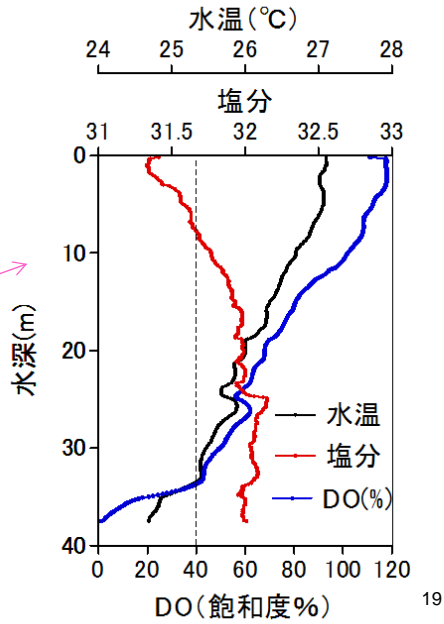
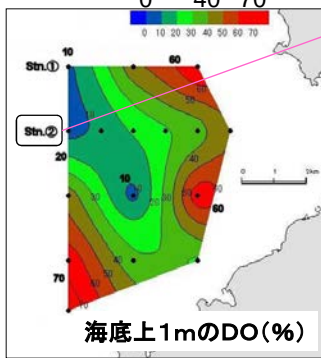


橘湾における貧酸素水塊

長崎県総合水産試験場提供

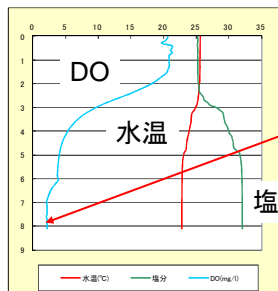
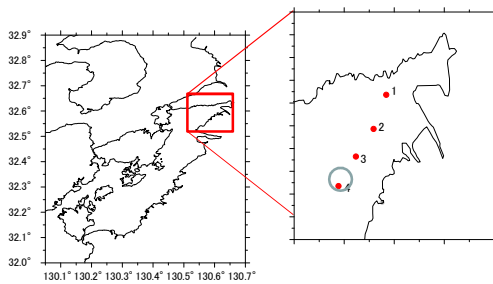


19

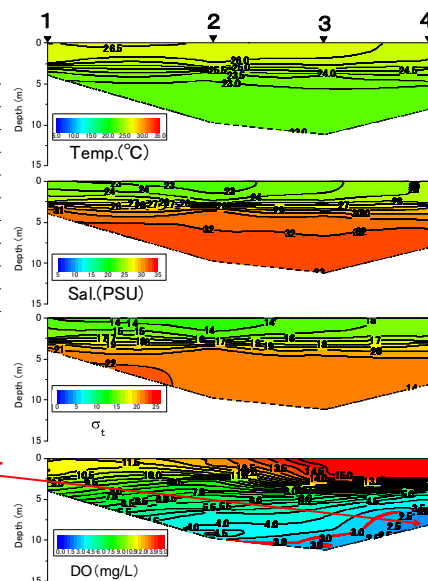
八代海の熊本県海域

熊本県水産研究センター定期観測結果

2013年7月2日(長潮)に湾奥部底層で
溶存酸素2.1mg/Lの貧酸素水を観測。

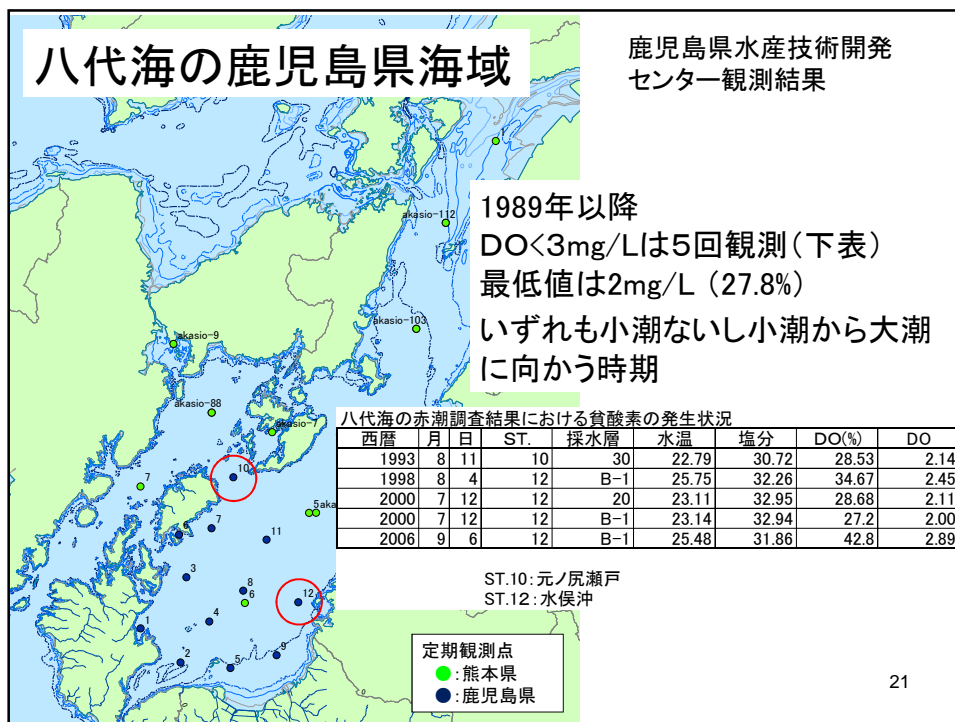


DO: 2.1mg/L



Stn. 1~4の水温(°C)・塩分(PSU)・クロロフィルa強度、溶存酸素(mg/L)の鉛直面図

(熊本県水産研究センター)



21

培養実験で得られた全酸素消費速度の比較

有明海:	0.28~1.39mg/L/day	} (柳, 2004)
志津川湾:	0.93mg/L/day	
東京湾:	0.19~1.48mg/L/day	
燧灘:	0.20mg/L/day	
周防灘:	0.10~0.89mg/L/day	
大村湾:	0.21~0.28mg/L/day	

