流れと貧酸素水塊の関係について考察する必要がある。

図-5 は、2015 年 8 月 7 日から 12 日まで小潮期の諫早湾北部海域における流速、大浦の潮位、観測槽 B3 の風向・風速の時間変化を示す。特に、N1 地点の底層の水塊と流れに着目しているため、同一水深で議論可能なように、それぞれ海底面から N1 地点では 1.26m、観測槽 B4 では 2.56m、観測槽 B6 では 6.26m の流速データを用いる。この期間には、風速が 5m/s 以下で、北または南からの風が吹いており、風も弱く卓越する風向もなかったため、本論文では風による影響は論じないことにする。また、図-5 中の「緑色網」および「黄色帯」は、観測槽 B4 の

図-2 隔日観測データに基いた各年度における諫早湾北部海域の底層 DO・水温差・塩分差の平均値と底層 DO の最小値

図-3 隔日観測データに基いた各年度の諫早湾北部海域で表層と底層における平均水温および平均塩分の比較

図-4 諫早湾における夏季の各年平均日射量と 30 年間平均日射量との偏差および総雨量(長崎アメダス)¹⁰⁾

表4 諫早湾における夏季(7月~8月)の平均風速(観測槽 B3 のデータ)

年度	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	平均
夏季の平均風速(m/s)	4.3	4.9	3.9	4.5	4.1	4.7	4.3	3.9	4.3

図-5 小潮期の諫早湾北部海域周辺における流速と潮位および観測槽 B3 での風向・風速の時間的変化

図-6 小潮期の諫早湾北部海域周辺における DO と水温の時間的変化

流向特性によって色分けして表示している。図-5 中の「緑色網」で示された期間の両観測槽 B4 および B6 では、共に上げ潮時には北西方向、下げ潮時には南東方向への流れが卓越する傾向が確認される。また、N1 地点では、観測槽 B4 および観測槽 B6 に比べて流速が小さく、上げ潮時には北北西方向、下げ潮時には南東方向への流れの発達を確認される。一方、「黄色帯」で示された期間では、「緑色網」の期間より観測槽 B6 での流速は小さくなっているものの、流向はほぼ一致している。しかし、「黄色帯」期間中の観測槽 B4 では、上げ潮時に流向が北北東方向、下げ潮時には南南東方向への流れが発達しており、「緑色網」の期間と流動特性が異なっていることが確認される。なお、N1 地点では、「黄色帯」の期間に流速がさらに弱くなっていることが分かる。

図-6 は、N1 地点、観測槽 B4 および観測槽 B6 において海底面から 0.5m、2.5m、6.5m における DO および水温

の時間的な変化を示す。下段の図中にプロットされている矢印は、貧酸素水塊が発生している期間を示している。「緑色網」の期間の上げ潮時には、N1 地点における水温(上図の赤実線)が観測槽 B4 の水温(上図の黒実線)に近づく傾向が確認される。逆に「緑色網」の期間の下げ潮時には、観測槽 B4 の水温が N1 地点の水温値に近づく傾向が見られる。これらは、図-5 で示した「緑色網」の期間の流れによって、N1 地点と観測槽 B4 の水塊が互いに影響を及ぼしあっているものと判断される。一方、「黄色帯」の期間の上げ潮時と下げ潮時には、観測槽 B4 と観測槽 B6 の水温(上図の青点線)がほぼ一致しているものの、N1 地点の水温は異なっている。これは、図-5 の「黄色帯」で示すように、観測槽 B6 の水塊が上げ潮時に、北西方向の流れとともに観測槽 B4 まで移動し、下げ潮時には、湾口部の北東方向にあった水塊が観測槽 B4 と観測槽 B6 に影響を及ぼしたためと考えられる。

