

2015.2.26 有明海・八代海等
総合調査評価委員会小委員会

有明海の二枚貝類と貧酸素, 赤潮との関連の検討について

速水祐一(佐賀大学)・松山幸彦・
木元克則・徳永貴久(西水研)

アウトライン

- 1) 有明海の二枚貝類減少の原因・要因について-これまでのまとめと補足-
- 2) 有明海における貧酸素水塊-復習と補足-
- 3) 二枚貝類と貧酸素, 赤潮との関連

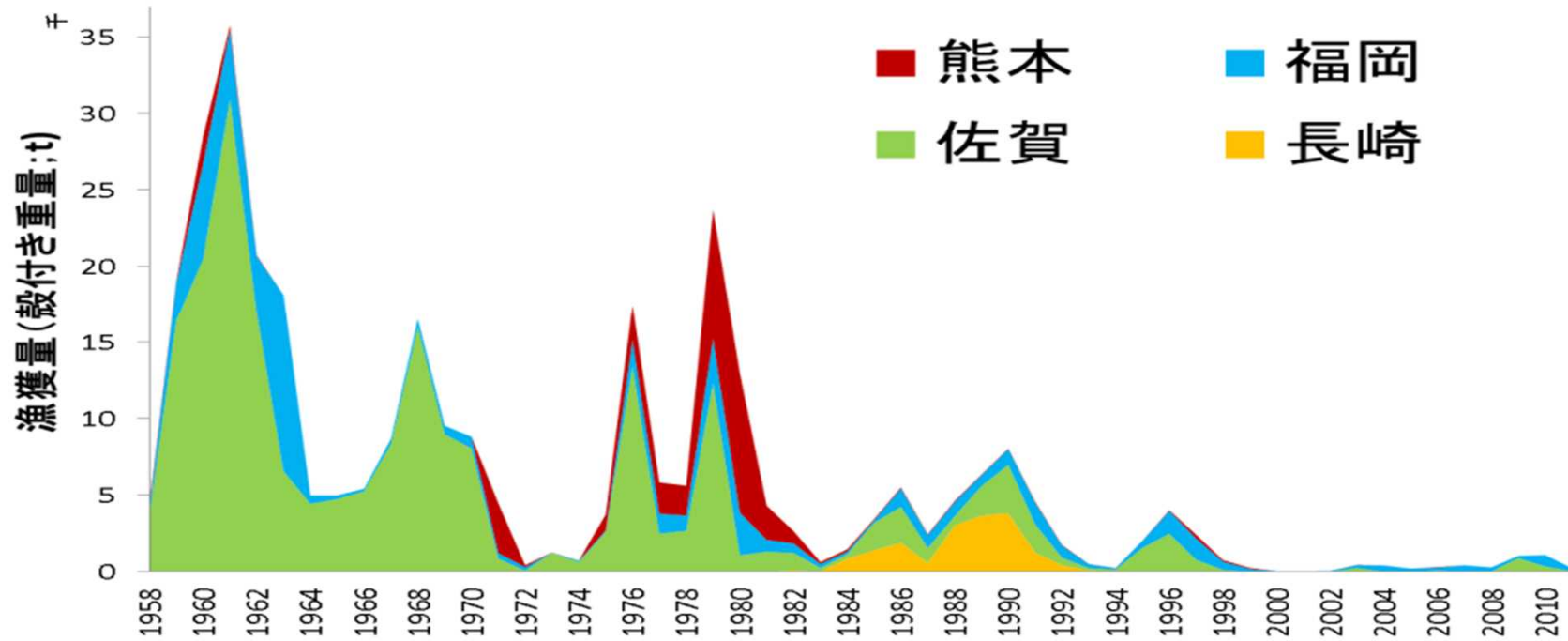
有明海の二枚貝類減少の原因・要因 について

-これまでのまとめと補足-

タイラギ・アサリ(サルボウについては後述)

① タイラギ(特に湾奥西部と東部)

有明海におけるタイラギ漁獲量



平成18年評価委報告書での指摘

- ①タイラギ長期的減少の要因：中西部漁場での底質環境の悪化（泥化、有機物・硫化物の増加、貧酸素化）による着底期以降の生息場の縮小
- ②タイラギ短期的減少の要因：北東部漁場での立ち枯れへい死とナルトビエイによる食害
- ③解明を要すること：長崎県海域での減少要因、タイラギ幼生の輸送状況に及ぼす潮流変化の影響、大量へい死発生メカニズム