底泥のみ

有明海:	0.29~2.38g/m ² /day	} (丸茂・横田, 2012)
英虞湾(採集直後):	0.91~1.18g/m ² /day	
広島湾:	0.7~1.5g/m ² /day	
豊前海:	0.12~0.39 g/m ² /day	

22

貧酸素水塊の発生状況まとめ1

- ・有明海の貧酸素水塊は、基本的に有明海湾奥部と諫早湾の2カ所で発生。
- ・密度成層の形成に伴い、密度躍層より下層が貧酸素化。干潟縁辺に近い浅海域で貧酸素が発達することが特徴。
- ・貧酸素水塊の範囲、強度は年により大きく変動。ただし、有明海奥部の貧酸素水塊は2004年以降、毎年発生。
- ・大牟田沿岸浅海域でも間欠的に貧酸素化発生、六角川・筑後川等の河川感潮域が貧酸素化する場合もある。
- ・八代海、橘湾の底層においても貧酸素水塊が観測された。
- ・有明海奥部の酸素消費速度は大きく、東京湾に匹敵する。

23

貧酸素水塊の発生状況まとめ2

- 調査・研究の進展で、貧酸素化が生じていることが明らかになった海域が増えたため、今後も観測・モニタリングを継続する必要がある。
- 漁業生産への影響の大きい有明海奥部・諫早湾については、優先的に対策等を検討する必要があると考えられる。

24

Ⅲ. 貧酸素水塊の経年変動 (2000年以前を中心に)

25

浅海定線調査データの解析1

●1976年～2000年の観測点4では4.3mg/L以下の出現に大きな違いはなし(滝川ら, 2003)

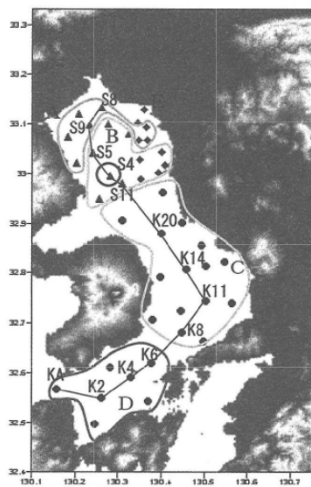


図-1 浅海定線調査地点 (クラスター分類と縦断線)

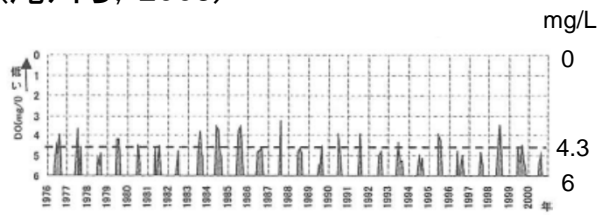


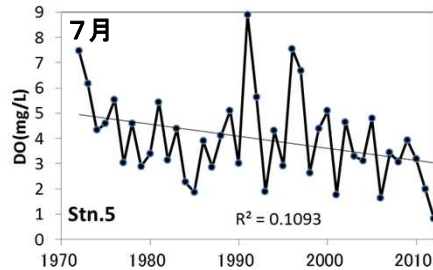
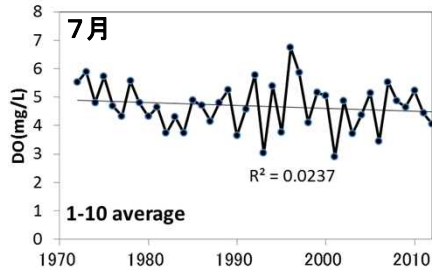
図-7 底層におけるDOの経年変化 (S4地点)

26

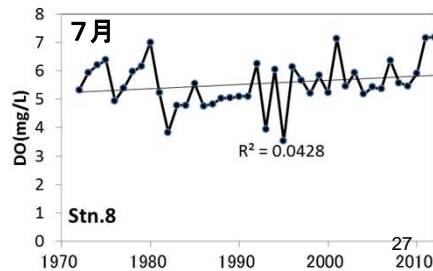
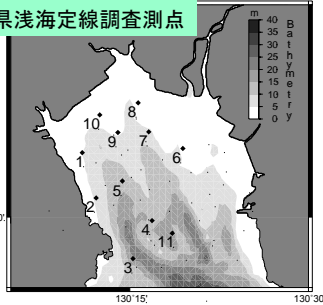
浅海定線調査データの解析2

佐賀県有明水産振興センターデータ提供

明瞭なトレンドはなく、
測点によっては上昇
傾向にある点もある。



佐賀県浅海定線調査測点



浅海定線調査データの解析3

●有明海奥部では、底質の含泥率やCODの高い西岸
域を中心に貧酸素水塊の発生回数が非常に多い
(石谷ら, 2007)

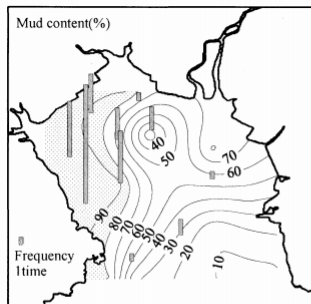


Fig.3 1972年～2000年の有明海奥部における貧酸素水塊の発生回数と2002年の底質の含泥率の分布
Occurrence frequency of hypoxic water during 1972-2000 and distribution of mud content in 2002

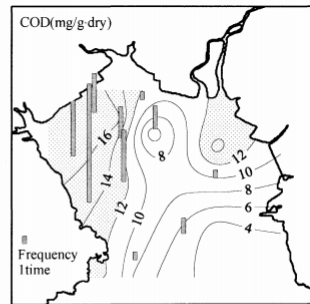


Fig.4 1972年～2000年の有明海奥部における貧酸素水塊の発生回数と2002年の底質のCODの分布
Occurrence frequency of hypoxic water during 1972-2000 and distribution of COD of bottom sediment in 2002