(a)小潮期

(b)大潮期

図-7 観測地点 B4 で計測された潮流流速の東西成分に関するパワースペクトル

図-6 に示すように、「緑色網」の期間の上げ潮時には、N1 地点の DO(下図の赤実線)が減少しつつ、下げ潮時から干潮時にかけて貧酸素化しているのが確認される(赤矢印)。これは、上げ潮時に北西方向の流れとともに観測槽 B4 にあった低酸素水塊が N1 地点まで移流され、満潮時の弱い流速下で底層の溶存酸素が消費されたためと判断される。また、図-6 中の黒矢印で示すように、観測槽 B4 でも貧酸素水塊が出現している。これは、N1 地点で貧酸素化した水塊が南東方向の流れとともに観測槽 B4 へ移流されたためと考えられる。一方、「黄色帯」の期間の上げ潮時には、N1 地点の DO と観測槽 B4 および観測槽 B6 の DO が異なる変化を呈示していることも確認される。特に、N1 地点では、8 月 8 日～8 月 11 日の午後(正午～午後 3 時)に、DO は 8mg/l 程度まで急増し、午後 8 時前後から急減する傾向が見られる。これは、平野ら³⁾と同様な結果である。すなわち、昼間に底層の DO が急増したのは、N1 地点の水深が浅くなり、底層でも植物プランクトンによる光合成が行われたためと考えられる。一方、夜間に底層の DO が急減している。これは、干潮時の弱い流速によって底層への酸素供給の低下などが考えられる。

図-8 観測槽 B4 における水温および塩分、DO の鉛直分布 (2015 年)

図-7 は、観測槽 B4 で取得された潮流流速データの東西成分を用いて高速フーリエ変換した結果を示す。小潮期には、潮流流速の東西成分が約 24 時間周期でピーク値となっており、大潮期には約 12 時間周期でピークが形成されている。すなわち、大潮期と小潮期には、東西方向の流れ成分に寄与する分潮が異なっている。このような違いに伴って、北部海域における貧酸素水塊の発生機構も異なるものと推測される。

(4) 諫早湾北部海域で形成される貧酸素水塊と水温成層との関係

上述したように、N1 地点の諫早湾北部海域では、観測槽 B4 の周辺で発生した低酸素水塊が上げ潮時に移流され、満潮時の弱い流速とともに N1 地点で貧酸素化することが明らかとなった。図-8 は、観測槽 B4 で計測された水温および塩分、DO の鉛直分布を示す。水温および塩分の鉛直分布に基づけば、2015 年 8 月 7 日から 8 月 12 日までは、塩淡水層よりも水温成層が強く形成されるとともに、海底面から約 2m-5m 直上の位置で水温が約 5℃も急減する水温躍層が形成されている。特に、干潮時に海底面付近で低酸素または貧酸素の水塊が発生し

ており、その時の水温躍層が海底面から約 2m 付近に位置しているのが確認される。このように、観測槽 B4 では、水温成層が形成されることで、表層から水温躍層までは酸素供給が良好なものの、水温躍層から海底面までは、表層からの酸素供給が妨げられると同時に、さらに水温躍層が海底面付近で形成されることで、海底面から水温躍層の区間の水の体積が小さくなるため、底泥および海底面付近の浮遊粒子(SS)による酸素消費¹²⁾の影響を受けて、DO の減少が促進されたものと考えられる。したがって、N1 地点の諫早湾北部海域で小潮期の上げ潮時に移流される観測槽 B4 の水塊は、水温躍層が形成される水深によって制約を受けているものと判断される。

城¹³⁾は、閉鎖性内湾である大阪湾における貧酸素水塊の消長が水温成層の形成に伴う表層からの酸素供給遮断後の持続時間によって制約されると判断している¹³⁾。一方、本論文の結果のような水温躍層の形成水深と貧酸素水塊の消長に関する研究事例は極めて少ない。

4. まとめ

本研究では、夏季の諫早湾北部海域で発生する貧酸素水塊と水温成層との関係を現地観測データを用いて考察を行った。その結果、以下のようなことが明らかになった。

- (1) 2008 年～2015 年の夏季の観測槽 B4 で取得された水質データに基づいて重回帰分析を行った。その結果、夏季の諫早湾北部海域の底層の DO は、水温差、塩分差および 12 時間前の Chl-a 値と負の相関関係がある。特に、それらの中で底層の DO の動態と表層と底層との水温差が最も大きい相関係数を有していた。
- (2) より小さい空間スケールで 2008 年～2015 年の夏季に諫早湾北部海域で行った隔日観測の結果に基づけば、表層と底層の水温差が大きい年度には、底層の DO が低下する傾向にあり、さらに無酸素に近い水塊の出現も確認された。
- (3) 2015 年の夏季に行った潮流流速に関する連続観測の結果に基づけば、小潮期に諫早湾北部海域(N1 地点)で短期間に形成される貧酸素水塊は、湾外部(観測槽 B4 周辺)の底層で形成された低酸素水塊が上げ潮時の北西方向の流れとともに N1 地点近傍へ移流され、満潮時の弱い流速下で貧酸素化された後、下げ潮時に再び湾外部へ移流されることが新たに明らかとなった。
- (4) N1 地点の諫早湾北部海域で小潮期の上げ潮時に移流される観測槽 B4 の水塊は、水温躍層が形成される水深によって制約を受けている。