平成18年評価委報告書での指摘

②-1.北東部漁場での立ち枯れ斃死



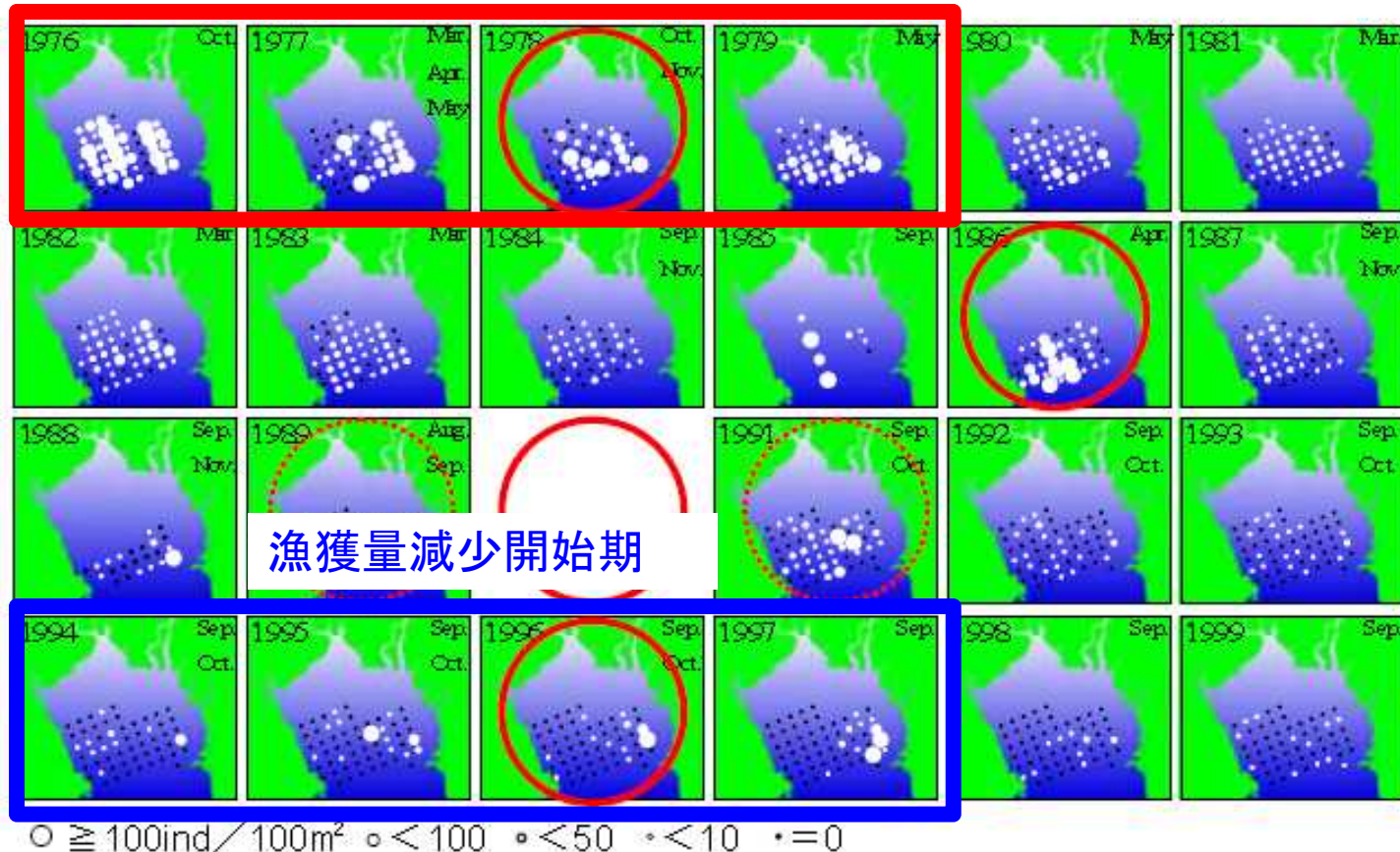
正常個体の軟体部



衰弱個体の軟体部

■ タイラギ成貝の分布：H18年委員会報告書 ■

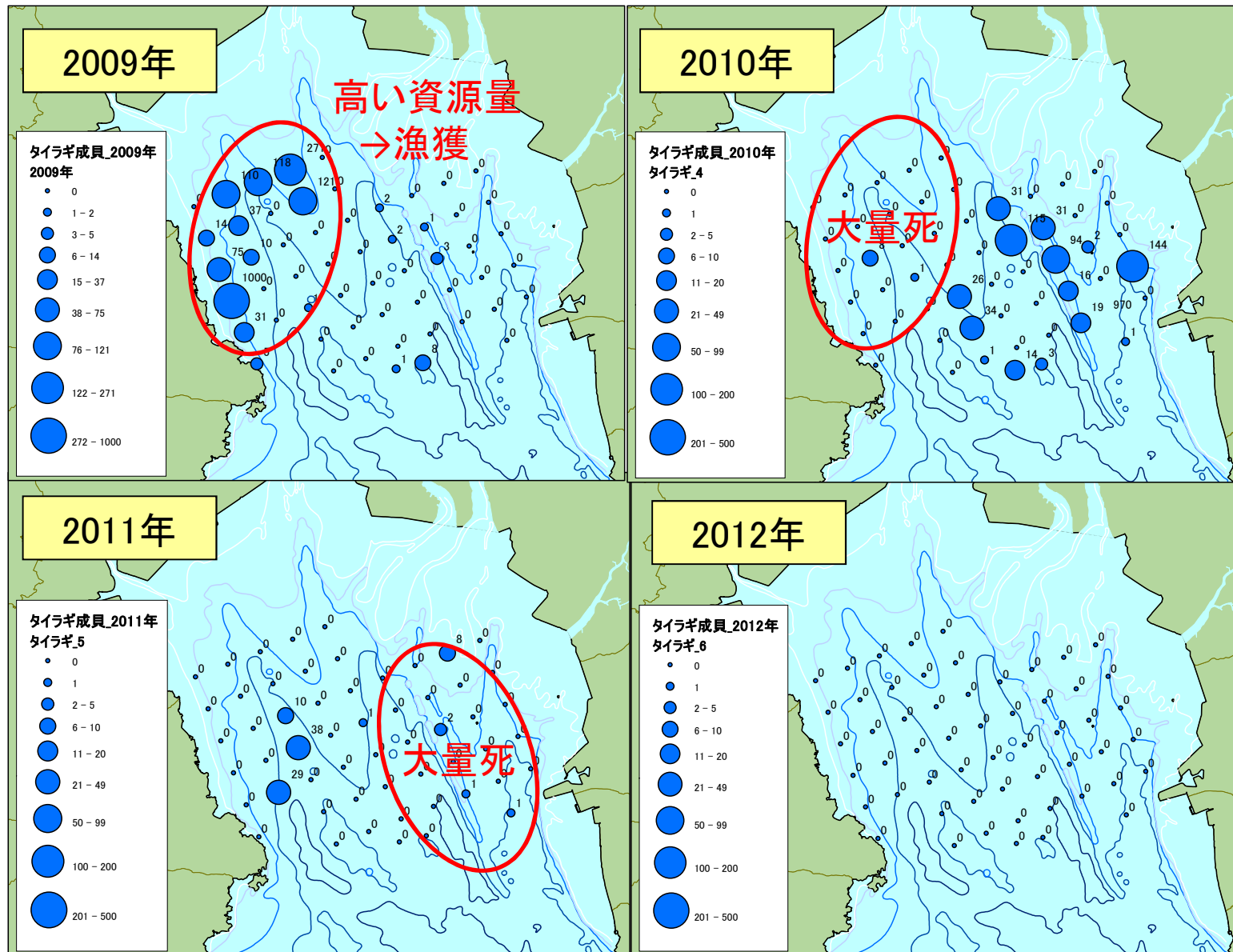
漁獲量大の期間



資料：伊藤史郎(2005)「第15回有明海・八代海総合調査評価委員会 資料-3 有明海における二枚貝について」

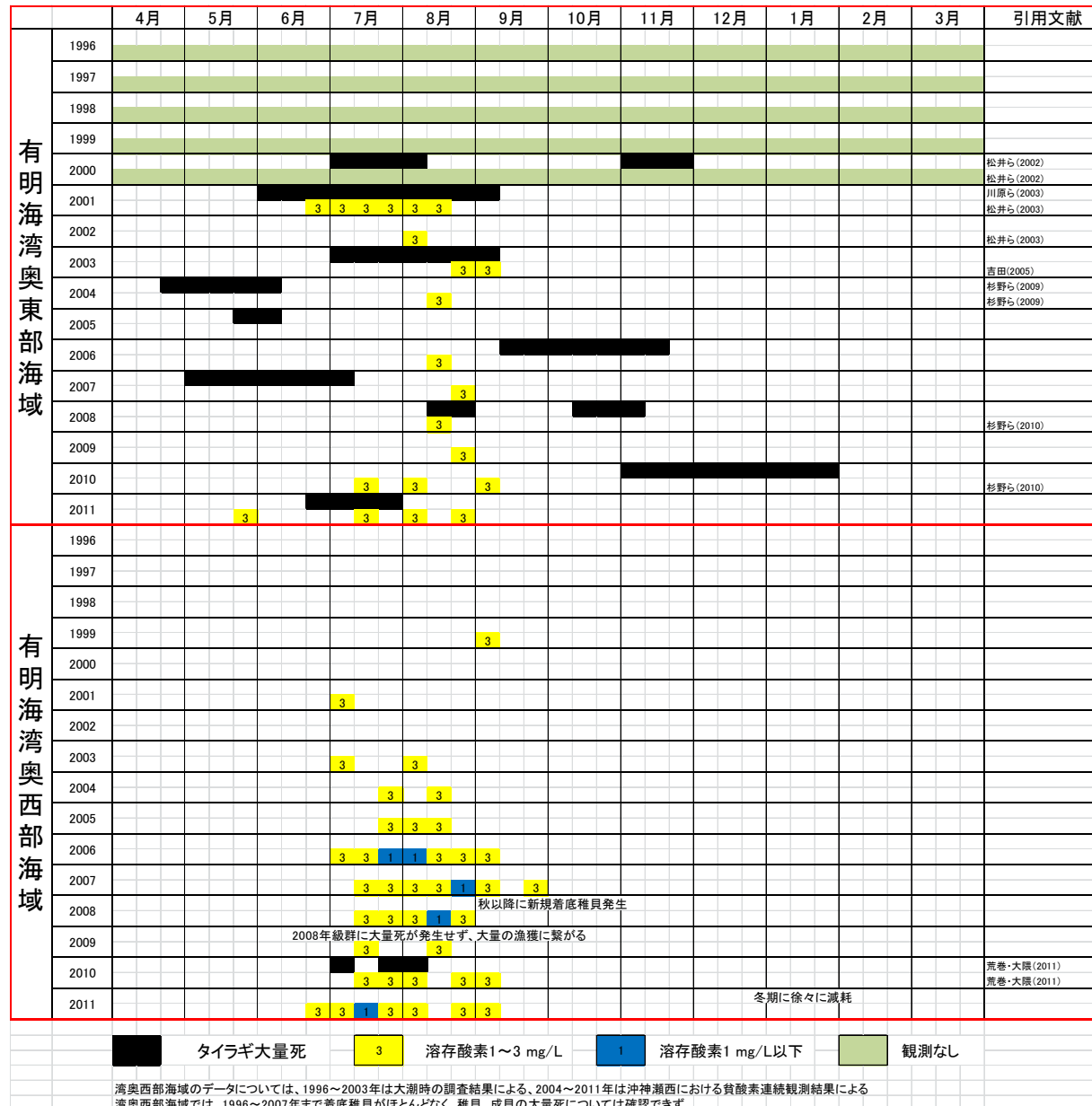
図 35 タイラギの生息量

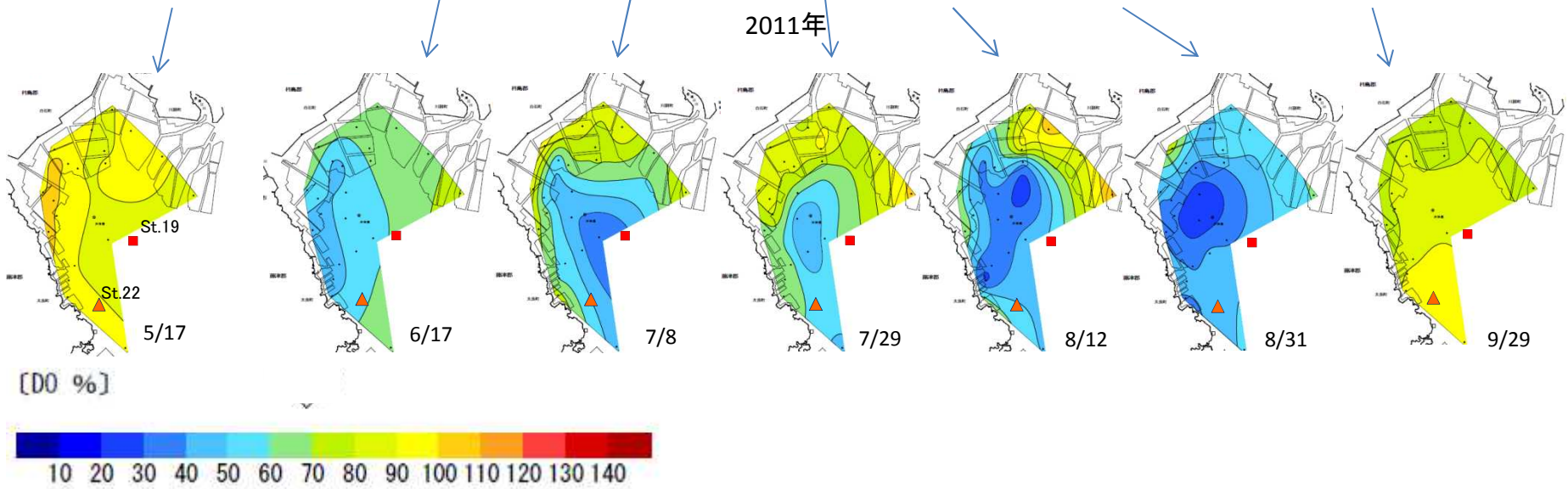
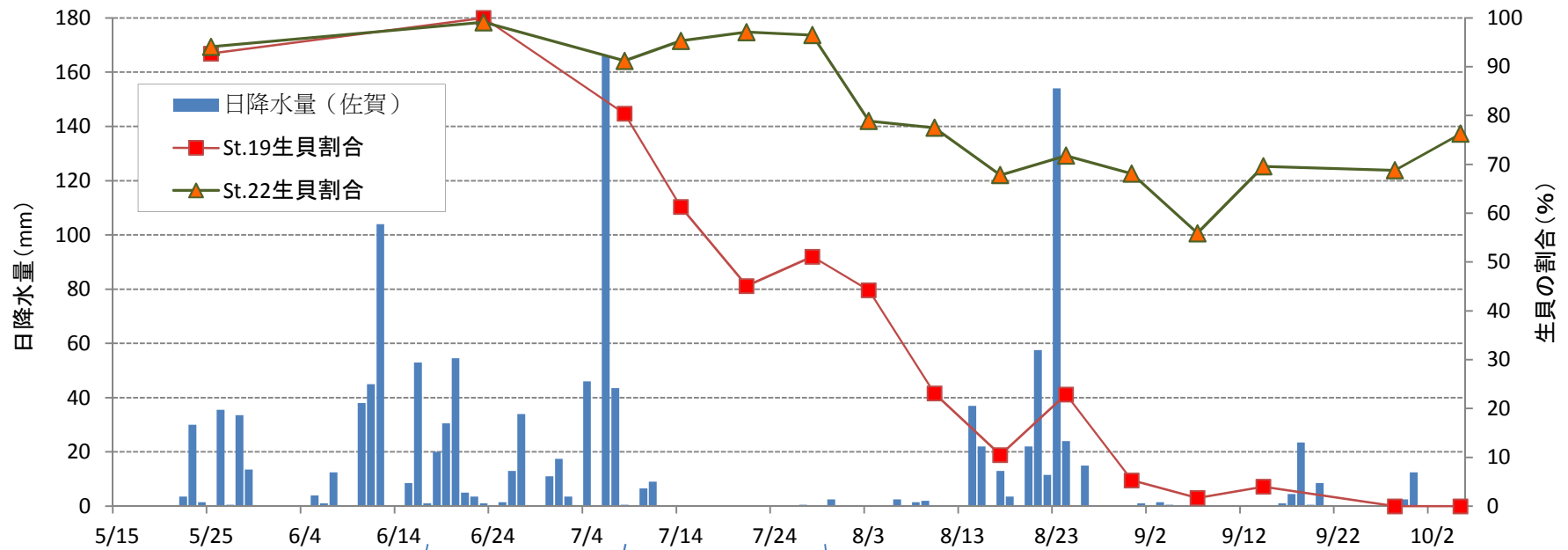
1970～80年代の漁獲が好調だった時代は、西部にも漁場が形成されていた



2009～2012年のタイラギ成員生息密度の水平分布

有明海奥部におけるタイラギ大量死と溶存酸素との関係





2010年有明海奥部西部海域におけるタイラギ生残率と降水量、溶存酸素等の推移

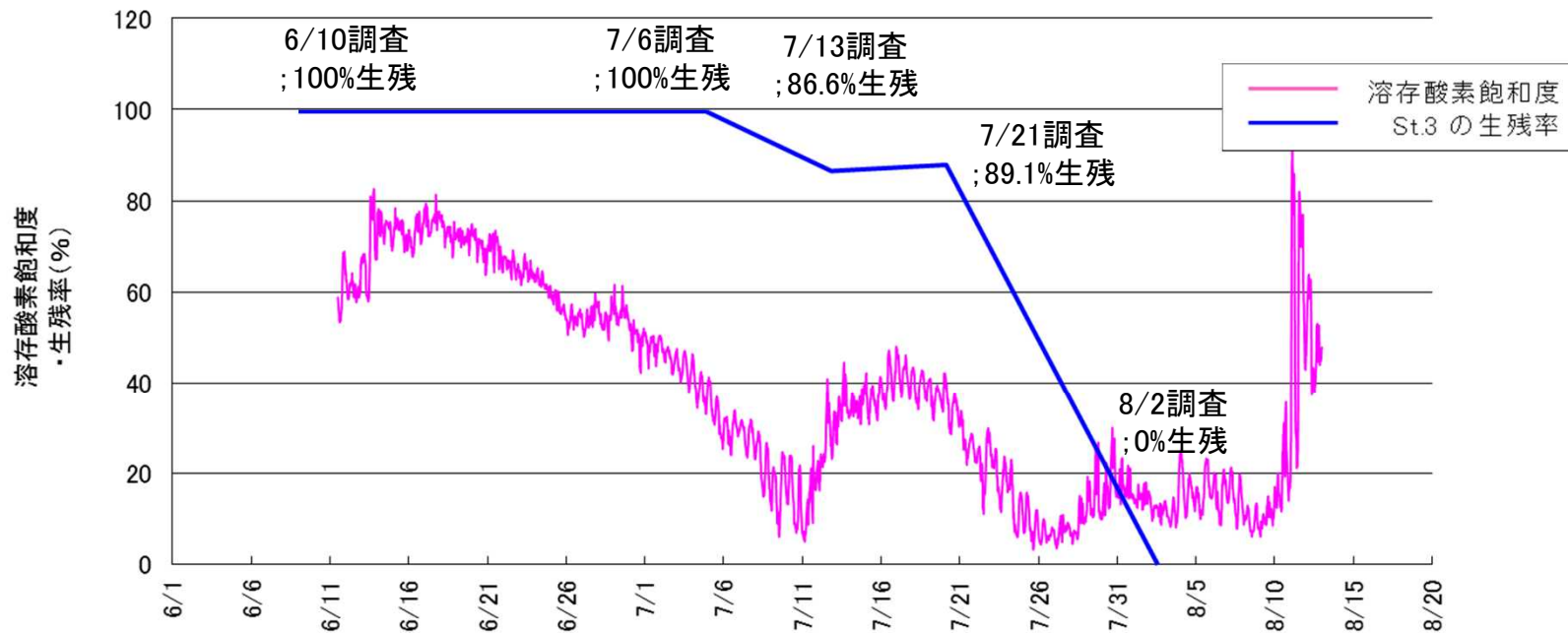


図3. 2010年沖神瀬西観測点(底層)の酸素飽和度※と佐賀県のタイラギモニタリングSt.3の生存率の推移

※西海区水産研究所データによる

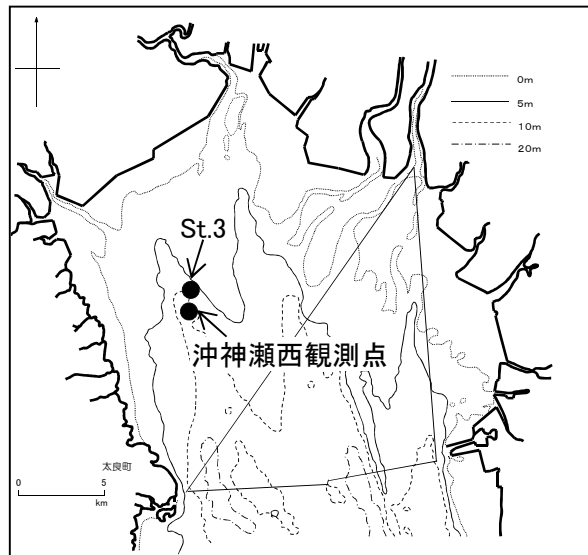


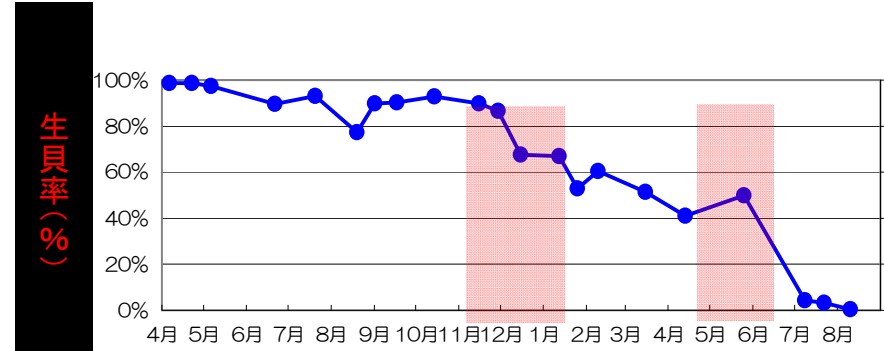
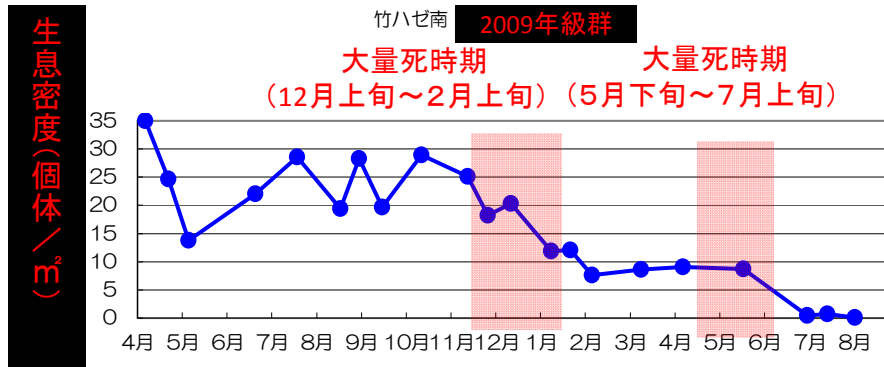
図4. タイラギモニタリングおよび底層DO調査地点図