浅海定線調査データの解析3

●夏季の有明海奥部では、成層強度が強いほど底層の溶存酸素濃度は低く、降水量が多いほど（河川流量が多いほど）成層は強い。（石谷ら, 2007）

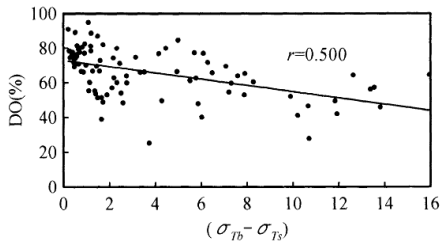


Fig.13 1972年～2000年夏季における底層のDOと $(\sigma_{TB}-\sigma_{TS})$ の関係
Relation between DO near bottom and $(\sigma_{TB}-\sigma_{TS})$ in summer during 1972～2000

底層の酸素飽和度と成層強度（表底密度差）の関係

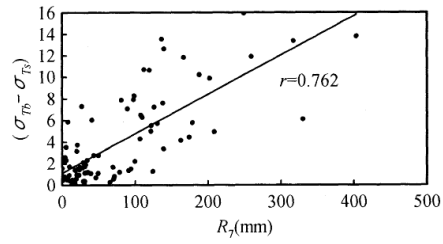
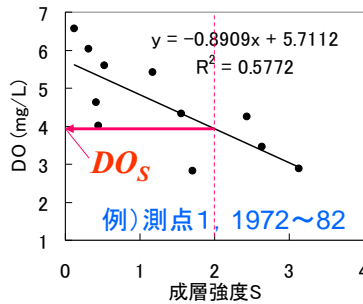


Fig.14 1972年～2000年夏季における $(\sigma_{TB}-\sigma_{TS})$ と R_7 の関係
Relation between $(\sigma_{TB}-\sigma_{TS})$ and R_7 in summer during 1972～2000

降水量と成層強度の関係

浅海定線調査データの解析4

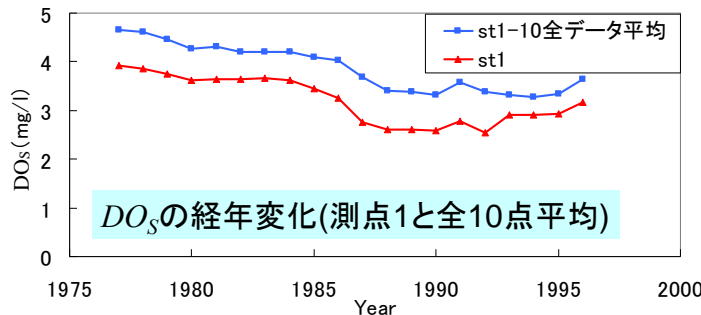
成層強度の影響を除いた底層DO変動



成層強度と底層DOの間で11年ずつの回帰直線を作成

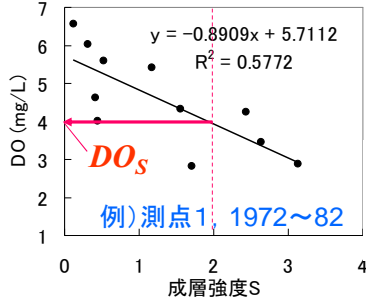
成層強度一定値(2)の時の回帰直線の示す値(DO_s)→成層強度の影響を除いた底層DOの値を示す

(速水ら, 2006)



DO_s : 成層強度変動の影響を除いた底層 DO

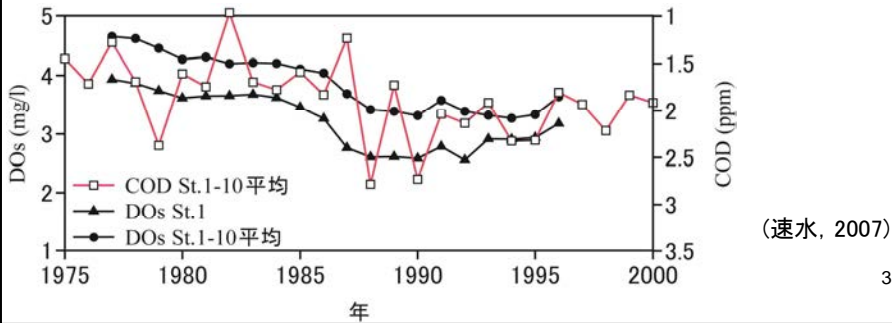
浅海定線調査データの解析4 成層強度の影響を除いた底層DO変動



成層強度の影響を除外すると、過去30年間で有明海奥部の7月の底層DOは低下傾向にある。

成層強度に関係なくDO低下

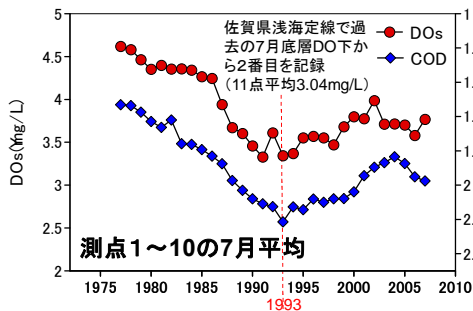
酸素消費速度の上昇を示唆
過去30年で底層の有機懸濁物質増加?



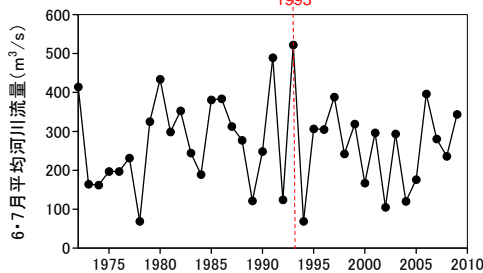
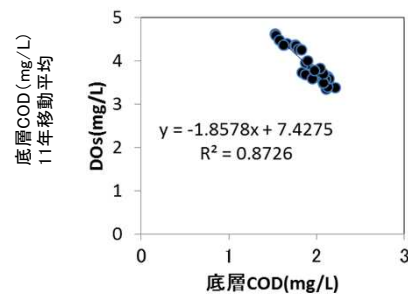
31

浅海定線調査データの解析4 (2009年度までのデータ解析)

