

6. 貧酸素水塊

(1) 有明海の底層溶存酸素量の状況

有明海における底層溶存酸素量の経年的傾向について、浅海定線調査（基本的に毎月1回大潮満潮前後に調査、地点は図 3.6.1）の結果を整理した。本調査データの年間最低値について整理したところ、データのある1972年度以降、6地点のうち、佐賀県の2地点（有明海湾奥西部及び有明海湾奥東部）で有意に減少する傾向がみられ、その他の4地点（有明海湾奥奥部及び有明海湾奥東部）では有意な変化はみられなかった（表 3.6.1、図 3.6.2）。ただし、有明海における底層溶存酸素量は、小潮期に低くなる傾向があるが、ここで評価に用いた浅海定線調査は大潮期のものであることに留意が必要である。2004年から有明海湾奥部で実施されている底層溶存酸素量の連続観測結果（後述する図 3.6.11）によると、濃度低下の程度や継続期間には年による違いがあるものの、2004年から2015年までの12年のうち、全ての年で最低値が3.0mg/Lを下回っており、うち11年については2.0mg/Lを下回る状況がみられた。また、諫早湾で実施されている底層溶存酸素量の連続観測結果（2006～2014年）によると、全ての年で日平均値の年間最低値が2.0mg/Lを下回る状況がみられた（図 3.6.3）。

また、底層溶存酸素量について、環境基準の基準値として示されている2.0mg/L以上及び3.0mg/L以上にに基づき整理したところ、長期間のデータがある浅海定線調査（大潮満潮時に観測）に基づいた底層溶存酸素量の年間最低値については、佐賀県の1地点（有明海湾奥西部）では、他の有明海湾奥部の地点と比べ、最近10年間（2005～2014年）で2.0mg/L又は3.0mg/Lを下回る回数（各4回、9回）が多く、また、1972～1984年と比べても、2.0mg/L又は3.0mg/Lを下回る回数が増えている（表 3.6.2）。

有明海水質連続観測調査等によると、底層溶存酸素量の日平均値が2.0mg/L未満又は3.0mg/L未満の日数は2006年で最も多く（各地点の平均で各37日、55日）、2009年で少なく（同じく各3日、16日）になっており、経年的に有意な変化傾向はみられなかった（図 3.6.4）。

底層溶存酸素量に関しては、水域の底層を生息域とする魚介類等の水生生物や、その餌生物が生存できることはもとより、それらの再生産が適切に行われることにより、底層を利用する水生生物の個体群が維持できる場を保全・再生することを目的に、2016年3月に生活環境項目環境基準に追加された。類型及び基準値（表 3.6.3）は、生物1類型の基準値は4.0mg/L以上、生物2類型の基準値は3.0mg/L以上、生物3類型の基準値は2.0mg/L以上であり、今後、海域毎に類型指定の検討が進められることになる。

なお、後述するように、有明海の貧酸素水塊は、小潮期に発達しやすく、大潮期に緩和あるいは解消するケースが多いという特徴がある。

表 3.6.1 回帰分析結果：有明海（左：浅海定線調査、右：有明海水質連続観測調査等）

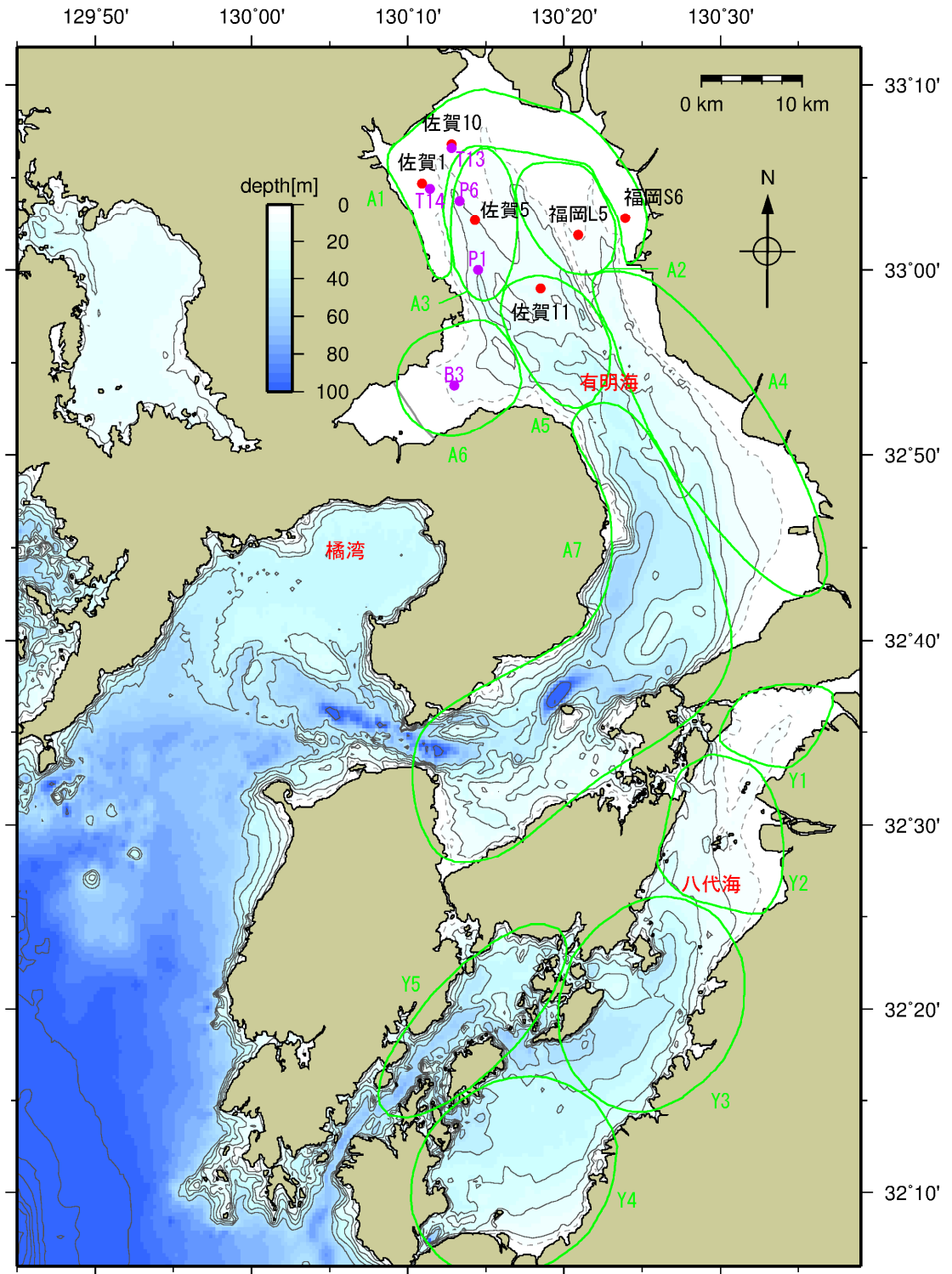
		底層溶存 酸素量			底層溶存 酸素量
A1海域 (有明海湾奥奥部)	福岡S6	+	A1海域 (有明海湾奥奥部)	T13	
	佐賀1	-		T14	--**
	佐賀10	-	A3海域 (有明海湾奥西部)	P1	--**
A2海域 (有明海湾奥東部)	福岡L5	+		P6	--**
A3海域 (有明海湾奥西部)	佐賀5	--	A6海域 (有明海諫早湾)	B3	
A5海域 (有明海湾中部)	佐賀11	-			

- 注) 1. ■、■で網掛けしている項目は、有意水準5%で有意な変化傾向が認められたことを示す。■はデータなし・不足等による評価対象外であることを示す。
2. 近似一次回帰式の傾きが10年間あたりで全データの算術平均の10%以上の増加、減少がある場合は”++”、“--”とし、それに満たない場合は”+”、“-”とした。
3. *を付したものは1990年前後から現在までの期間の評価であり、**を付したものは2000年前後から現在までの期間の評価を示す。なお、2000年以降から測定が開始された項目のうち、測定期間が短いT13(2007年～)、B3(2006年～)については評価対象外とした。