2010年7月6日の調査時点で生存率100%であったSt.3のタイラギは、7月8日以降、酸素飽和度20%を下回る貧酸素の影響を数日間受け、まず、1割程度がへい死した。

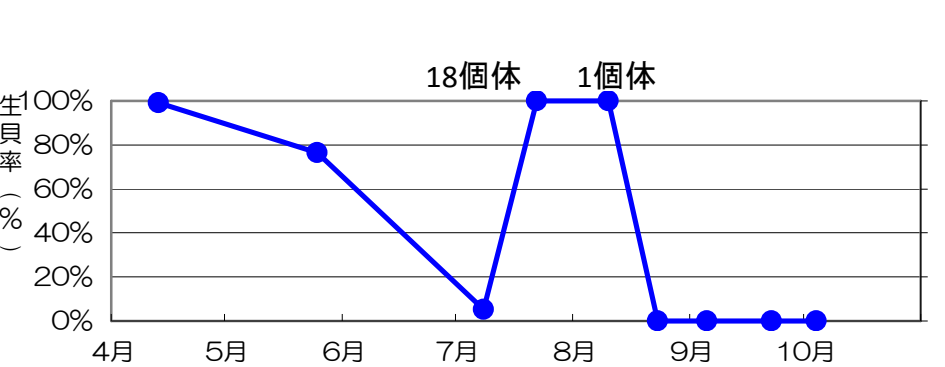
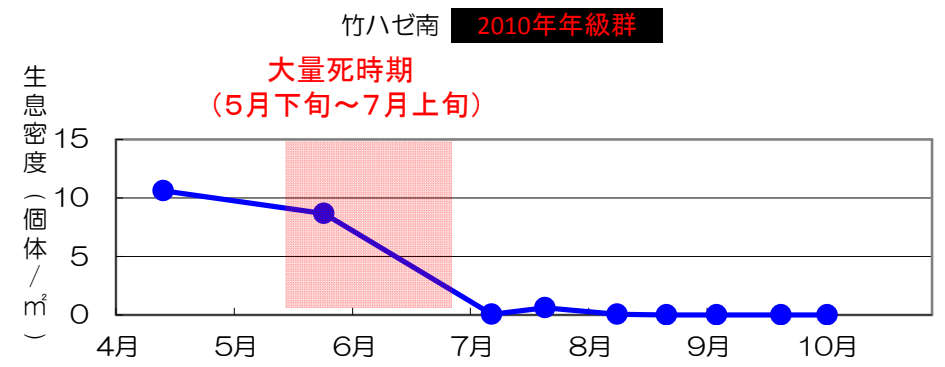
7月13日の調査から7月21日までは、溶存酸素濃度の上昇に伴い、一旦へい死が収まっていたが、その数日後、酸素飽和度が10%という著しい貧酸素状態となり、それが1週間近く続いたために、生存していたタイラギもほぼ全滅した。

タイラギ成貝は、酸素飽和度20%以下でのDO変動に曝された場合、へい死リスクが急激に高まる？ 12

2011年度のタイラギ生息状況と生貝率の変動(竹ハゼ南)



2009年級群

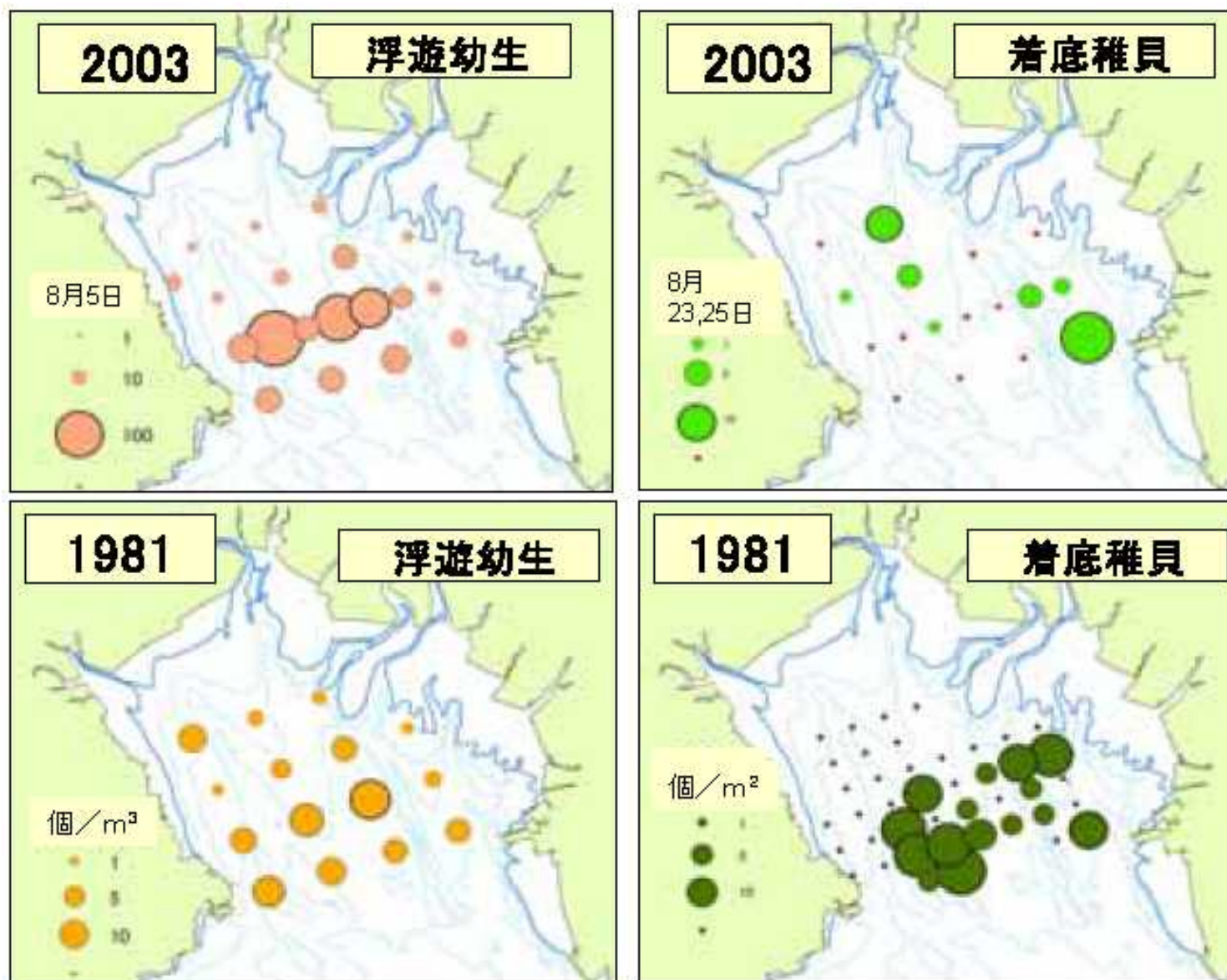


2010年級群

- ・ 2009年級群の生息密度は、漁期初めの12月上旬から2月上旬にかけて徐々に減少し、その後5月下旬までは安定して推移したが、7月上旬に激減した。
- ・ 2010年級群については、5月下旬までは、目立った大量死は確認できなかったが、7月上旬には、生息数が激減した。

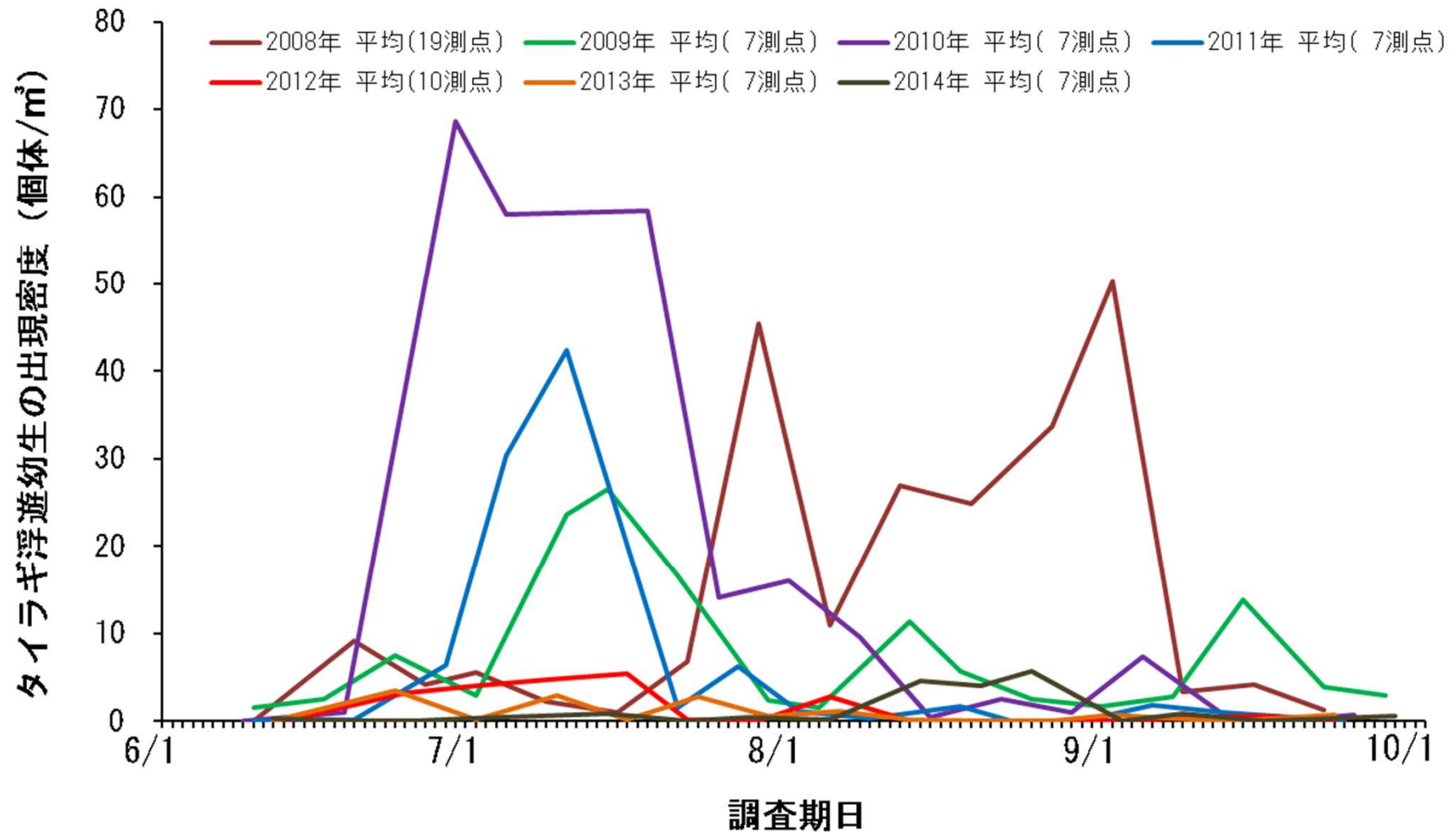
タイラギ浮遊幼生の調査結果

既往知見



平成18年委員会報告より

有明海湾奥におけるタイラギ浮遊幼生出現密度の経年変化 (2008年以降の調査結果)