佐賀県有明水産振興センターデータ提供



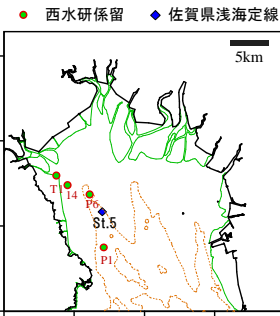
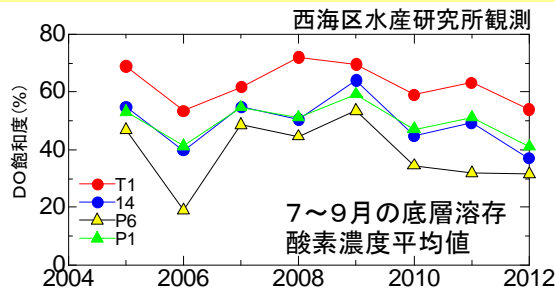
DOs vs COD (底層11年移動平均)



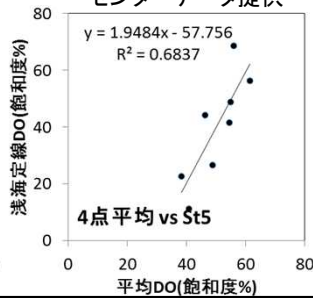
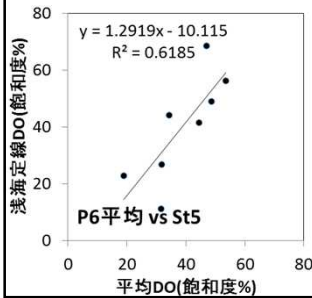
1990年代以降は横ばいからやや回復。ただし、1970年代~80年代前半に比べるとDOsは低い。

やや回復しても河川流量が多いと深刻な貧酸素発生³²。

浅海定線データと連続観測の比較



浅海定線底層DO(7月)との比較 佐賀県有明水産振興センターデータ提供



浅海定線データは大潮時のデータのために、浅海域は鉛直混合しており比較できない。

湾奥中央部(st.5)では、出水によって成層強化される7月には、成層が維持される。

出水による成層で貧酸素化する7月のSt.5については、その年の平均的な貧酸素強度をある程度反映している可能性。

数値シミュレーションによる検討 (永尾ら, 2010)

●3次元数値生態系モデルによる長期的な環境変化と貧酸素水塊の発生の関係性に関する検討。

計算ケース

- 1930年代
- 1977年
- 1983年
- 1990年
- 2001年

地形改変、外海潮汐、平均水位流入負荷量、二枚貝漁獲量の変化を考慮

2001年の再現計算を基本として計算を実施。

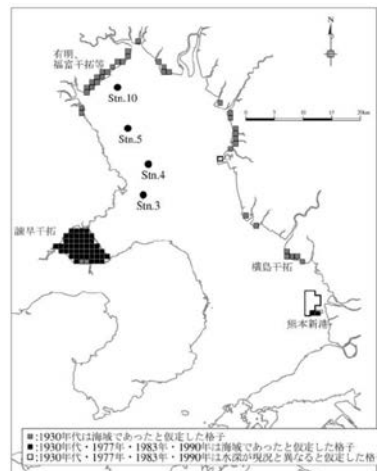


図-2 各年代の地形条件の設定方法

各年代の計算条件

外海潮位振幅
(月昇交点変動)

平均水位

流入負荷量
(筑後川順流域)

二枚貝生息量

表-1 外海潮位振幅の2001年(現況)に対する比率

分潮	1930年代	1977年	1983年	1990年
M2分潮	1.000	1.030	0.992	0.972
K1分潮	1.000	0.892	1.023	1.079
O1分潮	1.000	0.823	1.038	1.128

表-2 平均水位の2001年(現況)に対する差

分潮	1930年代	1977年	1983年	1990年
平均水位	0.0	-8.2cm	-8.9cm	-5.9cm

表-3 筑後川順流域の流入負荷量の2001年(現況)に対する比率

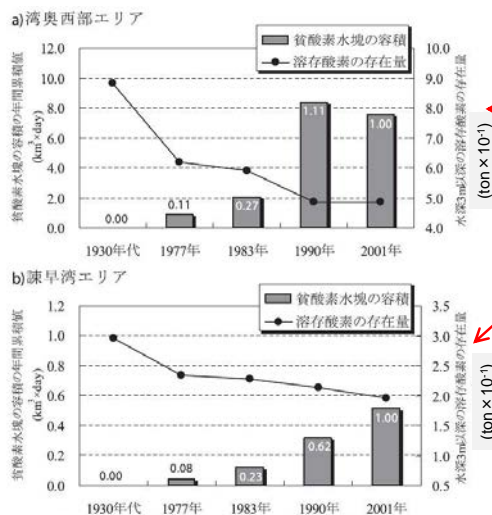
	1930年代	1977年	1983年	1990年
COD	0.63	1.30	1.30	1.35
T-N	0.46	1.53	1.65	1.66
T-P	0.49	1.30	1.54	1.52

表-5 二枚貝類の生息量の2001年(現況)に対する比率

	1930年代	1977年	1983年	1990年
アサリ+タイラギ	8.9*	14.8	15.7	1.5
サルボウ+アゲマキ	2.5	0.7	0.7	2.5
カキ	8.3	8.3	4.1	1.3 ³⁵

※1930年代はアサリ+タイラギのみ1950年代の漁獲量×漁獲率10倍で推定した値を設定

検討結果1(貧酸素水塊の規模)



図内の数値は、各年代の貧酸素水塊容積の計算結果の2001年比である。

図-4 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

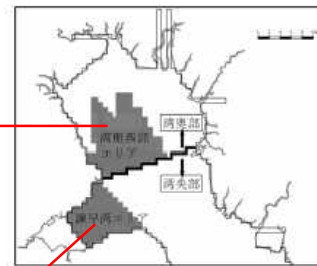
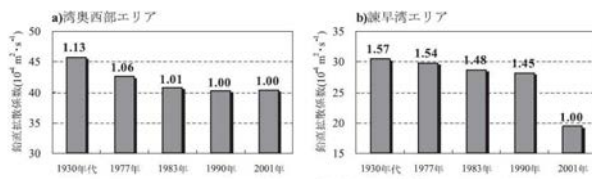