資料：福岡県、佐賀県「浅海定線調査結果」

国立研究開発法人 水産研究・教育機構 西海区水産研究所「有明海水質連続観測調査結果」

農林水産省九州農政局「有明海貧酸素水塊広域連続観測結果[諫早湾]」



注) 図中の有明海、八代海の緑色の範囲は海域区分を示す。なお、海域区分の考え方は「4章 2. 海域区分」に示す。

- | | | |
|----------------|----------------|----------------|
| A 1 海域…有明海湾奥奥部 | A 2 海域…有明海湾奥東部 | A 3 海域…有明海湾奥西部 |
| A 4 海域…有明海中央東部 | A 5 海域…有明海湾中部 | A 6 海域…有明海諫早湾 |
| A 7 海域…有明海湾口部 | Y 1 海域…八代海湾奥部 | Y 2 海域…球磨川河口部 |
| Y 3 海域…八代海湾中部 | Y 4 海域…八代海湾口東部 | Y 5 海域…八代海湾口西部 |

図 3.6.1 底層溶存酸素量の結果整理を行った地点

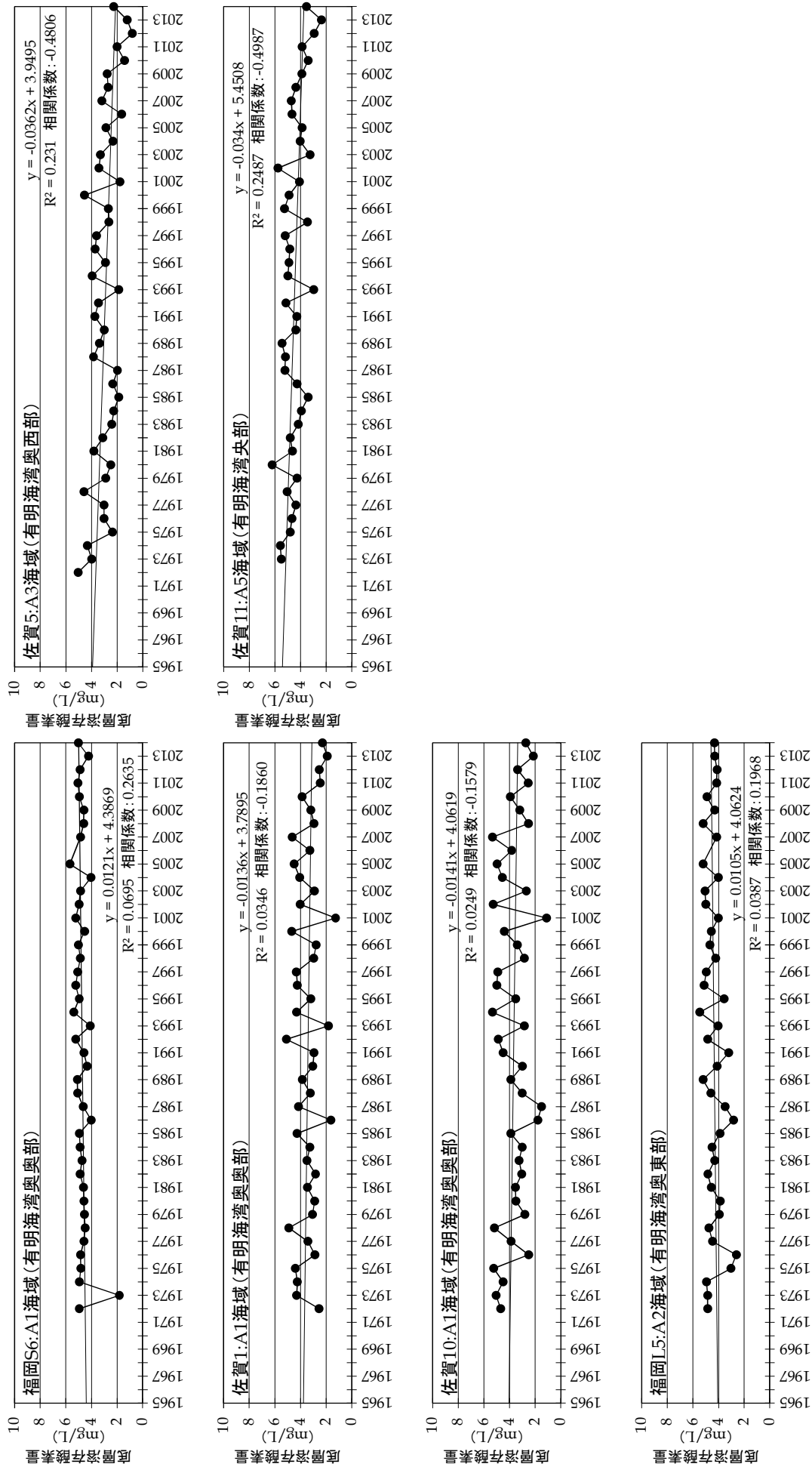


図 3.6.2 底層溶存酸素量の経年変化[有明海：浅海定線] (年間最低値)