2012年以降は浮遊幼生量激減

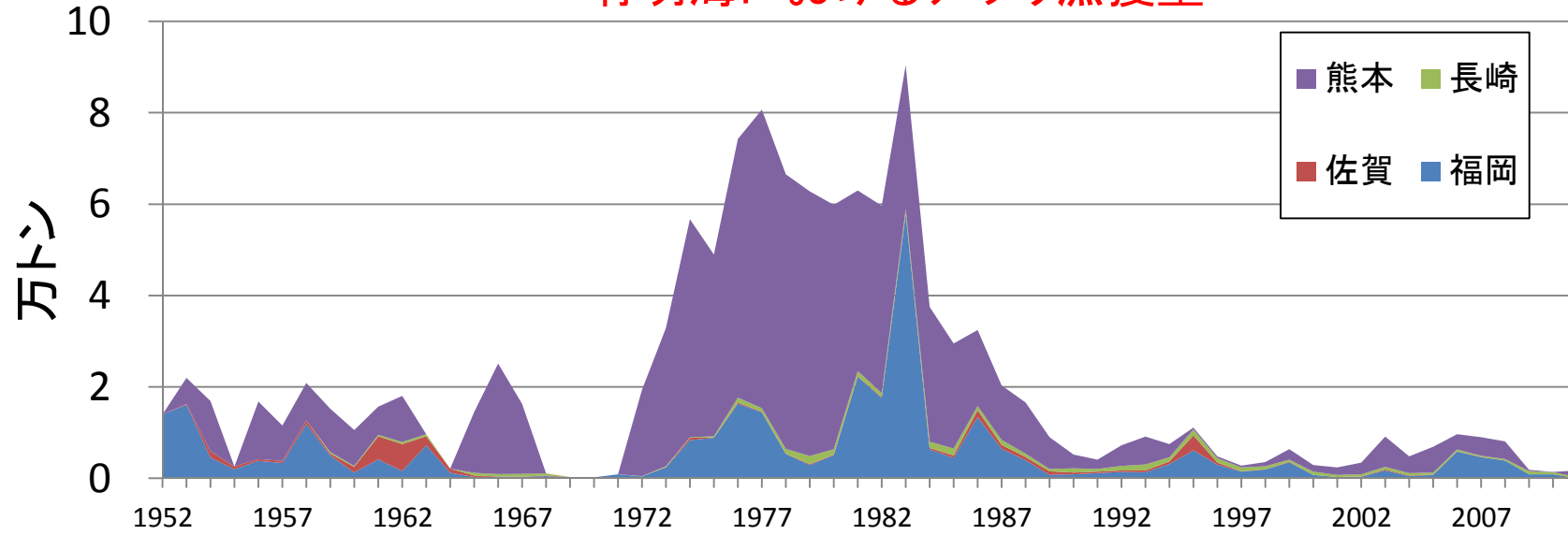
全国水産技術者協会提供資料

タイラギに関する概要

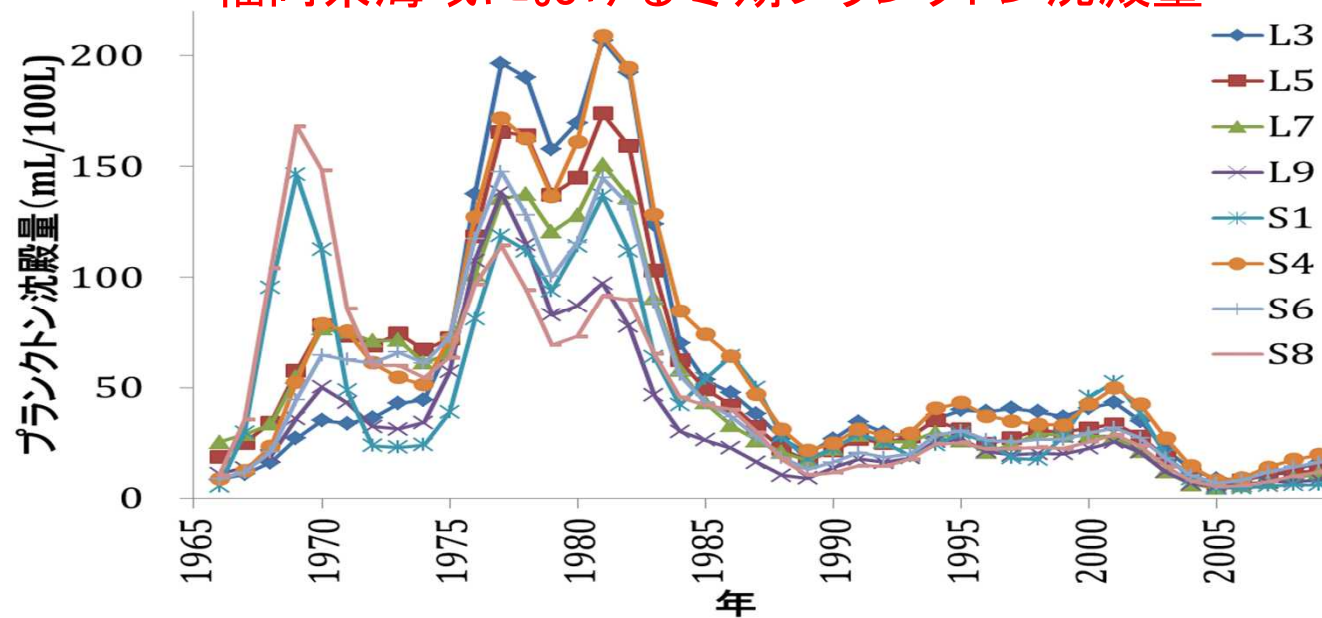
- ① 湾奥西部浅海域においては、貧酸素水塊の発達や低塩分によって、ほとんどの資源が消滅する現象が繰り返されている。
- ② 湾奥西部浅海域でのタイラギ大量死を引き起こす溶存酸素濃度は飽和度で20%以下である。
- ③ 湾奥東部浅海域に関して大量死が頻発しているが、貧酸素の発生は西部海域よりも軽微であり、因果関係は不明である。
- ④ 湾奥東部浅海域では、産卵期を中心とした立ち枯れへい死が最大の減耗要因であり、引き続き原因究明が必要。
- ⑤ 2010年以降、タイラギ浮遊幼生の高密度出現期間が短くなり、2012～2014年と連続して浮遊幼生の出現がほとんどなく、着底稚貝減少による資源の凋落減少が急速に顕在化している。¹⁶

② アサリ

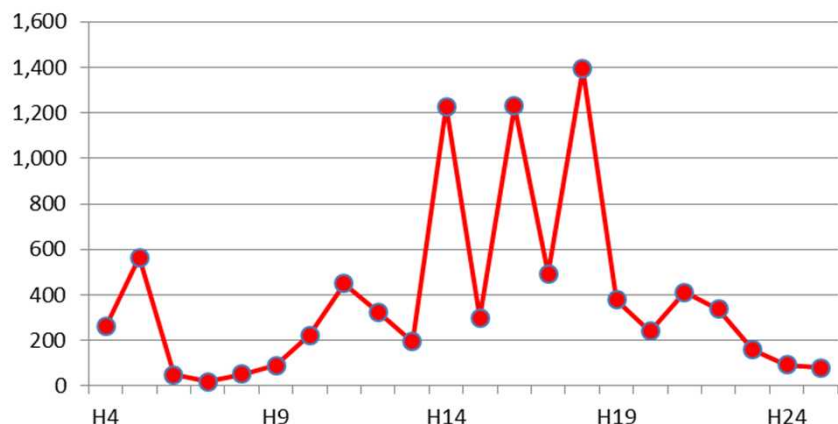
有明海におけるアサリ漁獲量



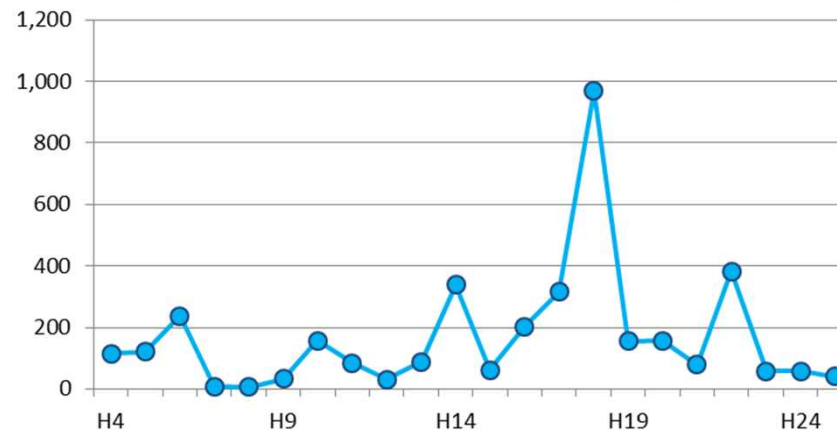
福岡県海域における冬期プランクトン沈殿量



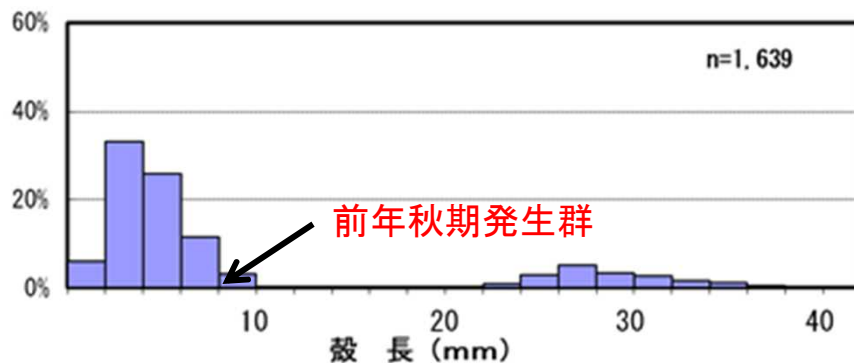
1. アサリの調査概要(緑川河口域)



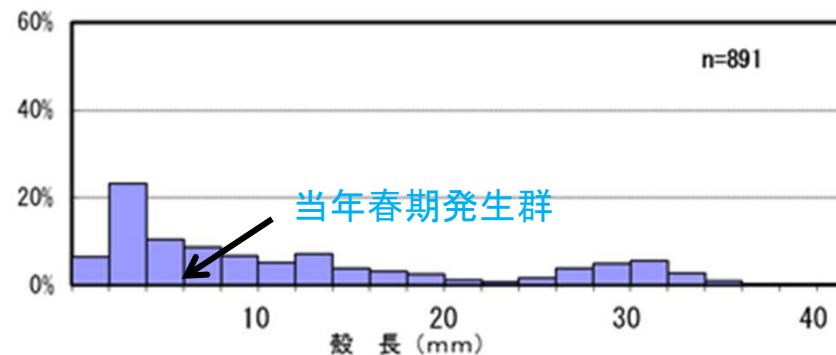
第1回調査アサリ平均生息密度の推移 (個/m²)



第2回調査アサリ平均生息密度の推移 (個/m²)



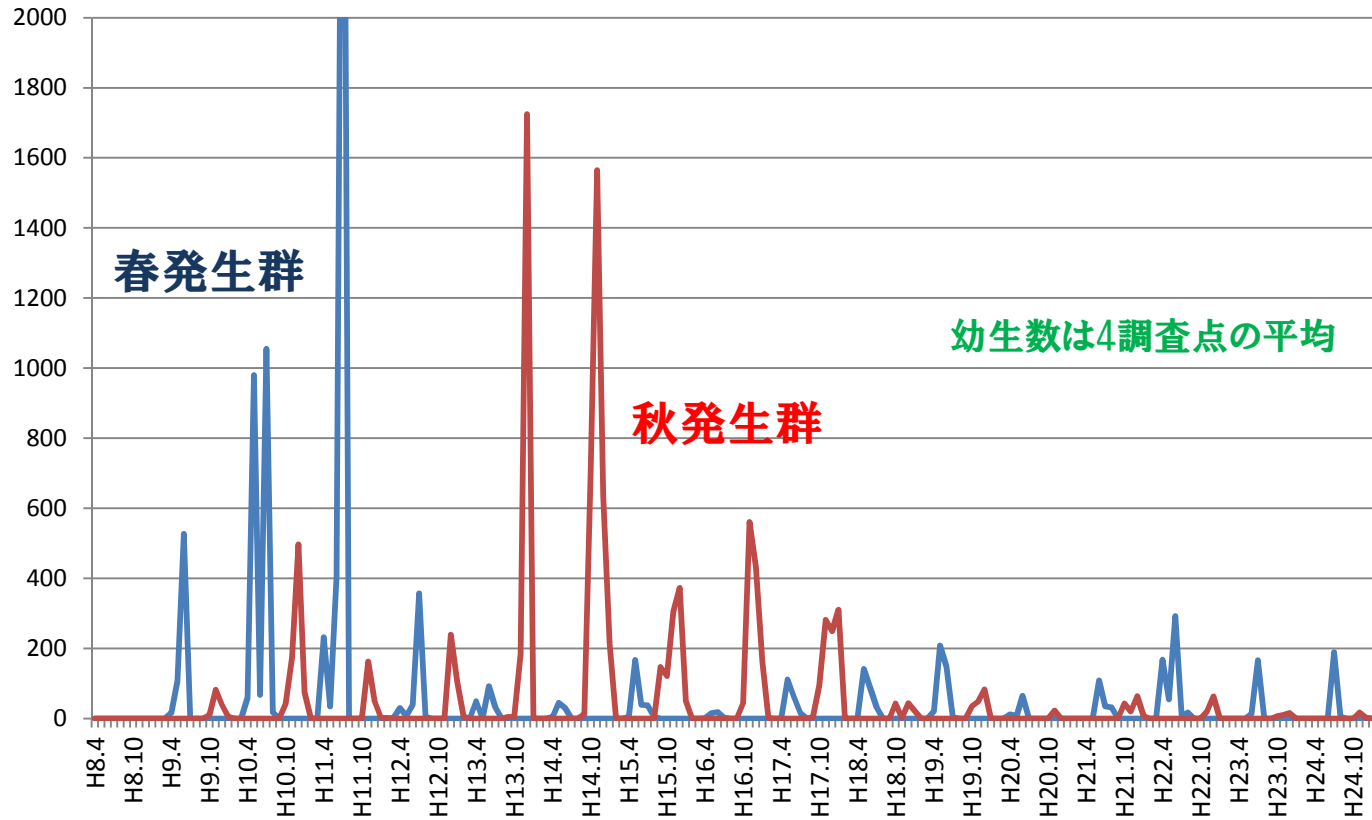
平成25年緑川河口域一斉調査第1回調査殻長組成



平成25年緑川河口域一斉調査第2回調査殻長組成

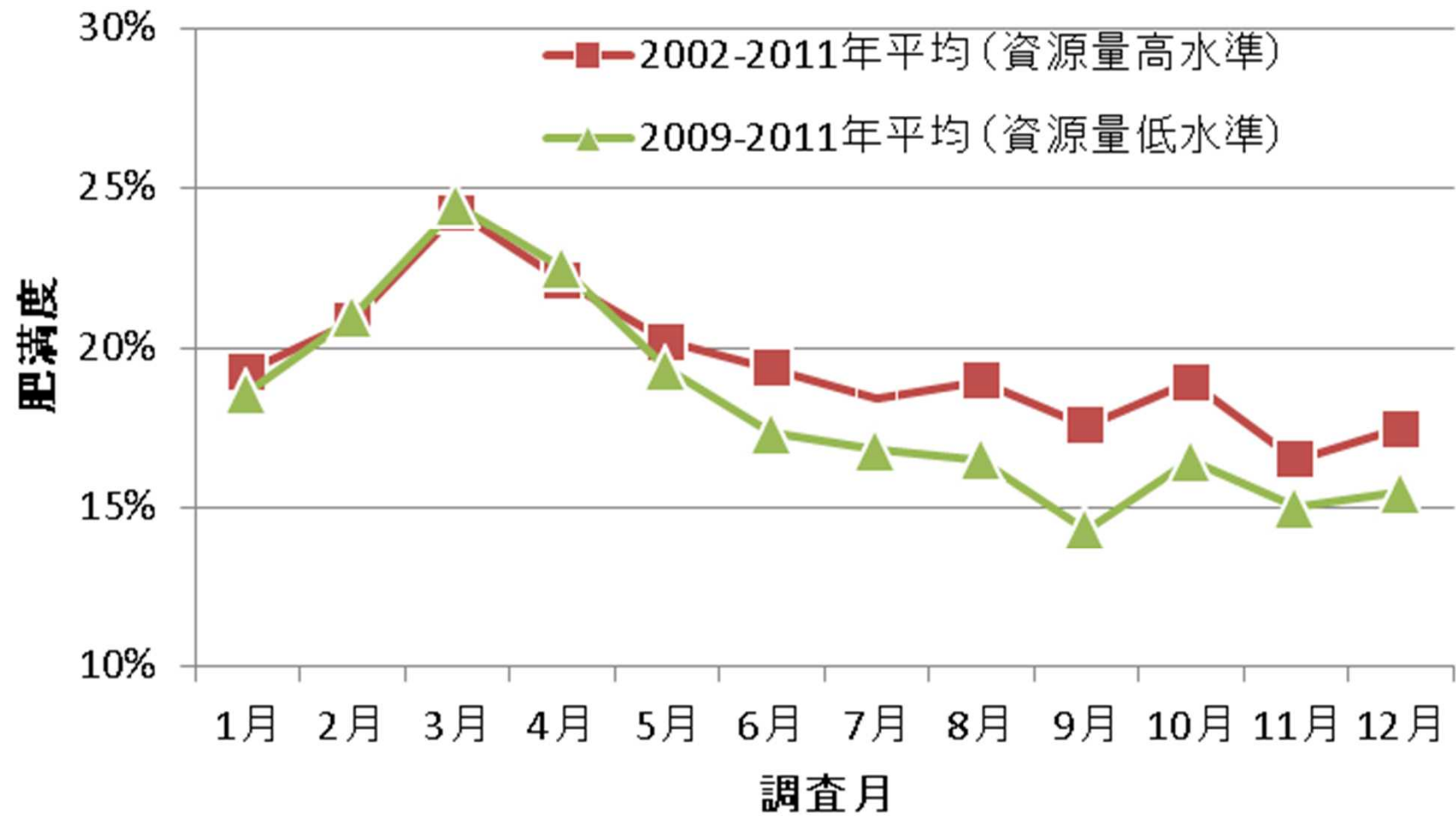
- 平成14年以降資源の回復傾向が見れたが、この時期は秋期発生群が資源増大に貢献していた。
- 近年は秋期発生群のみならず、春期発生群も低密度で、再生産サイクルの低下が顕在化している。