図-3 計算結果の整理場所

貧酸素水塊の容積は経年的に増大した。

有明海湾奥西部では1980年代から90年代にかけての増大が大きい

検討結果2(貧酸素の経年変化の要因)



図中の数値は、各年代の計算結果の2001年比である。

図-5 水柱で平均した鉛直拡散係数の変化 (8月平均)

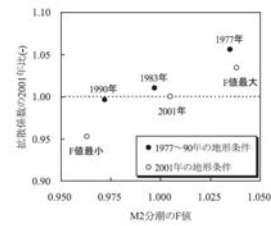
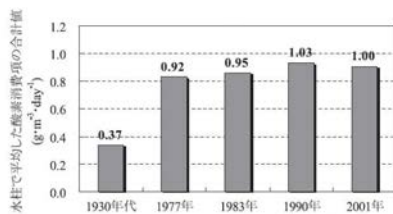


図-7 湾奥西部エリアにおけるF値の変化と水中で平均した鉛直拡散係数

潮汐振幅の変動・地形の改変にともなって鉛直拡散係数は変化。(鉛直混合強度の変化)



図中の数値は、各年代の計算結果の2001年比である。

図-8 湾奥西部エリアにおける水柱での全酸素消費量の比較 (8月平均値)

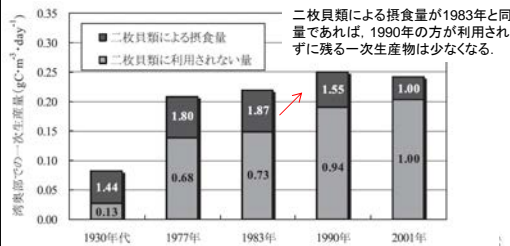
1990年代にかけて水柱での酸素消費量は増大した。

(8月の酸素消費量の約50%は懸濁態有機物の酸化分解)

検討結果3(酸素消費速度増大の原因)

有機懸濁物の分解が酸素消費の要因のうち約50%を占める。

有機懸濁物の約95%が一次生産起源



※図内の数値は、各年代の計算結果の2001年比である。

図-10 湾奥全域での一次生産量の変化 (8月平均) とそれに占める二枚貝類による摂食量

二枚貝類の減少が一次生産増加をもたらしている。

外海潮位振幅の変化の影響も無視できない。

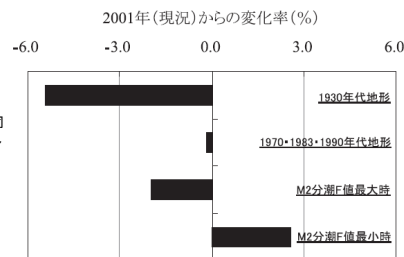


図-11 二枚貝類に利用されない湾奥西部一次生産量の変化 (8月平均値)

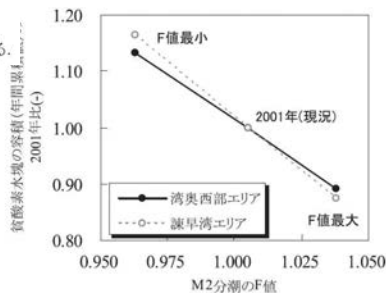


図-12 外海潮位振幅の自然変動と貧酸素水塊の容積の関係

貧酸素水塊の経年変動まとめ

- ・夏季の有明海奥部では、成層強度が強いほど底層の溶存酸素濃度は低く、降水量が多いほど（河川流量が多いほど）成層は強い。
- ・外海の潮汐振幅が大きいほど湾内の鉛直混合は強くなり、貧酸素化しにくくなる。月昇交点の変化等自然要因による潮汐振幅の変化は有明海奥部・諫早湾の底層DOに影響し得る。
- ・二枚貝類の減少は海域の有機懸濁物量を増加させ、貧酸素を促進した可能性がある。
- ・地形の変化は、鉛直混合の強度、一次生産量の変化を通して貧酸素化の促進に影響した可能性がある。
- ・その他の検討要素：ラフィド藻赤潮の増加

39

IV. 貧酸素化の軽減のための対策

40

貧酸素化の軽減の目的

1) 魚介類の生息の場の確保

→生理的に斃死が生じない(少ない)こと。
(貧酸素の直接影響以外に貧酸素によって生じる硫化水素の影響を含む。)

2) 魚介類の再生産の場の確保

→幼生期に十分な生残ができること。

3) 漁場の確保

→遊泳可能な生物が逃避せずに漁場が形成されること。

41

生物生息モデルによる再生技術の評価 楠田(2012)編 ⇒貧酸素化(底層DO)が評価項目の1つ

No. 再生策	対象海域(設定条件)
1. 囲繞堤1	湾奥部のかつてのアゲマキ漁場
2. 囲繞堤2	湾奥部および諫早湾沿岸全域
3. 覆砂1	5m以浅海域
4. 覆砂2	5m以浅海域(アサリを5倍にした)
5. 海底耕耘1	10m以浅海域(底泥の酸素消費量を3/4)
6. 海底耕耘2	10m以浅海域(底泥の酸素消費量を1/2)
7. なぎさ線の回復1	人工海岸(湾奥部、諫早湾のみ)
8. なぎさ線の回復2	人工海岸
9. 粗朶搦工1	湾奥部沿岸の一部
10. 粗朶搦工2	湾奥部と諫早湾の沿岸全域
11. カキ礁の復元1	1977年のカキ礁
12. カキ礁の復元2	1977年のカキ礁(現存量を5倍)
13. ノリ養殖1	現況のノリ養殖場(ノリ養殖を1/2)
14. ノリ養殖2	現況のノリ養殖場(ノリ養殖を0)