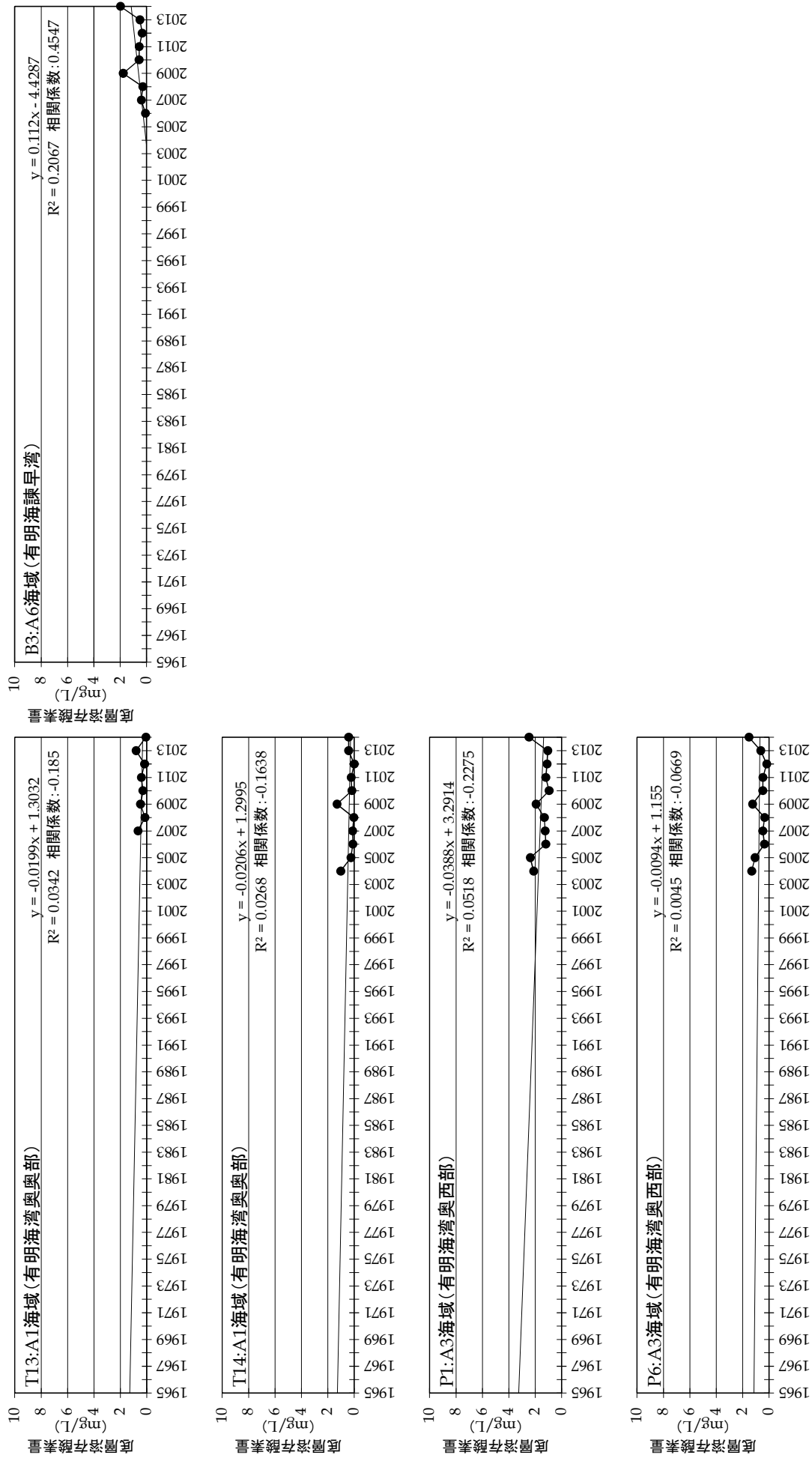


図 3.6.3 底層溶存酸素量の経年変化[有明海：連続観測] (日平均値の年間最低値)

表 3.6.2 各期間の底層溶存酸素量の評価値（年間最低値）の状況（浅海定線調査）

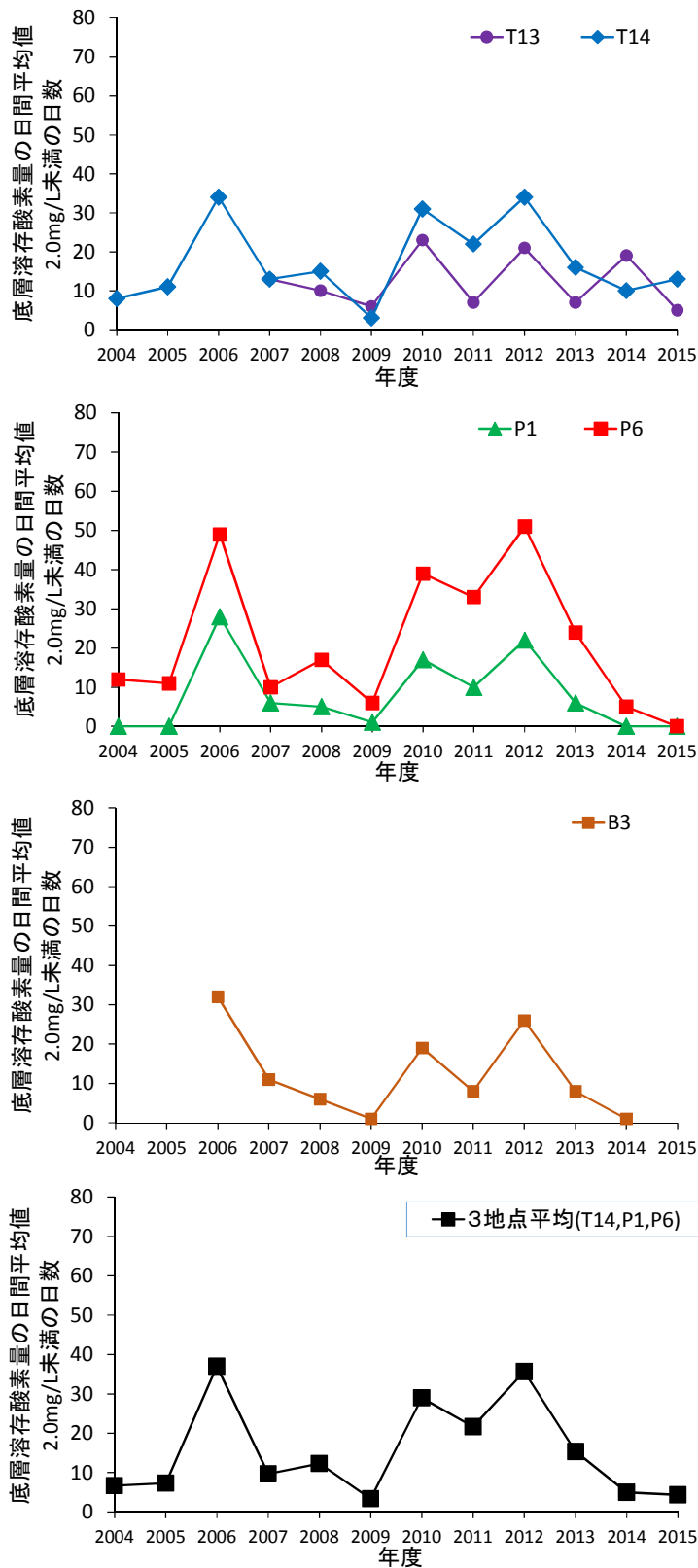
調査地点/期間		1972 ～1984	1985～ 1994	1995～ 2004	2005～ 2014
A1海域 (有明海湾奥東部)	福岡S6	1	0	0	0
	佐賀1	0	2	1	1
	佐賀10	0	2	1	0
A2海域 (有明海湾奥東部)	福岡L5	0	0	0	0
A3海域 (有明海湾奥西部)	佐賀5	0	3	1	4
A5海域 (有明海湾中部)	佐賀11	0	0	0	0

調査地点/期間		1972 ～1984	1985～ 1994	1995～ 2004	2005～ 2014
A1海域 (有明海湾奥東部)	福岡S6	1	0	0	0
	佐賀1	4	3	4	5
	佐賀10	2	3	3	4
A2海域 (有明海湾奥東部)	福岡L5	1	1	0	0
A3海域 (有明海湾奥西部)	佐賀5	5	4	5	9
A5海域 (有明海湾中部)	佐賀11	0	1	0	2

表 3.6.3 生活環境の保全に関する環境基準（底層溶存酸素量）

項目 類型	水生生物が生息・再生産する場の適応性	基準値
		底層溶存酸素量
生物 1	生息段階において貧酸素耐性の低い水生生物が生息できる場を保全・再生産する水域又は再生産段階において貧酸素耐性の低い水生生物が再生産できる場を保全・再生産する水域	4.0mg/L以上
生物 2	生息段階において貧酸素耐性の低い水生生物を除き、水生生物が生息できる場を保全・再生産する水域又は再生産段階において貧酸素耐性の低い水生生物を除き、水生生物が再生産できる場を保全・再生産する水域	3.0mg/L以上
生物 3	生息段階において貧酸素耐性の高い水生生物が生息できる場を保全・再生産する水域、再生産段階において貧酸素耐性の高い水生生物が再生産できる場を保全・再生産する水域又は無生物域を解消する水域	2.0mg/L以上