2. アサリの調査概要(浮遊幼生)



緑川河口域におけるアサリ浮遊幼生 (H8.4~H25.3)

- H24年のアサリの浮遊幼生の発生状況は、春期・秋期ともに依然低い状況。
- 特にアサリ資源増大に貢献する秋期の浮遊幼生発生量が非常に少ない。



熊本県緑川河口における月別アサリ肥満度の経年比較

■ アサリ浮遊幼生、着底稚貝に関する概要

- ① 有明海中部東部海域のアサリ資源は平成21年(2009年)以降に激減している。
- ② 資源の減少は稚貝の発生状況(特に秋期発生群)が低迷していることが主原因である。
- ③ 平成21年以降は、秋期発生群に影響すると思われる夏期のプランクトン沈殿量の低下とアサリ肥満度低下が顕著である。このことが、親貝の成熟度を低下させ、結果的に浮遊幼生の発生量、稚貝の発生量が低位で推移する原因となっていることが推定された。

有明海湾奥西部、東部、中部東部海域で餌環境の低下が示唆された。引き続きこれらが二枚貝資源変動に与える影響について検討が必要

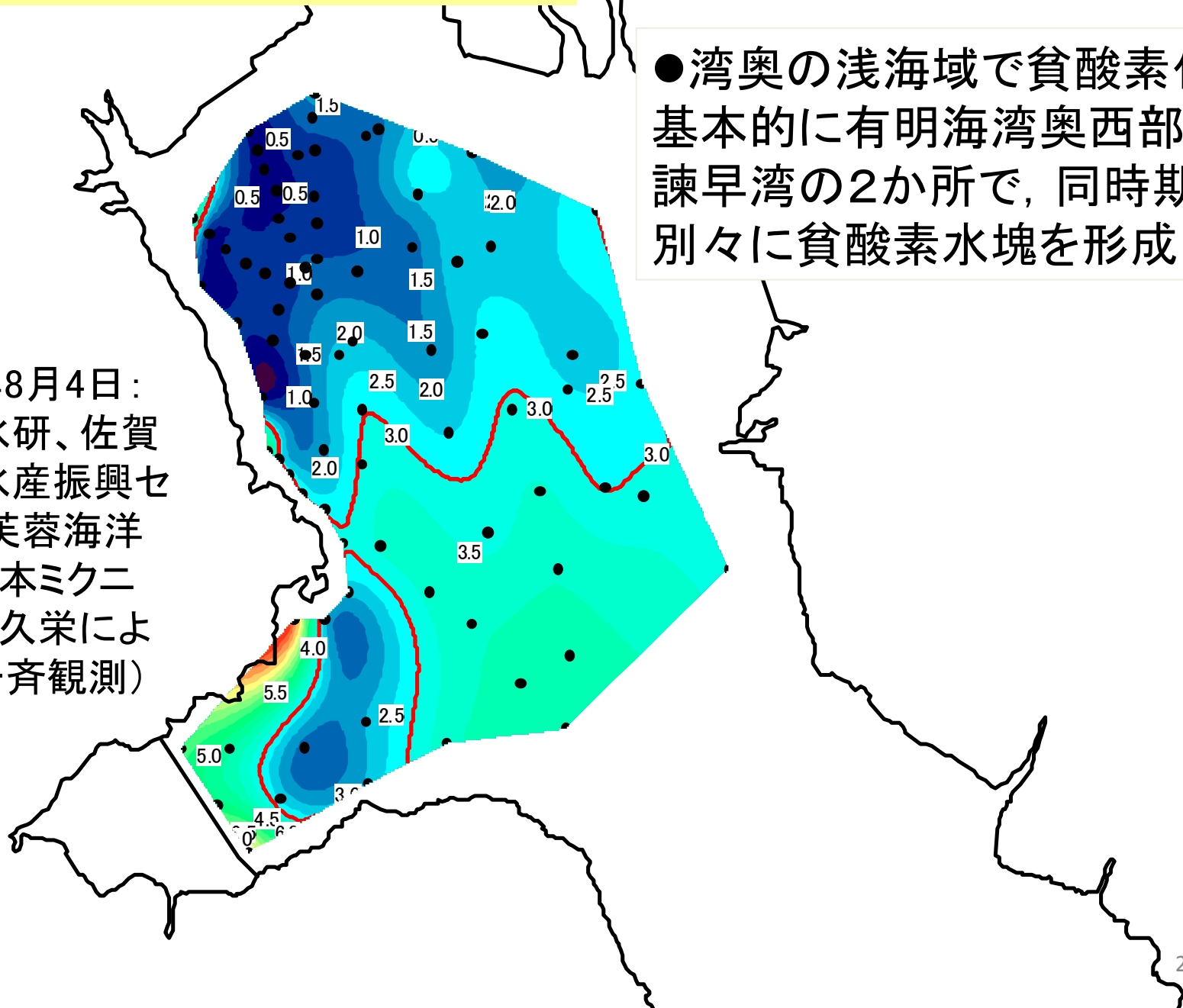
有明海における貧酸素水塊 -復習と補足-

有明海における貧酸素水塊の分布

底層溶存酸素 (mg/L)

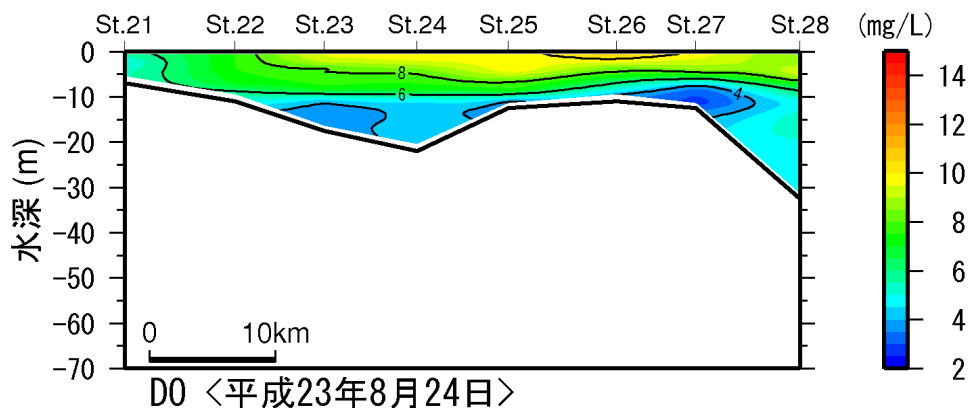
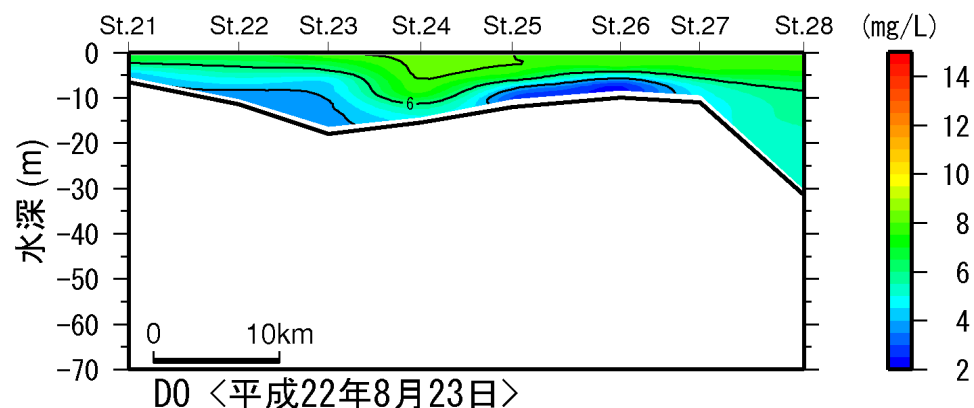
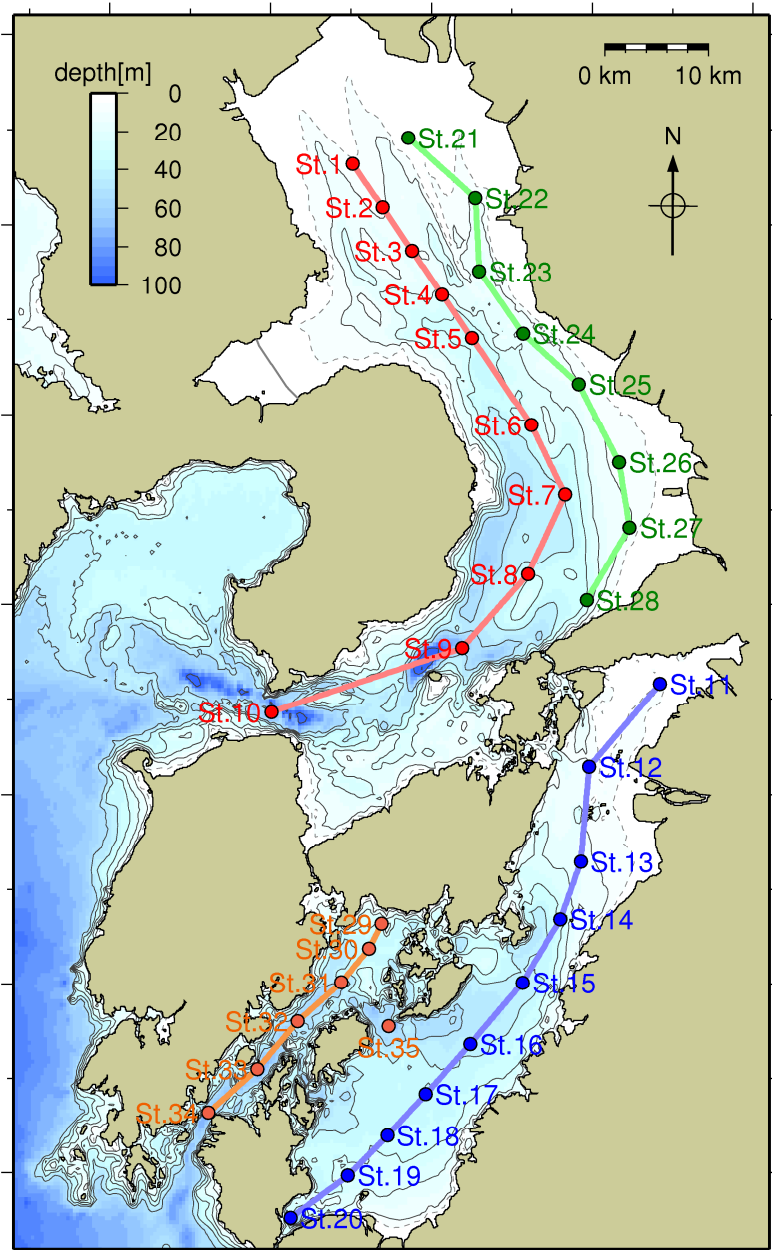
● 湾奥の浅海域で貧酸素化
基本的に有明海湾奥西部と
諫早湾の2か所で、同時期に
別々に貧酸素水塊を形成.