42

各種施策の施工場所

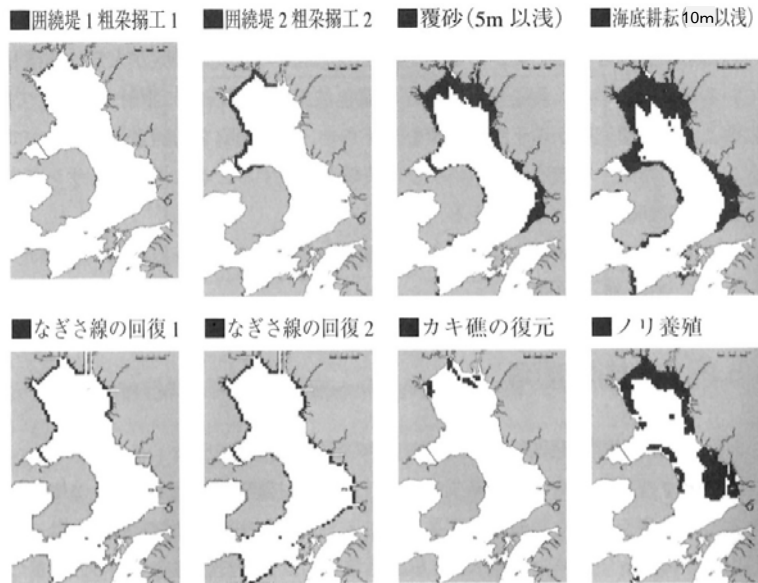


図 5.98 再生策などの施工箇所

楠田(編) 2012⁴³より

モデルによる検討結果

貧酸素水塊の年間累積値
($\text{km}^3/\text{日}$)

一次生産量の年平均値
($\text{g}/\text{km}^3/\text{日}$)

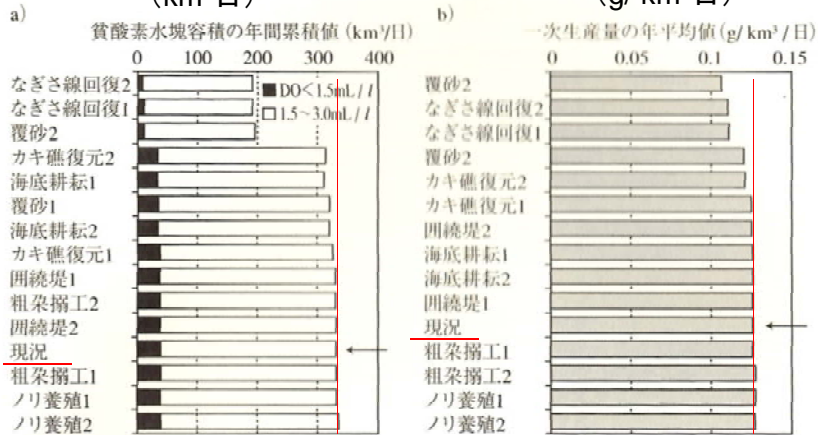
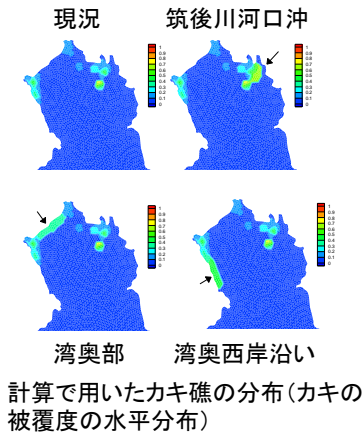


図 5.101 各再生策による a) 貧酸素水塊容積の年間累積値および b) 湾奥部の年間平均一次生産量の予測結果

なぎさ線の回復の効果が大きい。なぎさ線の回復(人工海岸の陸側に1格子増やし、増やした格子の底質には覆砂が施される。底生動物は全面格子と同じ現存量を初期値とする。)

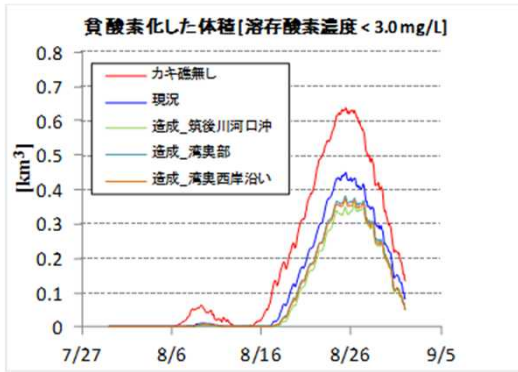
カキ礁による貧酸素抑制効果(数値シミュレーション)



カキ礁を増やした3ケースでは、現況のバイオマスの2倍になるように設定.

2007年の気象条件で計算実施.

カキ礁はごく浅海域に分布するため貧酸素水塊が発生しても影響を受けにくい.



カキ礁は貧酸素化を抑制する効果を持つ。ただし、カキ礁の造成だけでは、カキを現状の2倍にしても現在の貧酸素水塊を抑制するには効果不十分.

平成24年度有明海生態系回復方策検討調査(二枚貝類の環境浄化機能検討調査)報告書⁴⁵

流況の制御による貧酸素抑制 —円筒型流況制御ブロック—

小松ほか(1997)
楠田(2012)編

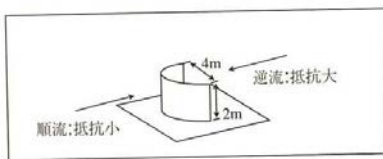


図 5.16 1/2 円筒型流況制御ブロック



図 5.17 鎌早湾に設置された流況制御ブロック

- 鉛直混合の促進
- 上げ潮・下げ潮に対して非対称な潮流(残差流)を作り出す.