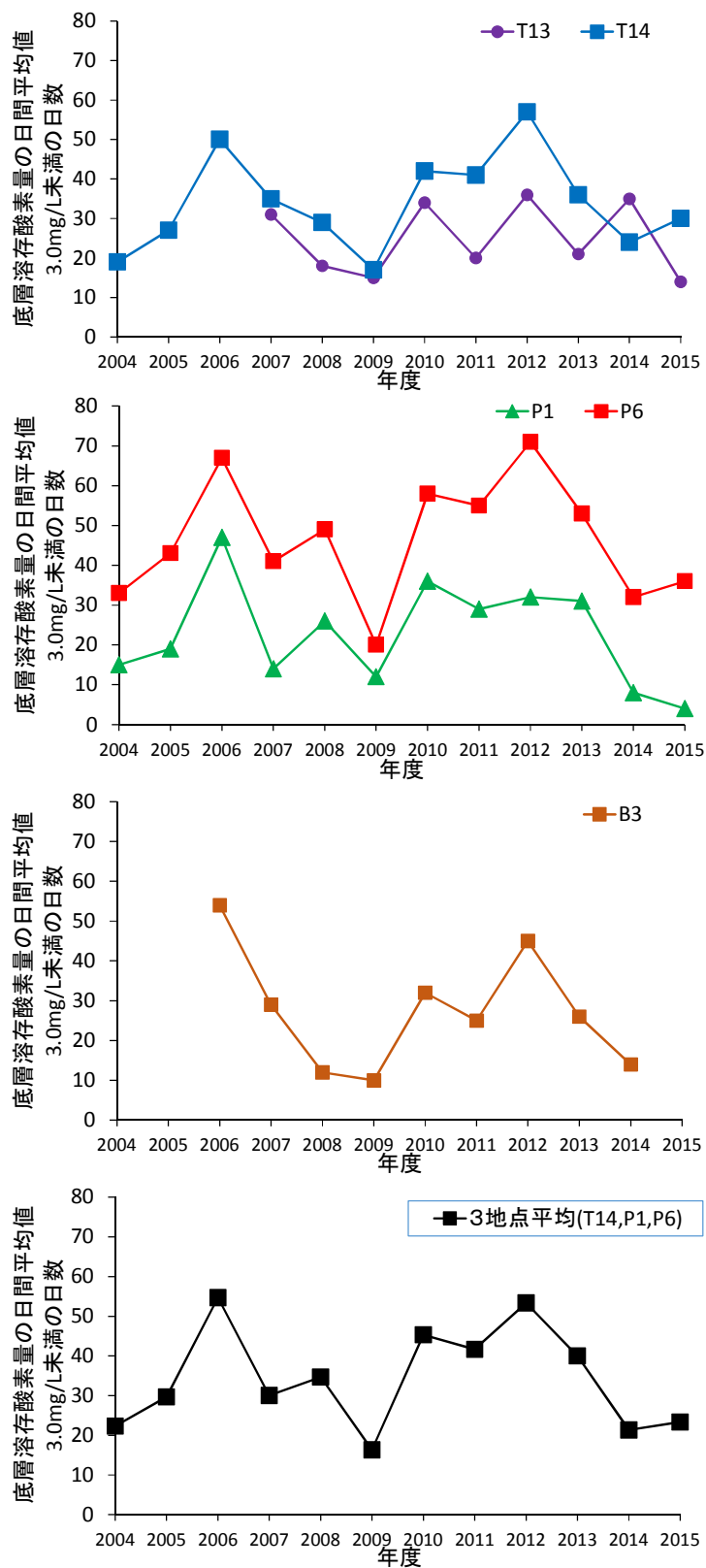
資料：水質汚濁に係る環境基準（昭和46年環境庁告示第59号）



注) 各年度、各地点の底層溶存酸素量の日平均値が 2.0mg/L 未満となった日数を記載している。なお、観測期間は 6~9 月を中心に行われており、詳細な観測日数は各年度、各地点により異なる。

図 3.6.4(1) 各期間の底層溶存酸素量の日平均値(2.0mg/L 未満)の状況(連続観測調査)

資料：国立研究開発法人 水産研究・教育機構 西海区水産研究所「有明海水質連続観測調査結果」
農林水産省九州農政局「有明海貧酸素水塊広域連続観測結果[諫早湾]」より整理



注) 各年度、各地点の底層溶存酸素量の日平均値が 3.0mg/L 未満となった日数を記載している。なお、観測期間は 6~9 月を中心に行われており、詳細な観測日数は各年度、各地点により異なる。

図 3.6.4(2) 各期間の底層溶存酸素量の日平均値(3.0mg/L 未満)の状況(連続観測調査)

資料：国立研究開発法人 水産研究・教育機構 西海区水産研究所「有明海水質連続観測調査結果」
農林水産省九州農政局「有明海貧酸素水塊広域連続観測結果[諫早湾]」より整理

(2) 貧酸素水塊の発生状況

有明海における主要な貧酸素水塊は、夏期に有明海湾奥部と諫早湾の2ヶ所で別々に発生する(図3.6.5)。各海域で発生した貧酸素水塊が他の海域の底層溶存酸素量に与える影響については、定量的な評価に至っていない。鉛直的には、貧酸素水塊は主として出水による淡水供給によってもたらされる密度躍層よりも下層に形成され、有明海湾奥部では浅海域で特に溶存酸素量が低下する。このように浅い海域で貧酸素水塊が発達することは有明海の特徴である¹⁾(速水, 2007)。さらに、有明海湾奥部及び諫早湾の貧酸素水塊は潮汐混合の影響を強く受けており、潮流が弱い小潮時に発達しやすく、潮流が強い大潮時には緩和あるいは解消することが多い^{2)、1)}(山口・経塚, 2006; 速水, 2007)。これは、潮流が弱まる小潮時に成層が発達するため貧酸素水塊が発達したものである。また、台風等によって強風が連吹した場合にも鉛直混合によって成層が弱まり、貧酸素は緩和あるいは解消する。ただし、成層が強い場合には、数週間にわたって貧酸素化が継続することもある。

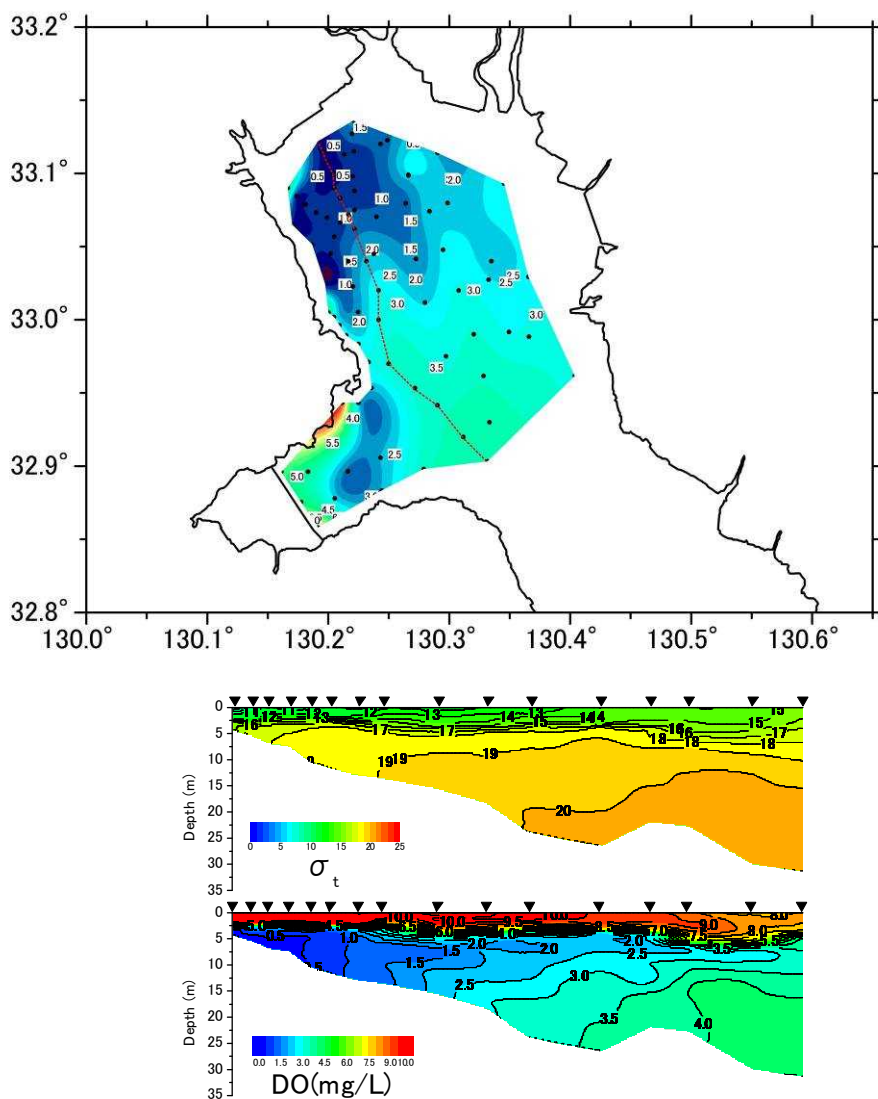


図 3.6.5 有明海奥部・諫早湾における底層溶存酸素量の分布と点線に沿った密度・溶存酸素量の断面分布(2010年8月4日)