(2010年8月4日:
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)



貧酸素水塊発生情報補足

(国交省調査)



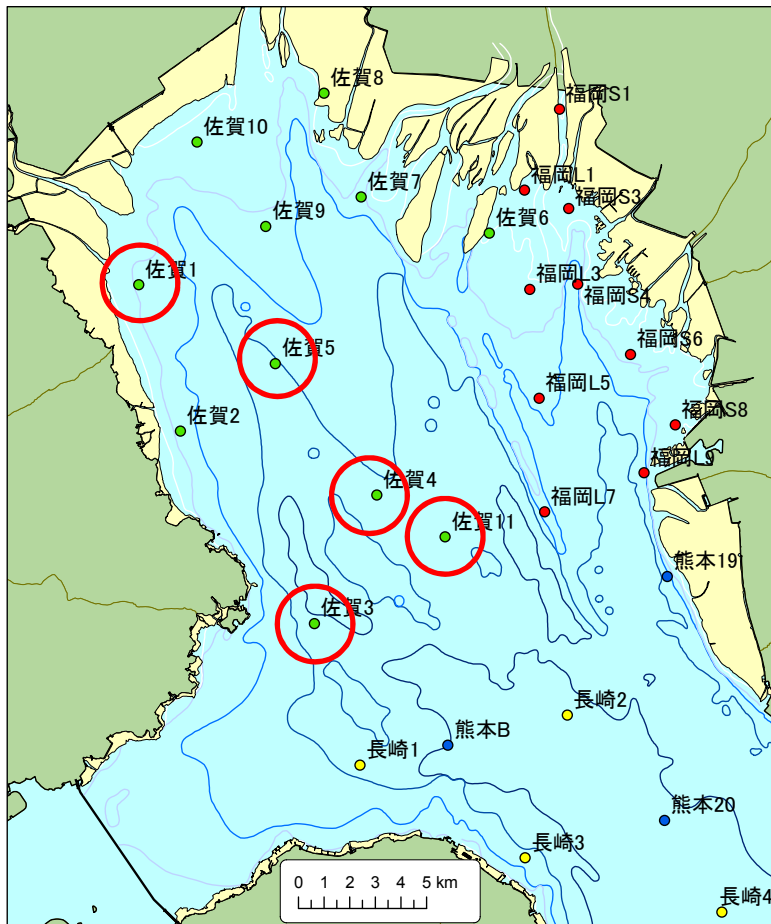
熊本市沖に貧酸素水塊出現

(平成22, 23年度海洋環境整備船「海輝」、「海煌」年次報告書)²⁵

長期的なDOの経年変動に関する既存知見

基礎データ: 有明海奥部における浅海定線調査

(新月(朔)の大潮満潮時に観測、底層は海底上1m層の採水)

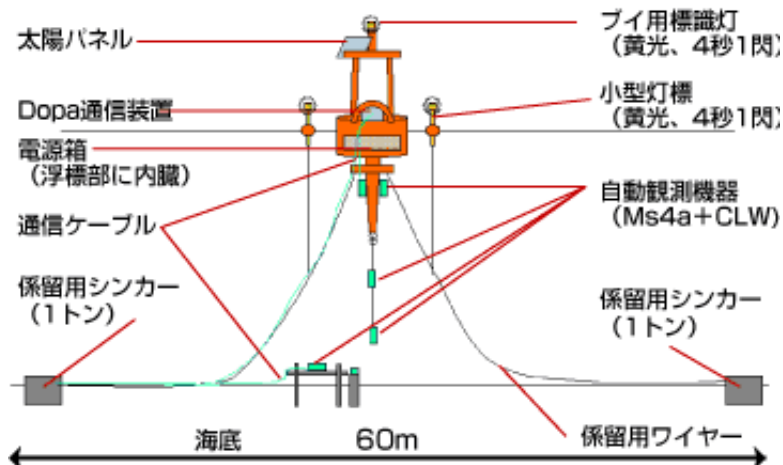
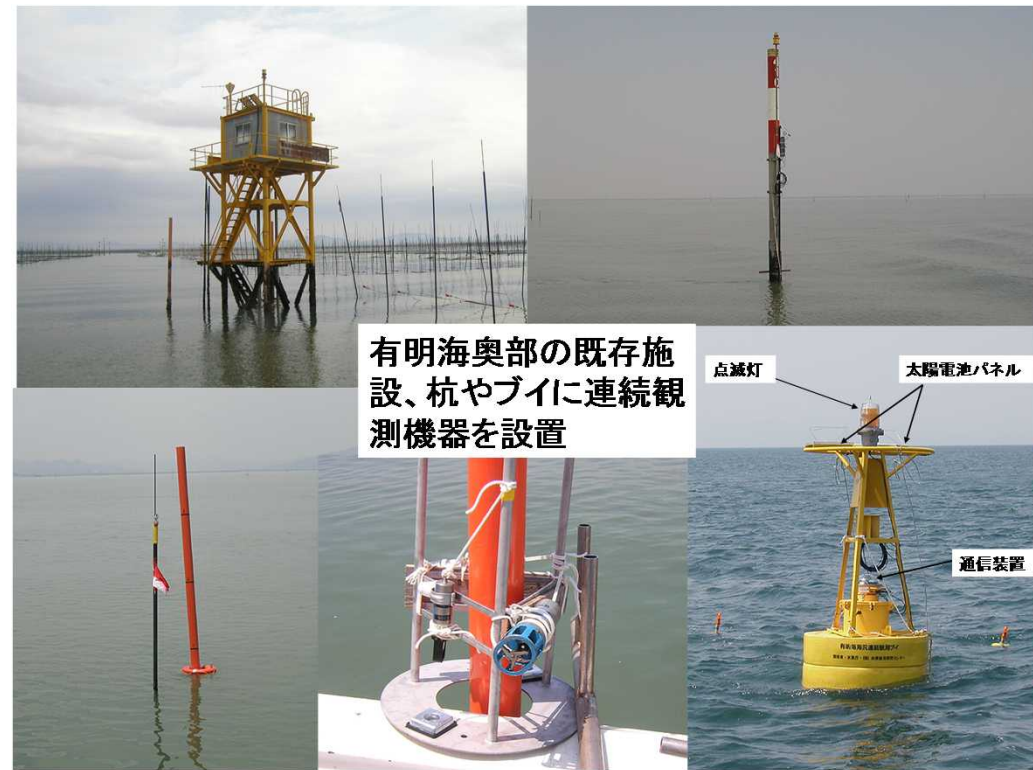
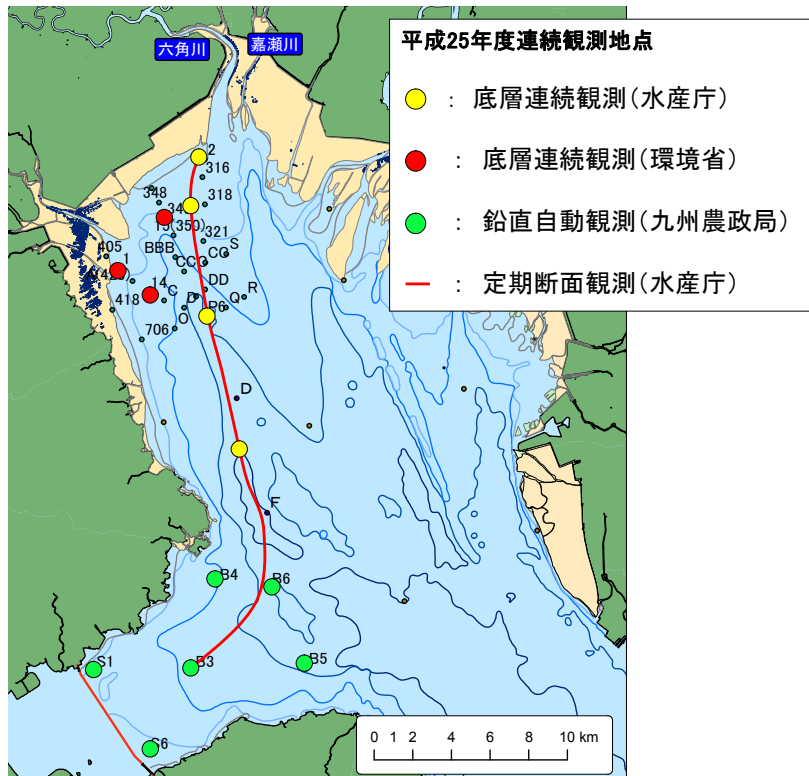


有明海奥部の浅海定線調査地点

- 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)
- 1972年～2001年7月のデータから、同じ成層強度ではDOは低下傾向(観測点1で最も有意)(速水ら, 2006)
- 1972年～2012年のデータから、佐賀県海域では、7～9月の表底層の差が年によって顕著で、Stn3～5、11では、7、8月の値が低下する傾向(佐賀県有明水産振興センター, 2013)
- 湾奥東部の福岡県海域では特段の傾向はない。

底層溶存酸素濃度の経年変動の観測

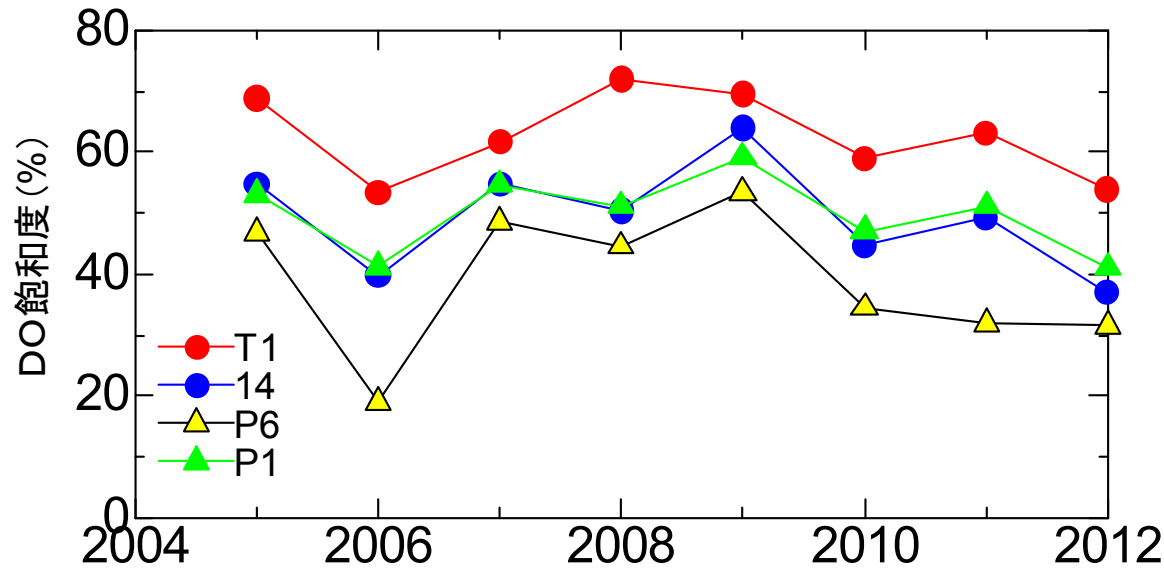
西海区水産研究所貧酸素水塊連続自動観測(2004年～)



海底上0.2m:水深、水温、塩分、溶存酸素、クロロフィル、濁度、流向流速を10分間隔で計測(九州農政局は1時間に1回)

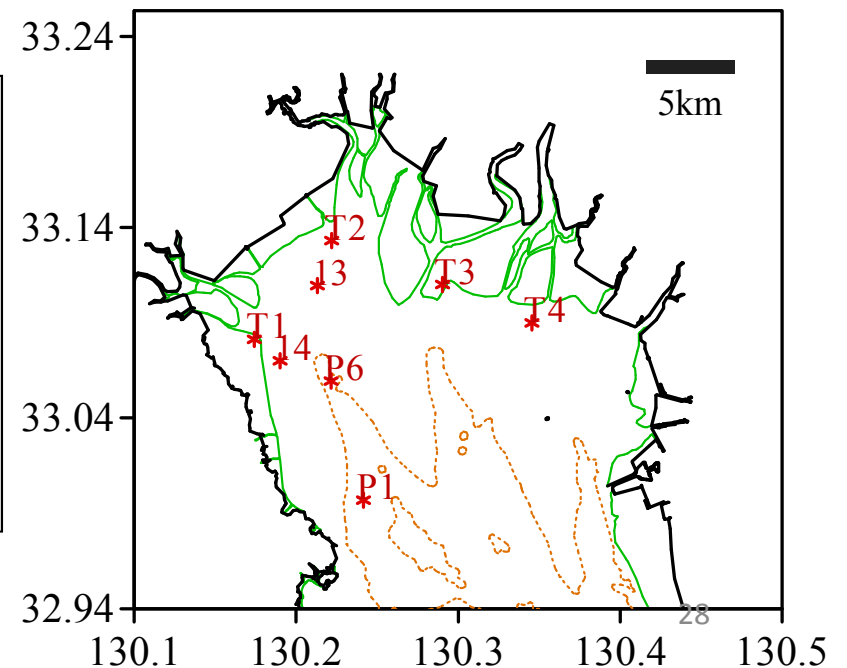
主要な観測地点のデータはメールにより西海区水産研究所へ送信,リアルタイム公表.
各観測点では1週間に1回以上の頻度で各項目の鉛直観測を実施

平均溶存酸素飽和度の経年変化

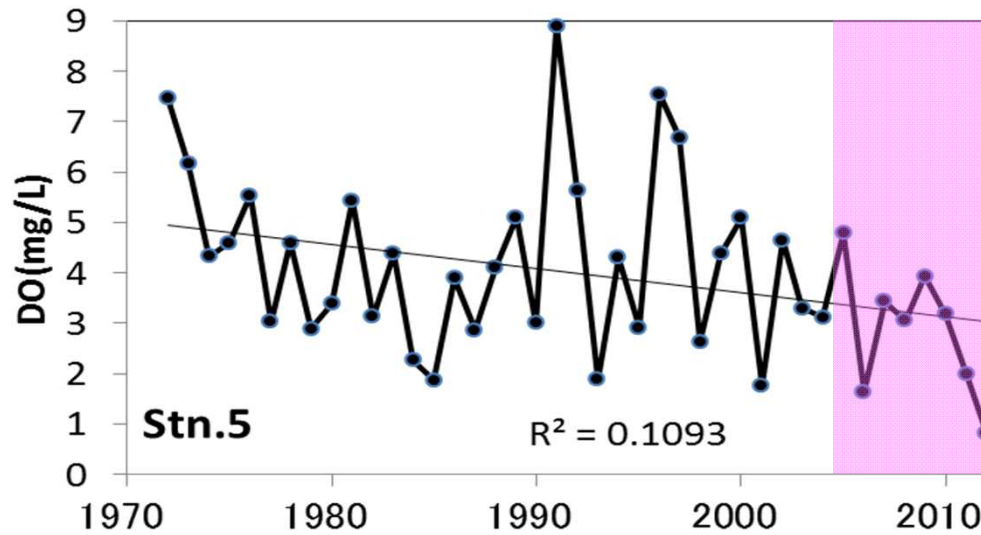


7~9月の底層溶存酸素濃度平均値

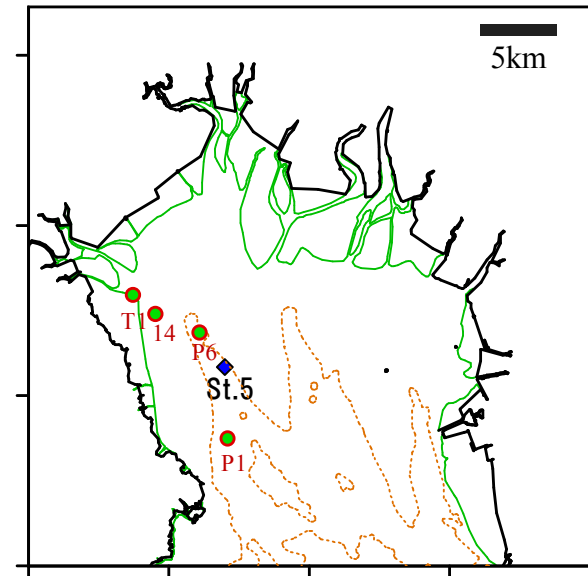
平均溶存酸素濃度はP6で低い。
2006・2012年は特に平均飽和度が低い→密度成層の長期継続により、貧酸素の継続時間が長く、貧酸素化が進行したことによる。