多数のブロックを設置することで、任意の潮汐残差流パターンを形成。
→海水交換・物質輸送を促進

潮汐振幅の経年変化

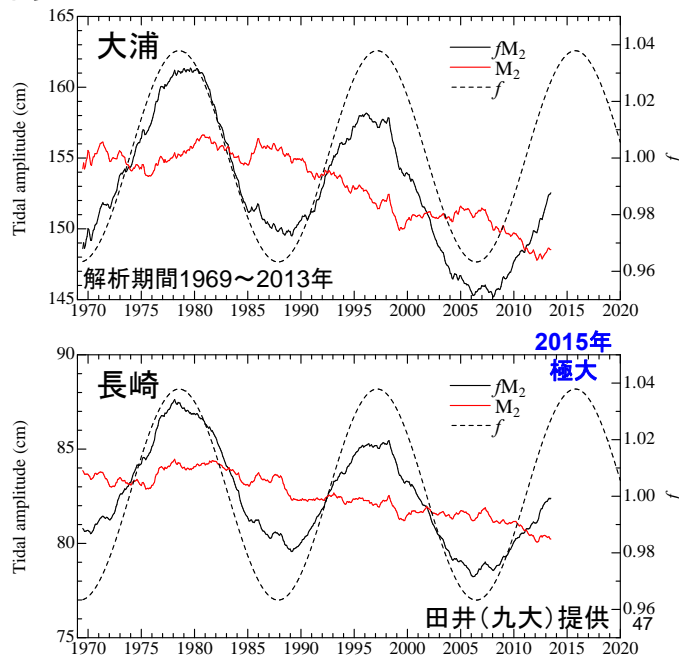
田井ほか(2010)に追加・改変

(M₂潮)

f (月の昇交点変動による18.6年周期変動)

fM_2 (f を含めた潮汐振幅変化)

M₂(f を除いた潮汐振幅変化)



貧酸素化の軽減のための対策のまとめ

・覆砂・海底耕耘・微細気泡装置による底質改善*等の対症療法的対策が実施あるいは現地試験されている。

⇒問題点 **効果の継続性**

*藤田ほか(2007)

・数値シミュレーションによる効果の確認

：**なぎさ線の回復**

⇒実施可能な規模は？

(モデルでは湾奥・諫早湾だけで50km²)

：**カキ礁の増加**

⇒単独では効果不十分

・その他の可能性

構造物による流況の制御

干潟の成長促進—海域側へのなぎさ線の回復, 堆積による有機物除去, 潮流強化による鉛直混合促進 等

・考慮すべき事項: 外海の潮汐振幅—**月昇交点変動**により増大中→貧酸素抑制. ただし前回極大より振幅小さい.⁴⁸

IV.まとめ

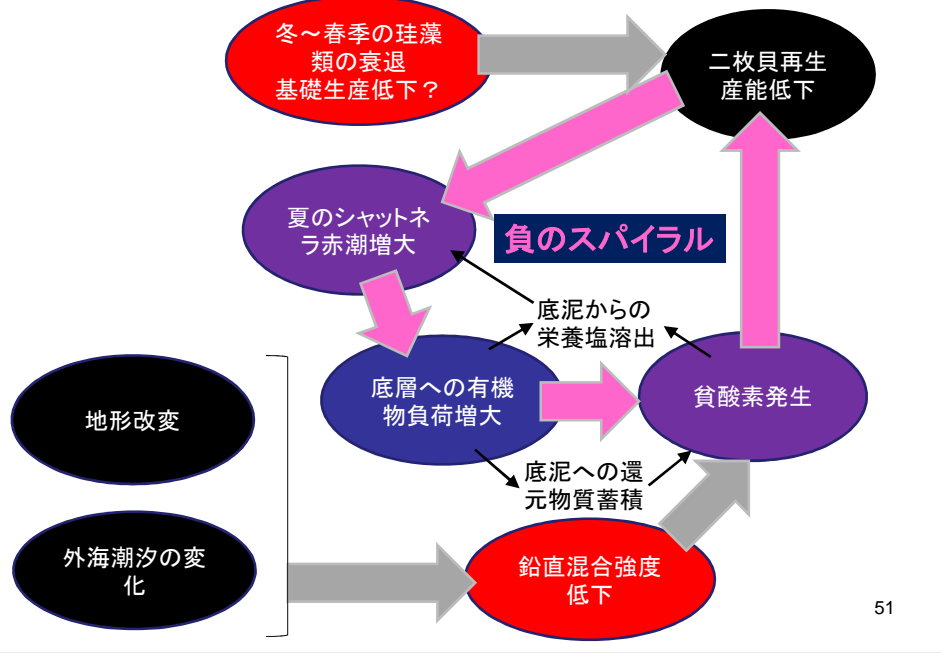
49

重点海域(有明海奥部・諫早湾)における貧酸素水塊のまとめ

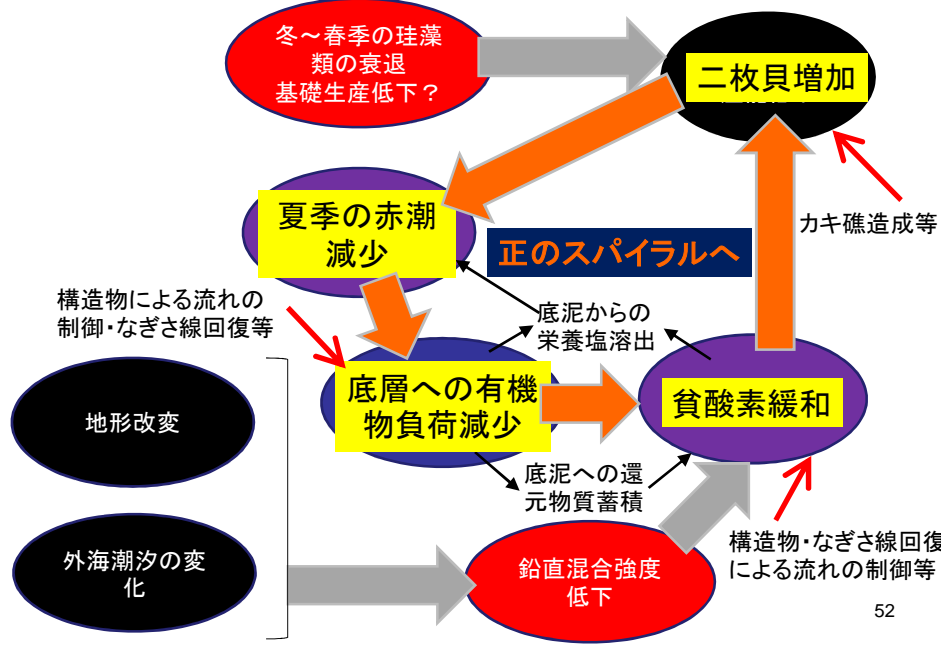
- ・現状では, 夏季に成層が強まるとほぼ必ず貧酸素化する.
- ・酸素消費速度が大きい(東京湾に匹敵)ことがその要因.
- ・貧酸素化することにより二枚貝を中心にしたベントスが減少し, 植物プランクトンの捕食圧が低くなることで, 海域底層への有機物負荷が増大, 貧酸素化をさらに促進.
- ・貧酸素水塊の年々の変動には降水量(河川流量)の影響が大きい. ただし, トレンドとしては過去の地形改変, 外海潮汐の減少, 有機懸濁物量の増加が貧酸素化を進行させた可能性がある.
- ・根本的対策: 人間が手を加えることで, 貧酸素の緩和⇒二枚貝類増加⇒有機懸濁物量減少⇒貧酸素のさらなる緩和 というサイクルへ.