資料：西海区水研、佐賀県有明水産振興センター、芙蓉海洋開発、日本ミクニヤ、東京久栄による共同一斉観測

有明海湾奥部における貧酸素水塊発生の模式図を図 3.6.6 に示す。有明海湾奥部では、出水によって大量の淡水が供給されたり、小潮時に潮汐混合が弱まって沖合いから海底に沿って高密度水が進入すると、密度成層が発達する。密度躍層が発達すると、表層から躍層以深への酸素供給が減少する。また、躍層の上ではしばしば赤潮が発達し、赤潮が終息すると大量の有機物が底層に供給され、底泥・底層水の酸素消費が増大する。このようにして急速な貧酸素化が生じる。さらに、底生動物がへい死すると、底質悪化と貧酸素化が進行し、底層水は無酸素状態となる。沖合域（水深 10m 以深）においては、潮汐による鉛直混合の影響は浅海域と比べて弱くなり、成層が形成されると底泥・底層水の酸素消費により徐々に貧酸素化し、台風等の擾乱が起きるまで底層溶存酸素量が低い状態が持続する。沖合域では浅海域に遅れて貧酸素化が起こることが多い。

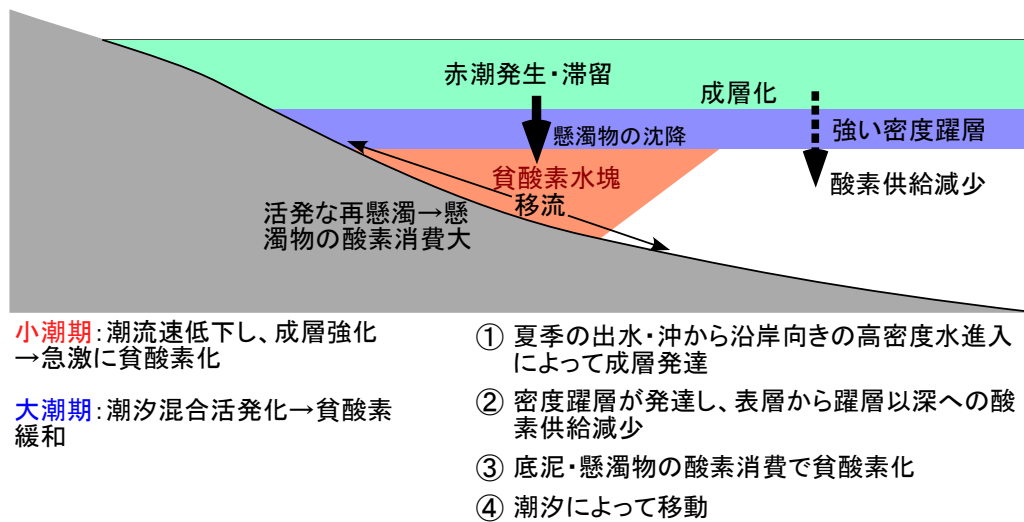


図 3.6.6 有明海湾奥部における貧酸素水塊発生の模式図

前述の有明海湾奥部及び諫早湾以外の観測事例として、有明海に流入する六角川の感潮域（図 3.6.7）や、福岡県大牟田沖（図 3.6.8）、橘湾（図 3.6.9）での底層溶存酸素量の観測事例を示す。

八代海においても、調査データが蓄積されている。熊本県水産研究センターの観測によると、八代海湾奥部において 3.0mg/L 以下の溶存酸素量が観測されている（図 3.6.10）。鹿児島県水産技術開発センターの観測によると、八代海中部においても観測データがある 1989 年以降で 3.0mg/L 以下の溶存酸素量が 4 回観測、2.0mg/L 以下の溶存酸素量が 1 回観測されている。有明海の河川感潮域や大牟田沖、八代海及び橘湾の底層溶存酸素量については、有明海湾奥部や諫早湾と異なって情報が少なく、不明な点が多い。これらのエリアの底層溶存酸素量に起因する漁業被害の報告はない。

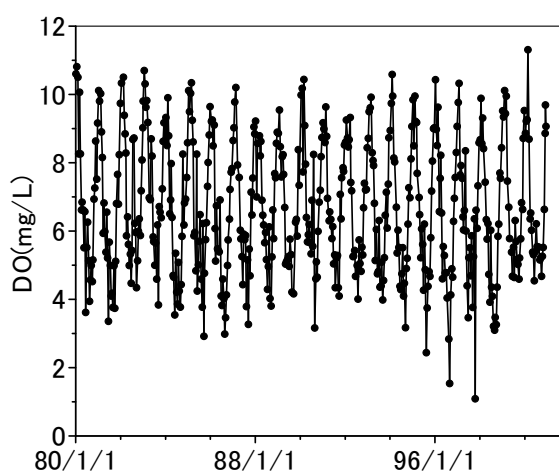


図 3.6.7 六角川感潮域における溶存酸素量の変化

資料：吉田賢二（2004）：有明海佐賀県海域に流入する主要河川感潮域における水質環境の長期変動。佐賀県有明水産振興センター研報，第 22 号，pp. 81-89³を元に作図