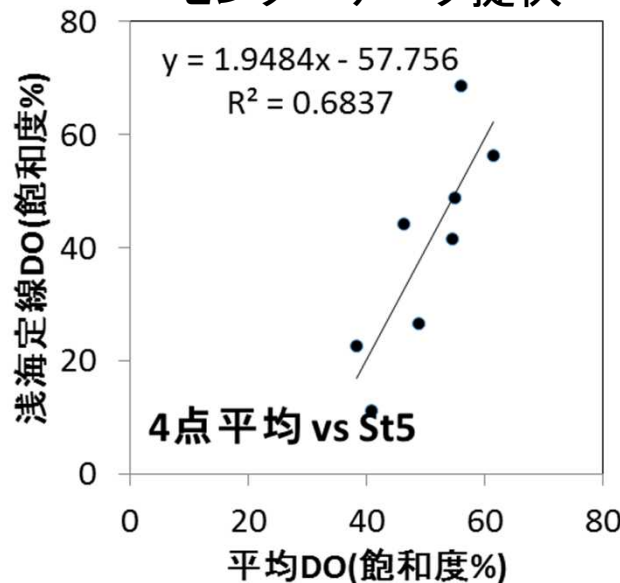
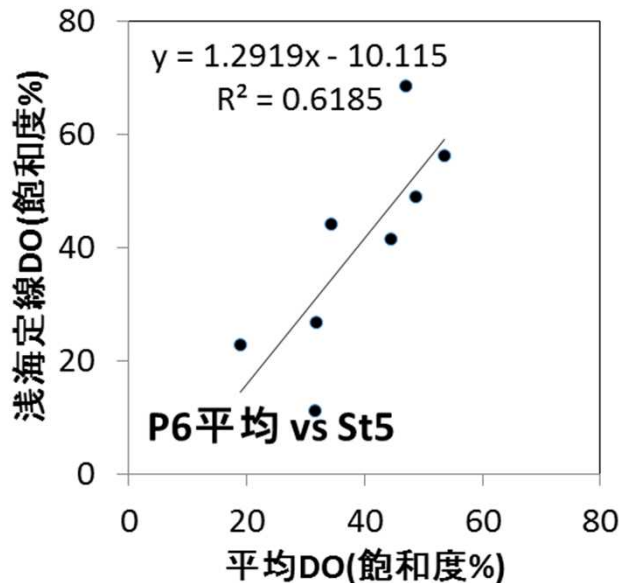
浅海定線データと連続観測の比較



● 西水研係留 ◆ 佐賀県浅海定線



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



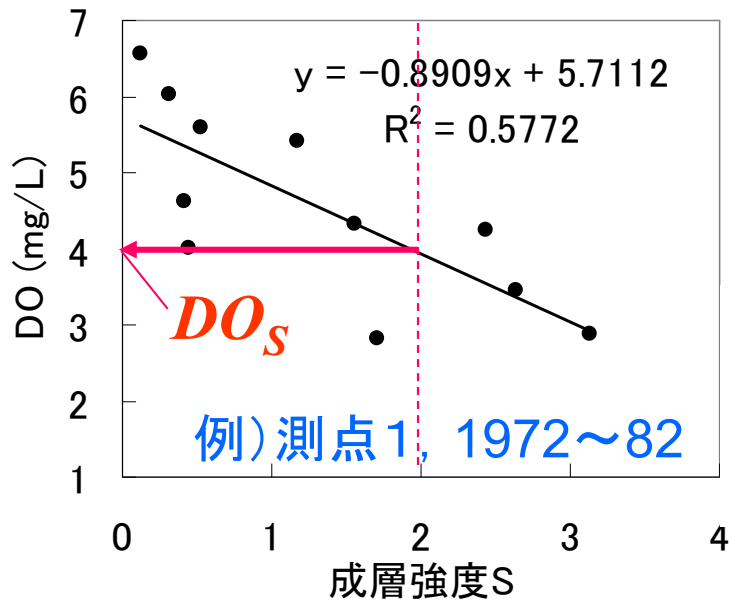
浅海定線データは大潮時のデータのために、浅海域は鉛直混合しており比較できない。

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。

浅海定線調査データの解析

成層強度の影響を除いた底層DO変動



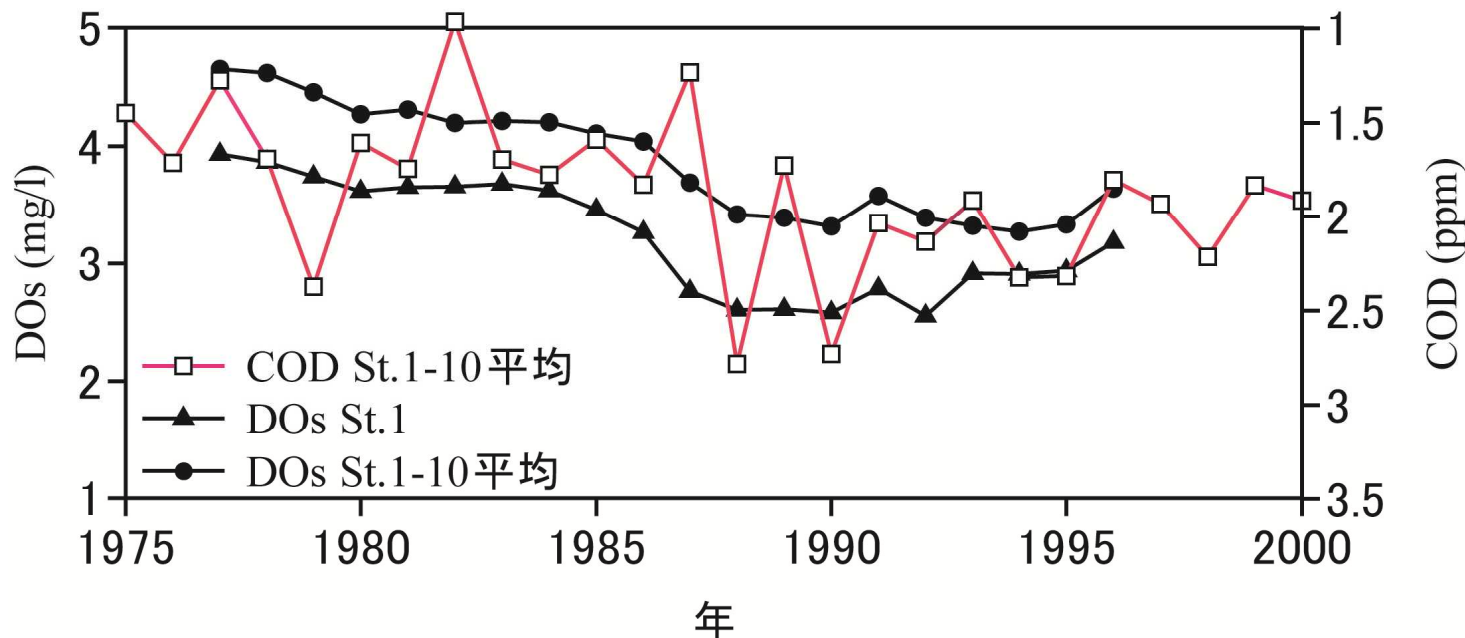
成層強度の影響を除外すると、過去30年間で有明海奥部の7月の底層DOは低下傾向にある。

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？



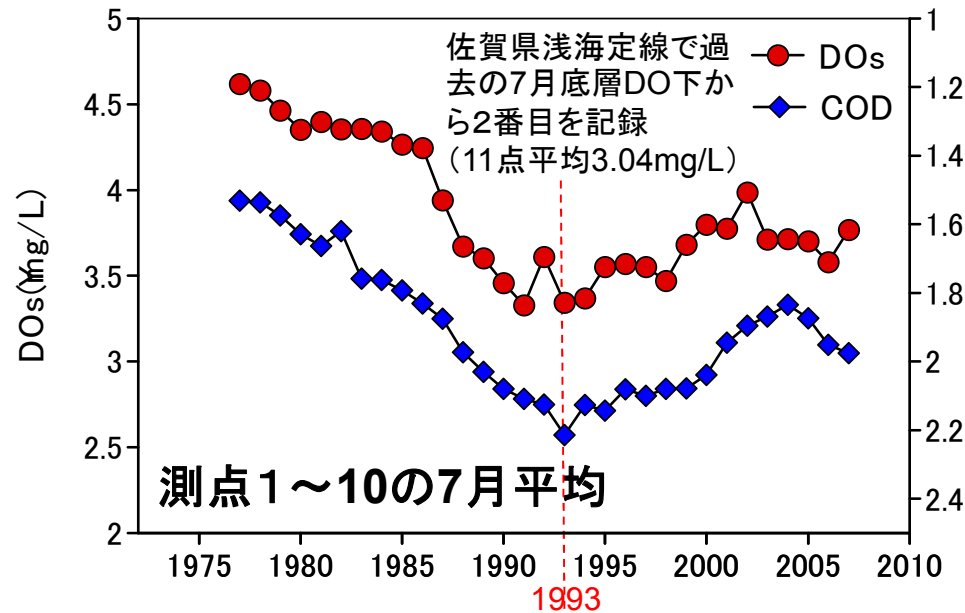
(速水ら, 2006;
速水, 2007)

浅海定線調査データの解析 (2012年度までのデータ解析)

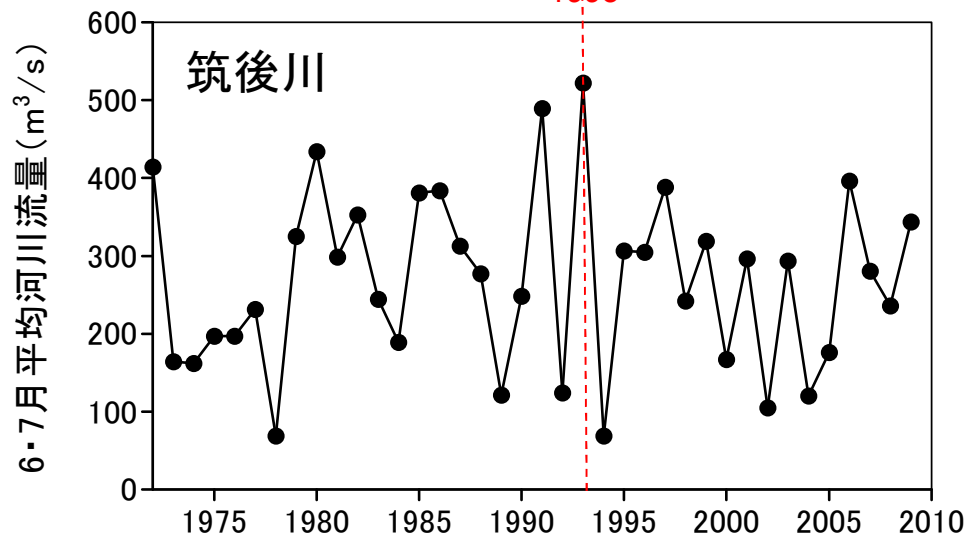
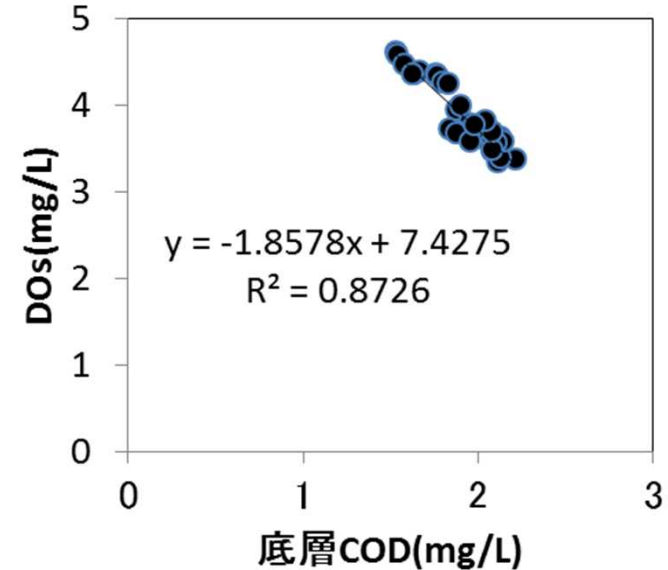
佐賀県有明水産振興
センターデータ提供

DOs vs COD

(底層 11年移動平均)



底層COD (mg/L)
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³¹

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.