今後は、数値シミュレーション手法を活用して水温躍層が形成される水深と貧酸素水塊との関係を定量的に詳しく検討する予定である。

謝辞: 本研究で用いられた流速観測データは、ハブ型ネットワークによる有明海地域共同観測プロジェクト (COMPAS)の一環として取得されたものである。さらに、本研究を行うにあたり、農林水産省九州農政局から諫早湾の水質、風速・風向データを提供頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します

参考文献

- 1) 藤井明彦：諫早湾におけるタイラギアサリの現状と問題点，月刊海洋，35，pp.235-240，2003.
- 2) 平野慶二・日向野純也・中田英昭・品川明・藤田孝康・徳岡誠人・向後恵：諫早湾のアサリ養殖場における夏季大量へい死対策-底層溶存酸素の改善試験-，水産工学，Vol.47，pp.53-62，2010.
- 3) 深山顕寛・磯辺雅彦・鯉淵幸生：有明海奥部における貧酸素水塊の動態に関する現地観測，海岸工学論文集，第 55 巻，pp.951-955，2005.
- 4) 鯉淵幸生・佐々木淳・有田正光・磯部雅彦：有明海における水質変動の支配要因，海岸工学論文集，第 55 巻，pp.971-975，2003.
- 5) 齋田倫範・矢野真一郎・田井明・小松利光：夏季小潮期の現地観測による諫早湾の海水交換に関する検討，海岸工学論文集，第 53 巻，pp.336-340，2006.
- 6) 多田彰秀・竹之内健太・染矢真作・坂井伸一・水沼道博・中村武弘・坪野孝樹：DBF 海洋レーダ観測に基づく諫早湾湾口部の表層流動特性について，海岸工学論文集，第 54 巻，pp.391-395，2007.
- 7) 多田彰秀・阿部和也・中村武弘・竹ノ内健太：2008 年夏季に諫早湾で発生した赤潮および青潮と水質動態の関連について，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.65，pp.961-965，2009.
- 8) 山砥稔文・坂口昌生・岩滝光儀・松岡数充：諫早湾に出現する有害赤潮鞭毛藻 4 種の増殖に及ぼす水温、塩分の影響，日本水産学会，Vol.72，pp.160-168，2006.
- 9) 中野拓治・山田耕士・金子俊幸・中嶋雅孝・本城凡夫：有明海における *Ceratium furca* と *Chattonella* 属の日周鉛直運動の特徴および躍層との関係，水環境学会誌，Vol.29，No.8，pp.489-494，2006.
- 10) 日本気象庁ホームページ：http://www.data.jma.go.jp.
- 11) 中山哲殿・佐伯信哉・木元克則：諫早湾での夏季における流動、成層安定性と底層の溶存酸素の関係，海岸工学論文集，第 51 巻，pp.906-910，2004.
- 12) 阿部淳・松永信博・児玉真史：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.966-970，2003.
- 13) 城久：大阪湾の貧酸素水塊，海岸海洋研究ノート，第 26 巻，第 2 号，pp.87-98，1989.

(2016.5.26 受付)

Relationship between hypoxic water and hydrothermal stratification in the northern part of Isahaya Bay during summer season

Sangyeob KIM, Akihida TADA, Akira TAI and Seiji SUZUKI

In this study, in order to clarify the mechanism of hypoxia occurring in the northern part of Isahaya Bay during summer season, a multiple regression analysis was conducted by using dissolved oxygen (DO) in bottom layer and water quality data. The results indicated that DO in bottom layer had a negative correlation with water temperature (difference between surface layer and bottom layer), salinity (difference between bottom layer and surface layer), and surface layer's chlorophyll-a (data collected 12 hours before). Especially, it has been proved that a difference between surface layer and bottom layer in water temperatures could have a major influence on the dynamic behaviors of DO in bottom layer. Moreover, the phenomenon at the observation tower B4 was affected by the water depth which a thermocline was formed. Furthermore, based on the tidal current and DO sequential data, near Kamachiku's waterfront, it was confirmed that hypoxic water occurred. This hypoxic water occurrence was due to the consumption of DO that inflowed from the bottom layer water column near observation tower B4.