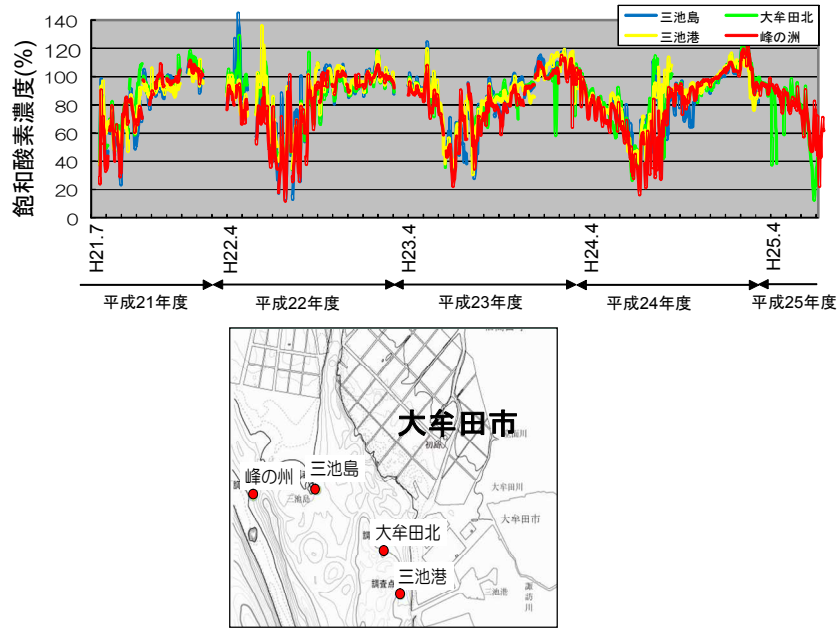


図 3.6.8 大牟田沖底上 5cm における溶存酸素量の変化

資料：九州農政局委託調査による福岡県観測

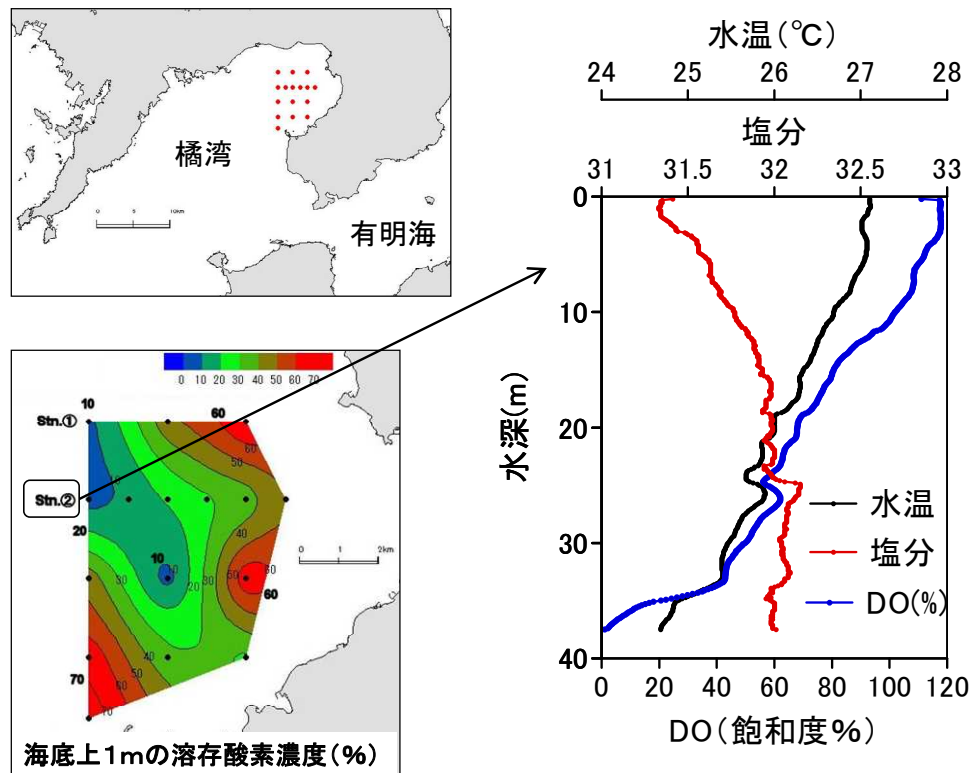


図 3.6.9 2012年9月13日に観測された橋湾の貧酸素水塊

資料：長崎県総合水産試験場提供

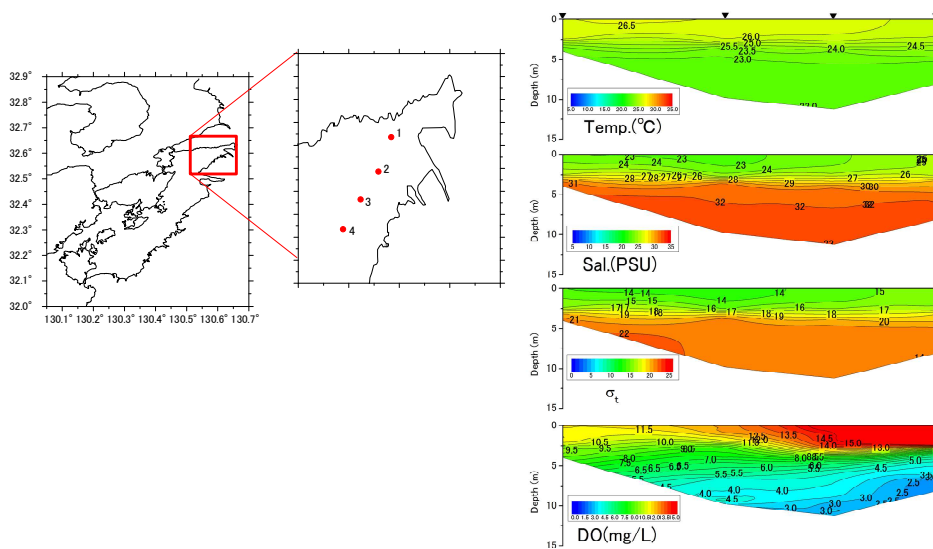


図 3.6.10 2013年7月2日に観測された八代海湾奥部の水温・塩分・密度、溶存酸素量の鉛直断面

資料：熊本県水産研究センター定期観測結果

(3) 貧酸素化に関わる酸素消費特性

海域の酸素消費が大きく、酸素供給を上回るようになると貧酸素化が進行する。底層水中の酸素消費には底泥と海水それぞれによる酸素消費が影響するが、有明海湾奥部の場合、底泥に比べて海水による酸素消費の寄与が大きい。西海区水産研究所が有明海湾奥部で行った10回の実験では、全酸素消費速度は0.28～1.39mg/L/dayの範囲にあり、平均するとそのうち海水による寄与（海水中の懸濁物による酸素消費を含む）が70%、底泥による寄与が30%であった⁴⁾（西海区水産研究所，2009）。海水による酸素消費のうちでは、懸濁物による酸素消費が大きい。阿部ら（2003）は、酸素消費とSS濃度に良い相関があることを示しており⁵⁾、これを参考にすると、夏期の有明海湾奥部の海底上5mの層では海水自体（溶存態物質）の酸素消費速度1.32(g/m³/day)に対して、懸濁物による酸素消費速度が最大2.53(g/m³/day)になる。さらに、児玉ら（2009）は、懸濁物の有機炭素安定同位体比及び炭素窒素比と酸素消費速度を比較することにより、海域起源の有機物量が多いほど酸素消費速度が大きくなることを示した⁶⁾。これらの結果は、有明海の貧酸素水塊発達に対しては、植物プランクトン等海域で生産された有機物分解の影響が大きいことを示している。また、有明海湾奥西部・諫早湾では、浅い海域ほど表層堆積物中の有機物含量が多く⁷⁾（岡村ら，2005）、浅海域で貧酸素水塊が発達する原因の1つと考えられる。

(4) 貧酸素の経年変化特性

有明海湾奥部における貧酸素水塊は小潮時に発達する傾向があるが、2000年以前の有明海では小潮時の底層溶存酸素量調査はほとんど行われていなかった。有明海湾奥部で広域的に貧酸素水塊が発生していることが初めて発見・報告されたのは2001年である⁸⁾ (日本自然保護協会, 2001)。その後、木元ら(2003)は2002年に諫早湾で貧酸素水塊が発生したことを報告し⁹⁾、2003年には堤ら(2007)が有明海湾奥部で貧酸素水塊を観測した¹⁰⁾。2004年からは西海区水産研究所によって有明海湾奥部において底層溶存酸素量の連続観測が実施されているが、この結果によると、濃度低下の程度や継続期間には年による違いがあるものの、2004年から2015年までの12年のうち、全ての年で最低値が3.0mg/Lを下回っており、うち11年については2.0mg/Lを下回っている(図3.6.11)。底層溶存酸素量の日平均値が3.0mg/Lを下回る日数を経年的に比較すると、2004年から2015年までの12年間では2006年が最も長い年であった(3地点平均で55日間)。2012年がそれに次ぐ(同じく53日間)。一方で、2014~2015年には比較的短かった(同じく21日間、23日間)(図3.6.12)。