50

有明海奥部・諫早湾における貧酸素化の現状(仮説)



貧酸素回復への道程イメージ



今後の課題1

○二枚貝

- ・浮遊幼生輸送と貧酸素水塊の関係の解明
- ・二枚貝による有機懸濁物除去能力が貧酸素を抑制する効果の定量化

○魚類等(遊泳性動物)

- ・仔稚魚輸送と貧酸素水塊の関係の解明

○懸濁物と底質

- ・有機懸濁物の海域での挙動・輸送の解明
- ・化学的酸素消費の定量的評価

○モニタリングの重要性

広域連続モニタリングが重要

間欠的に発生する貧酸素を的確に捉えるため³

今後の課題2

【今後検討が求められるもの】

○二枚貝幼生, 稚貝, 仔稚魚期の貧酸素耐性の解明
⇒貧酸素が生活史全般や資源動態に及ぼす影響の解明へ

○貧酸素が漁場形成に与える影響の解明

○貧酸素が物質循環や生態系構造に及ぼす影響の定量化

○貧酸素抑制のための根本的対策の検討

文献1

- 城久(1989):大阪湾の貧酸素水塊. 沿岸海洋研究ノート, 26, 87-98.
- 鬼塚正光(1989):東京湾の貧酸素水塊. 沿岸海洋研究ノート, 26, 99-100.
- Fujiwara, T. et al.(2002):The role of circulation in the development of hypoxia in Ise Bay, Japan. ECSS, 54, 19-31.
- Rabalais, N. N. et al.(2010):Dynamics and distribution of natural and hyman-caused hypoxia. Biogeosciences, 7, 585-619.
- 柳哲雄(2004):貧酸素水塊の生成・維持・変動・消滅機構と化学・生物的影響. 海の研究, 13, 451-460.
- 徳永貴久ほか(2009):有明海湾奥西部海域における貧酸素水塊の形成特性. 土木学会論文集B2(海岸工学), 65, 1011-1015.
- 久野正博(1996):伊勢湾における海況の季節変化. 三重水技研報, 6, 27-46.
- 村上哲生ほか(2001):夏季の長良川河口堰下流部の貧酸素水塊の発達と解消. 応用生態工学, 4, 73-80.
- 村上哲生ほか(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.
- 堤裕昭ほか(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, 16:183-202.
- 木元克則ほか(2003):有明海における溶存酸素分布. 月刊海洋, 394, 261-265.

55

文献2

- 森脇晋平・大北晋也(2003)中海に出現する貧酸素水塊の海況学的特性と海洋構造. LAGUNA(汽水域研究)10, 27-34.
- Diaz, R. J. and R. Rosenberg(2008):Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. Science, 321, 926-929.
- 小林良則(1993):東京湾における低酸素水域の分布と小型底びき網の漁獲量の関係. 神奈川水試研報, 14, 27-39.
- 鈴木輝明(1998):貧酸素化. in 平野敏行(編)「沿岸の環境圏」. pp.475-479.
- 柳哲雄(1998):シンポジウム「貧酸素水塊」のまとめ. 沿岸海洋研究ノート, 26, 141-145.
- Diaz, R. J. (2001): Overview of hypoxia around the world. Journal of Environmental Quality, 30, 275-281.
- 徳永ほか(2012):有明海湾奥西部海域の底質変動特性. 土木学会論文集B2(海洋開発), 68, 1139-1144.
- 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, 22, 81-89.
- 丸茂恵右・横田瑞郎(2012):貧酸素水塊の形成および貧酸素の生物影響に関する文献調査. 海生研研報, 15, 1-21.
- 滝川清ほか(2003):有明海の過去25年間ににおける海域環境の変動特性. 海岸工学論文集, 50, 1001-1005.

56

文献3

- 石谷哲寛ほか(2007):有明海奥部西岸域における貧酸素水塊の発生と密度成層. 農業土木学会論文集, 247, 65-72.
- 速水祐一ほか(2006):夏季の有明海奥部における懸濁物質輸送とその水質への影響. 海岸工学論文集, 53, 956-960.
- 速水祐一(2007):有明海奥部の貧酸素水塊. 海洋と生物, 173, 577-583.
- 永尾謙太郎ほか(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), 66(1), 1136-1140.
- 楠田哲也編(2012)蘇る有明海—再生への道程. 361pp. 厚生社厚生閣.
- 小松利光ほか(1997):方向性を持つ底面粗度を用いた潮汐残差流の創造と制御. 水工学論文集, 41, 323-328.
- 田井明ほか(2010):有明海および八代海における半日周期潮汐の長期変化について. 水工学論文集, 54, 1537-1542.
- 藤田孝康ほか(2007):有明海奥部サルボウガイ漁場における曳航式微細気泡装置による底質改善実験. 水産工学, 44, 101-111.