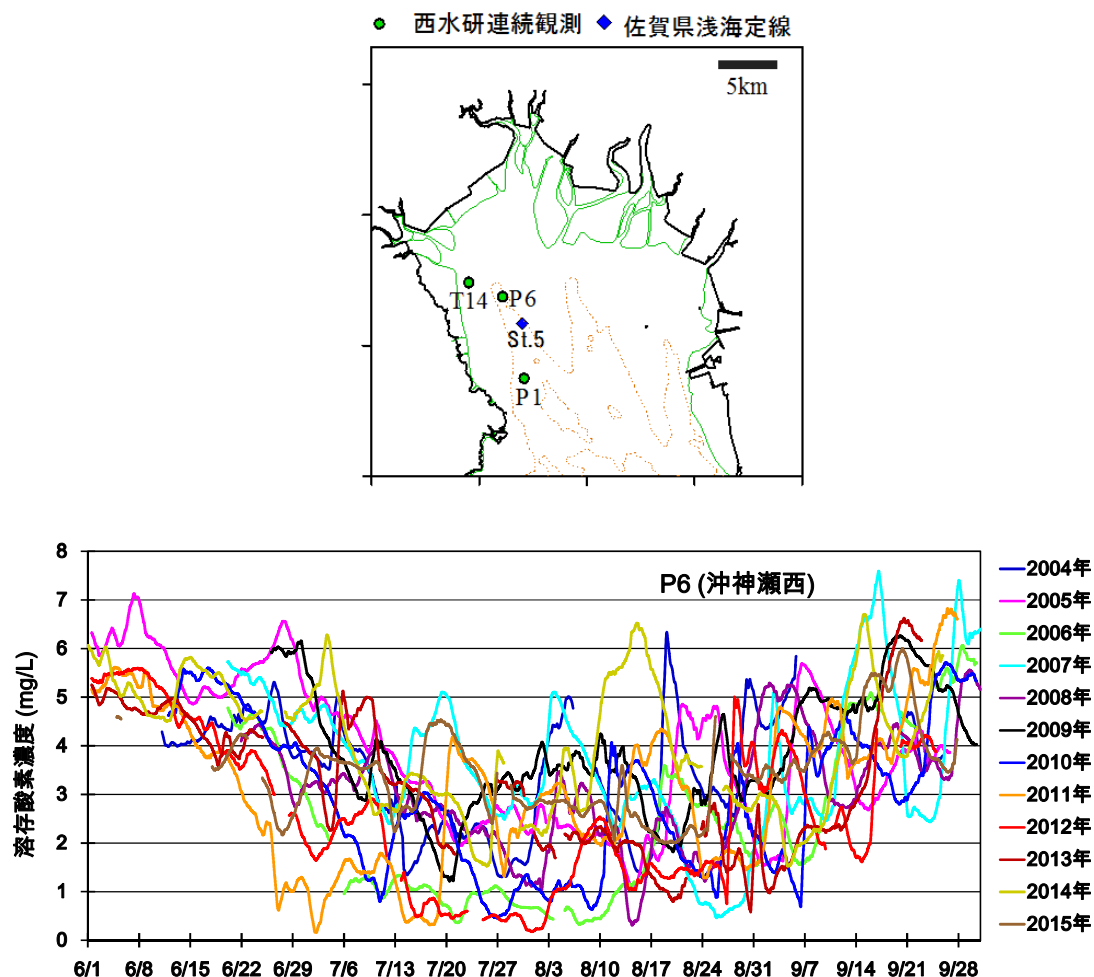
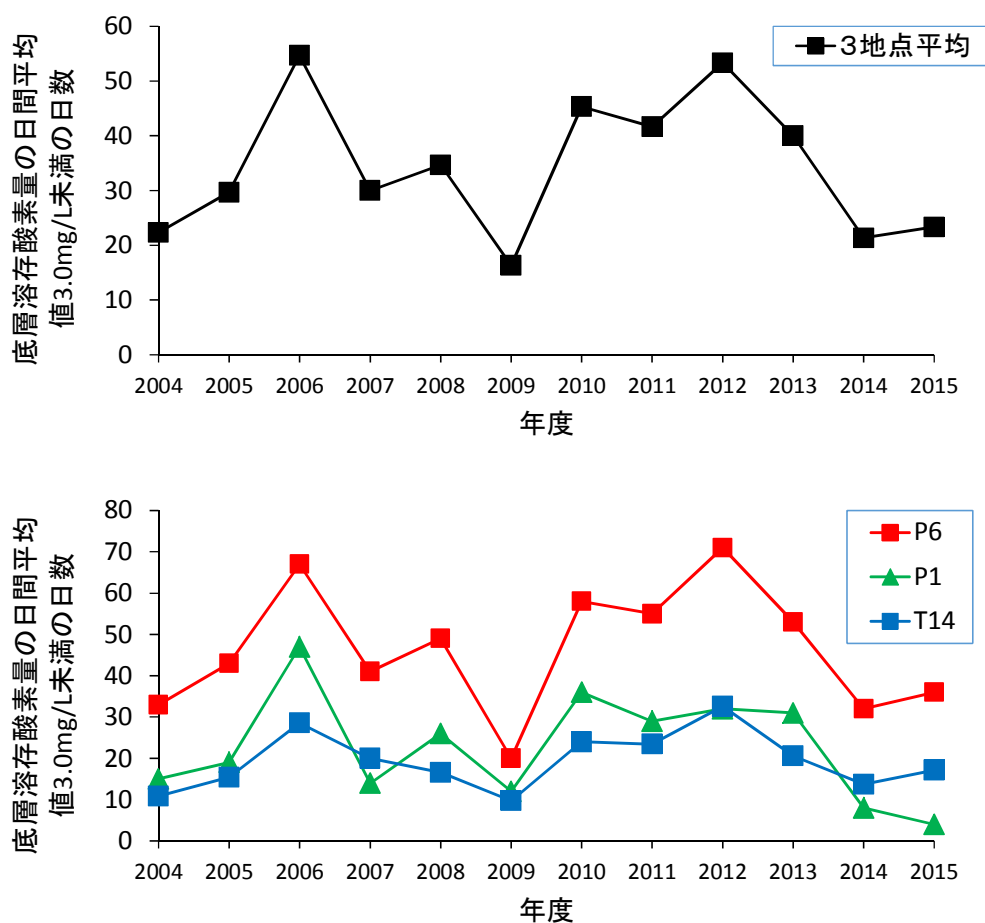


図 3.6.11 有明海湾奥部の定点 P6 の海底上 0.2m における溶存酸素量の変動の経年変化

資料：西海区水産研究所提供



注) 各年度、各地点の底層溶存酸素量の日平均値が 3.0mg/L 未満となった日数を記載している。なお、観測期間は 6~9 月を中心に行われており、詳細な観測日数は各年度、各地点により異なる。

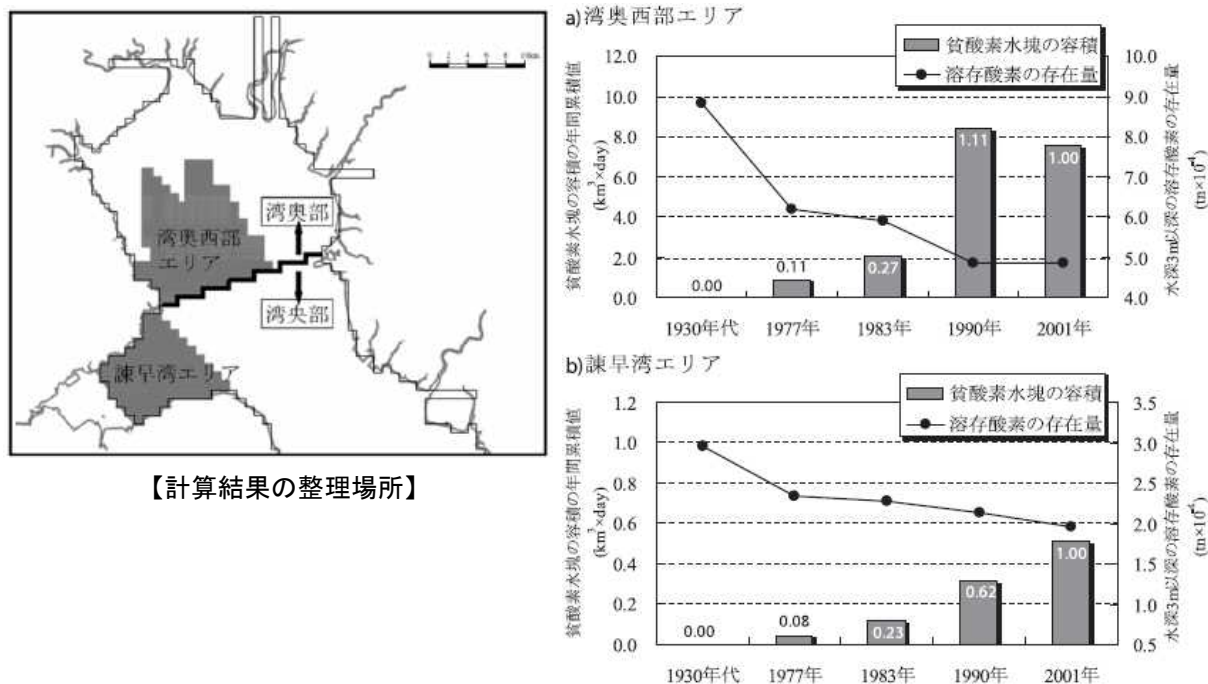
図 3.6.12 有明海湾奥部の定点 T14・P6・P1 における底層溶存酸素量の日平均値 (3.0mg/L 未満) の経年変化

資料：国立研究開発法人 水産研究・教育機構 西海区水産研究所「有明海水質連続観測調査結果」より整理

底層溶存酸素量の経年変化については、永尾ら (2010) は数値実験によって、1930 年代、1977、1983、1990、2001 年を対象に有明海を取り巻く経年的な環境変化と貧酸素水塊の発生との関係性を検討している¹¹⁾。同実験では、溶存酸素量が 2.0mg/L 以下を貧酸素水塊としたところ、有明海湾奥西部及び諫早湾の両海域では、1983 年から 1990 年の間に貧酸素水塊の容積 (年間累積値) が増加した (図 3.6.13)。諫早湾では 1990 年から 2001 年にかけても増加した。本文献ではこうした変化の原因の 1 つはモデル内で計算された鉛直拡散係数 (上層と下層の混ざりやすさ) とエリアごとの水平方向の流入出流量の変化であるとしている。湾奥西部エリアの鉛直拡散係数と当該エリアへの流入出量の 2 つの変動要因について考察した結果、当該エリアでの 1977 年以降の両要因の変化は、地形の改変等の影響よりも外海潮位振幅 (M_2 分潮の F 値) の自然変動の影響を強く受けていると報告している。

貧酸素水塊の経年変化に影響するもう 1 つの原因は生化学的な酸素消費量の変

化である。水中の酸素消費量が増加すると、貧酸素化が促進される。湾奥西部海域では1930年代の酸素消費量は2001年の半分以下であり、これは、二枚貝類の減少によって、一次生産起源の有機物が利用されず酸化分解へ移行する割合が増加した結果、酸素消費が増大したためと報告している。



注) 図中の数値は、各年代の貧酸素水塊容積の計算結果の2001年比である。

図 3.6.13 貧酸素水塊の容積の年間累積値と溶存酸素の存在量（8月平均値）の変化

資料：永尾謙太郎，竹内一浩，畑恭子，堀家健司，木村奈保子（2010）：有明海の長期的な環境変化に伴う貧酸素水塊の発生状況に関する数値実験，土木学会論文集 B2（海岸工学），第 66 号，pp. 1134-1140

(5) まとめ

有明海における主要な貧酸素水塊は、夏期に有明海湾奥部と諫早湾の 2 ヶ所で別々に発生する。鉛直的には、貧酸素水塊は密度躍層よりも下層に形成され、有明海湾奥部では浅海域で特に溶存酸素量が低下する。さらに、有明海湾奥部及び諫早湾の貧酸素水塊は潮汐混合の影響を強く受けており、潮流が弱い小潮時に発達しやすく、潮流が強い大潮時には緩和あるいは解消することが多い。

有明海及び八代海での底層溶存酸素量の状況について示した。

(底層溶存酸素量については、2016 年 3 月に生活環境項目環境基準に追加(類型：基準値 生物 1：4.0mg/L、生物 2：3.0mg/L、生物 3：2.0mg/L)されており、今後、海域毎の類型指定の検討が進められることになる)

浅海定線調査(大潮満潮時に観測)に基づいた有明海における底層溶存酸素量の年間最低値は、データのある 1972 年以降、福岡県・佐賀県の 6 地点のうち佐賀県の 2 地点(有明海湾奥西部及び有明海湾中部)で低下傾向がみられ、その他の地点は横ばい傾向であった。しかしながら、佐賀県 1 地点(有明海湾奥西部)では、有明海湾奥奥部及び有明海湾奥東部の地点と比べ、最近 10 年間(2005~2014 年)で 2.0mg/L 又は 3.0mg/L を下回る回数(各 4 回、9 回)が多く、また、1972~1984 年と比べても、2.0mg/L 又は 3.0mg/L を下回る回数が増えている。

2004 年から実施されている有明海湾奥部における底層溶存酸素量の連続観測の結果(大潮・小潮を含めて連続的に計測)によると、濃度低下の程度や継続期間には年による違いがあるものの、データのある 2004 年から 2015 年までの 12 年のうち、全ての年で日平均値の最低値が 3.0mg/L を下回っており、うち 11 年については 2.0mg/L を下回っている。また、諫早湾で実施されている底層溶存酸素量の連続観測結果(2006~2014 年)によると、全ての年で日平均値の最低値が 2.0mg/L を下回っている。

底層溶存酸素量の日平均値が 2.0mg/L 未満又は 3.0mg/L 未満の日数は、2006 年で最も多く(各地点の平均で各 37 日、55 日)、2009 年で少なく(同じく各 3 日、16 日)になっており、有意な変化傾向はみられなかった。

八代海では、八代海中部において観測データがある 1989 年以降で 3.0mg/L 以下の溶存酸素量が 4 回観測、2.0mg/L 以下の溶存酸素量が 1 回観測されている。

参考文献

- 1) 速水祐一 (2007) : 有明海奥部の貧酸素水塊, 海洋と生物, 第 173 号, pp. 577-583
- 2) 山口創一, 経塚雄策 (2006) : 諫早湾における貧酸素水塊形成機構, 海の研究, Vol. 15, pp. 37-51
- 3) 吉田賢二 (2004) : 有明海佐賀県海域に流入する主要河川感潮域における水質環境の長期変動. 佐賀県有明水産振興センター研報, 第 22 号, pp. 81-89
- 4) 独立行政法人水産総合研究センター 西海区水産研究所 (2009) : 「平成 20 年度環境省請負業務 有明海貧酸素 水塊発生機構実証調査報告書」
- 5) 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
- 6) 児玉真史, 徳永貴久, 木元克則, 柴原芳一 (2009) : 夏季の有明海奥部における基礎生産速度と有機懸濁物質の分解特性. 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 65, No. 1, pp. 1006-1010
- 7) 岡村和麿, 田中勝久, 木元克則, 清本容子 (2005) : 有明海奥部と諫早湾における表層堆積物中の有機物の分布と有機炭素安定同位体比, 海の研究, Vol. 15, No. 2, pp. 191-200
- 8) 公益財団法人日本自然保護協会 (2001) 「有明海奥部における底層の溶存酸素濃度 (速報)」
http://www.nacsj.or.jp/old_database/isahaya/isahaya-010817-hokoku.html.
- 9) 木元克則, 西内耕, 岡村和麿 (2003) : 有明海における溶存酸素分布, 月刊海洋, 第 394 巻, pp. 261-265
- 10) 堤裕昭, 堤彩, 高松篤志, 木村千寿子, 永田紗矢香, 佃政則, 小森田智大, 高橋徹, 門谷茂 (2007) : 有明海奥部における夏季の貧酸素水発生域の拡大とそのメカニズム. 海の研究, Vol. 16, pp. 183-202
- 11) 永尾謙太郎, 竹内一浩, 畑恭子, 堀家健司, 木村奈保子 (2010) : 有明海の長期的な環境変化に伴う貧酸素水塊の発生状況に関する数値実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 66 号, pp. 1134-1140