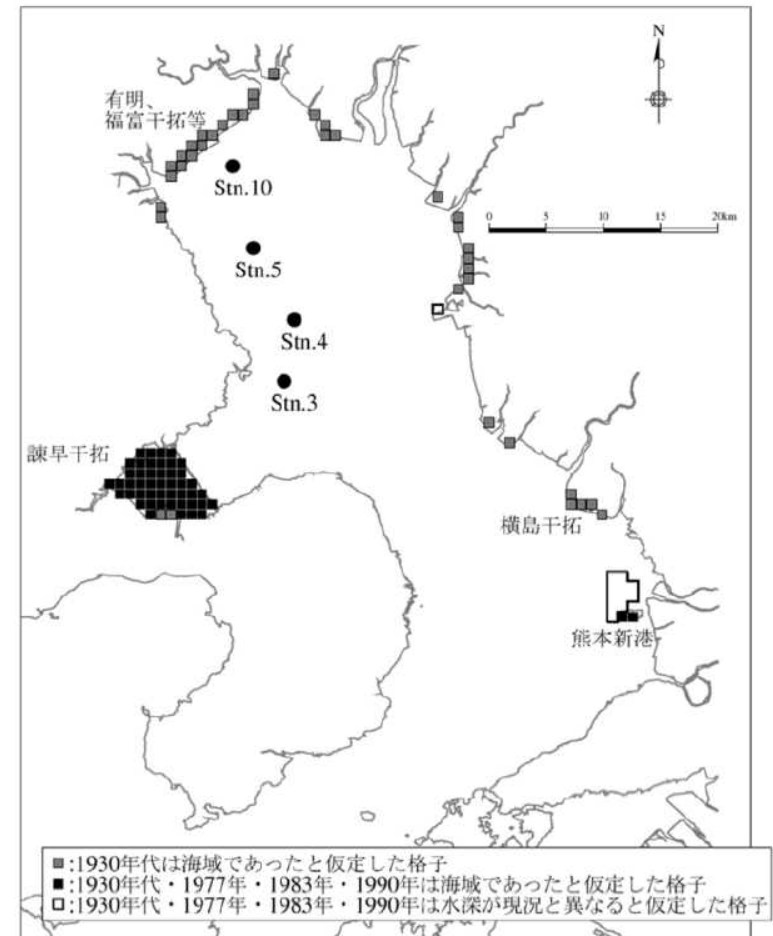
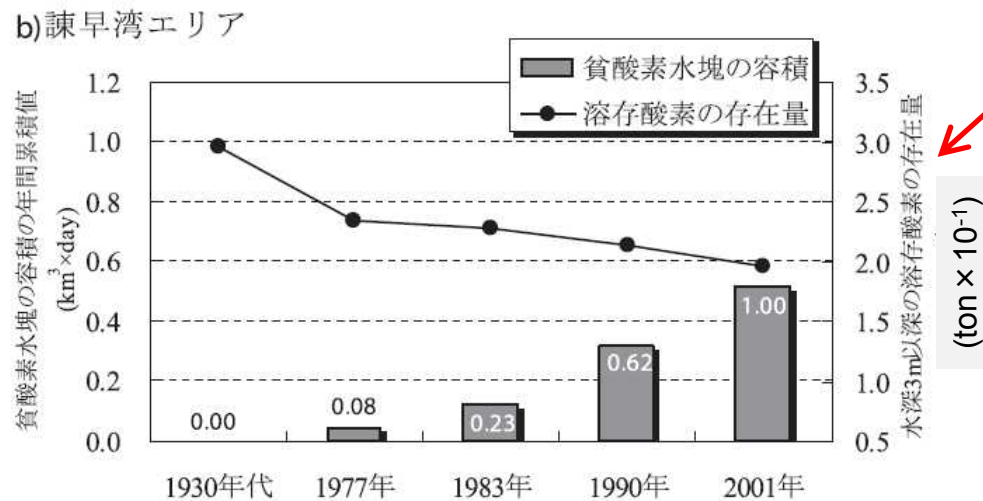
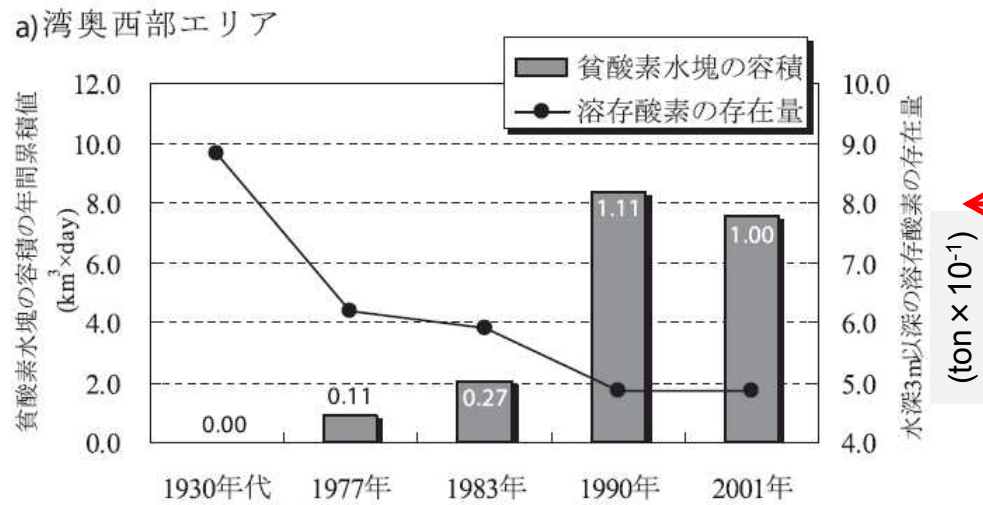


図-2 各年代の地形条件の設定方法³²

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。

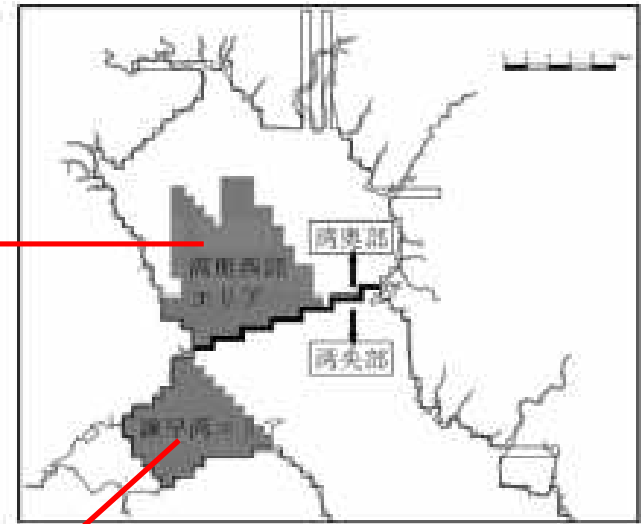


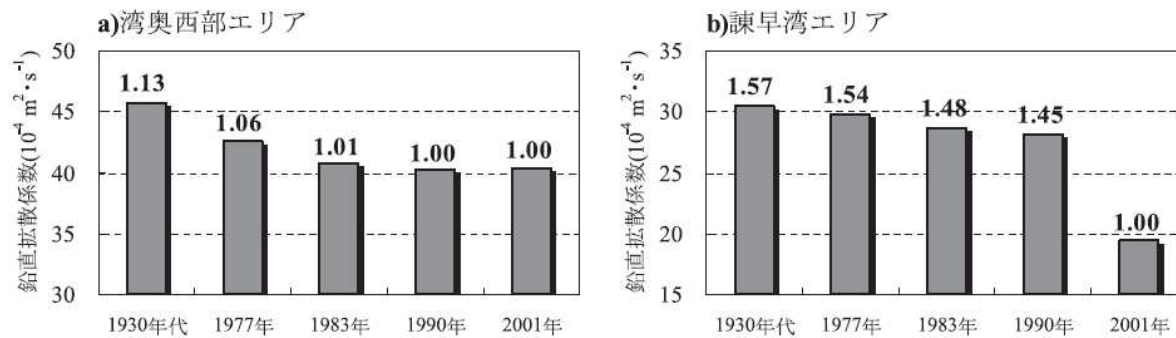
図-3 計算結果の整理場所

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

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

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)

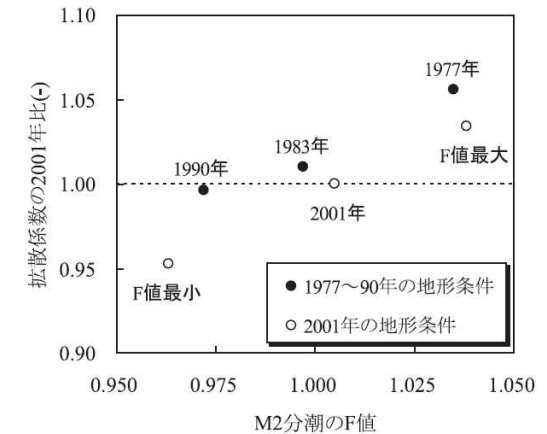
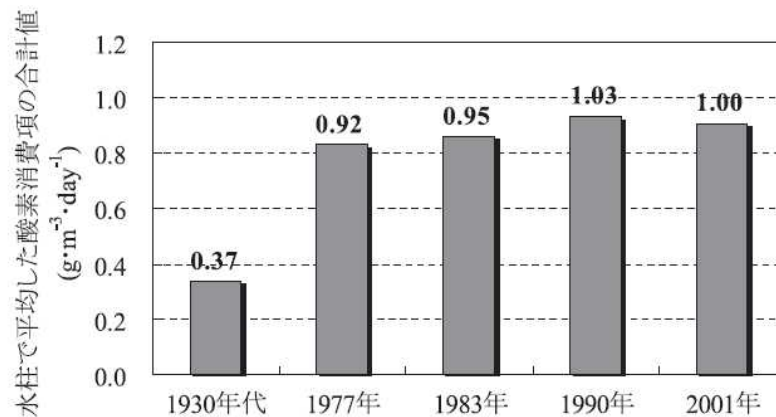


図-7 湾奥西部エリアにおけるF値の変化と水中で平均した鉛直拡散係数

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。

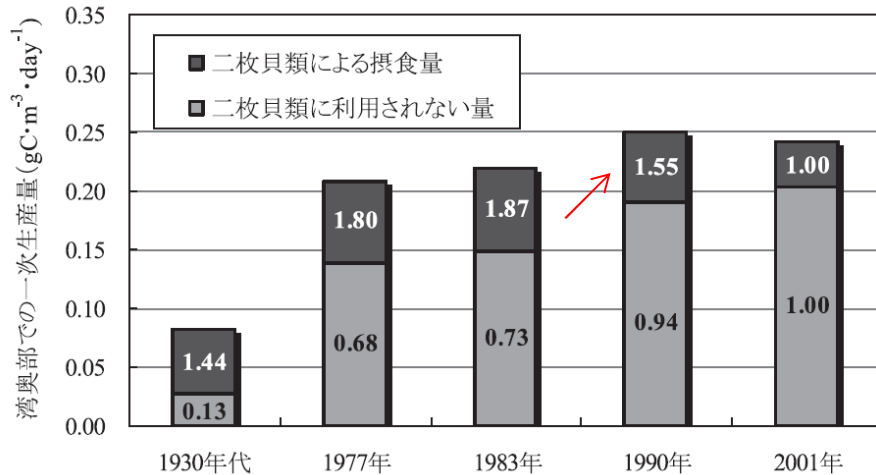
図-8 湾奥部西部エリアにおける水柱での全酸素消費量の比較 (8月平均値)

1930年代の酸素消費量は現状の半分以下。
1977年以降では、1990年代にかけて水柱での酸素消費量は増大した。

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。

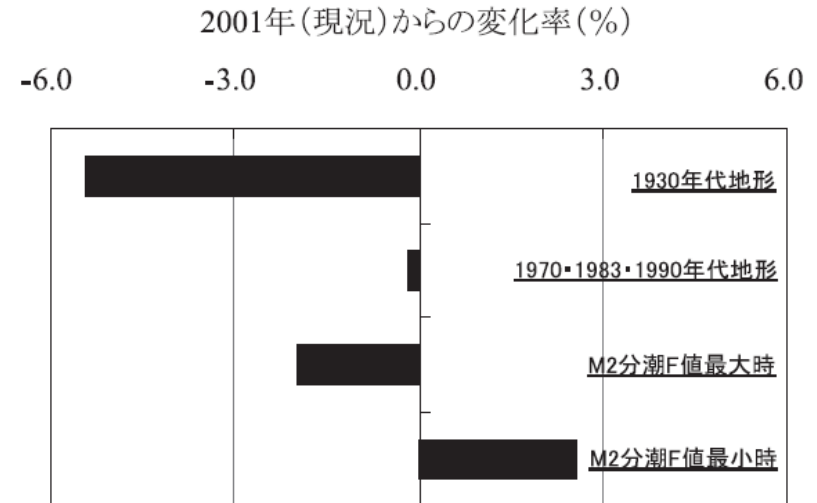


図-11 二枚貝類に利用されない湾奥部一次生産量の変化 (8月平均値)

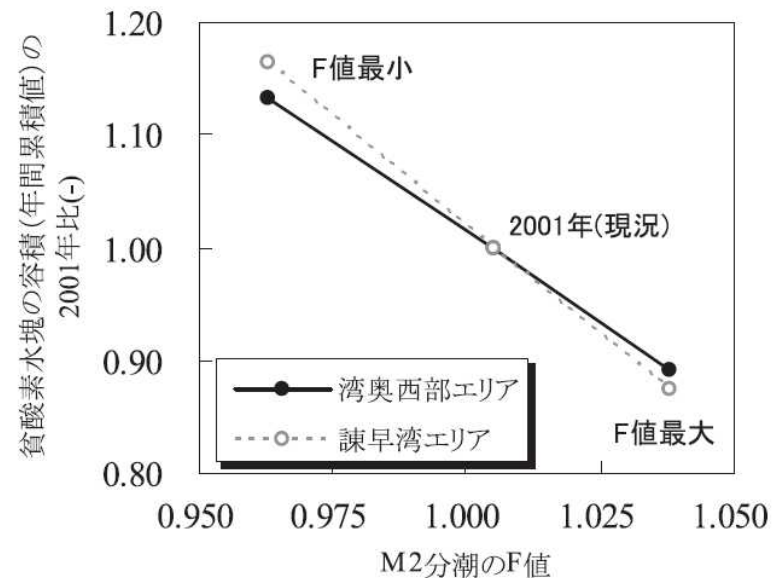
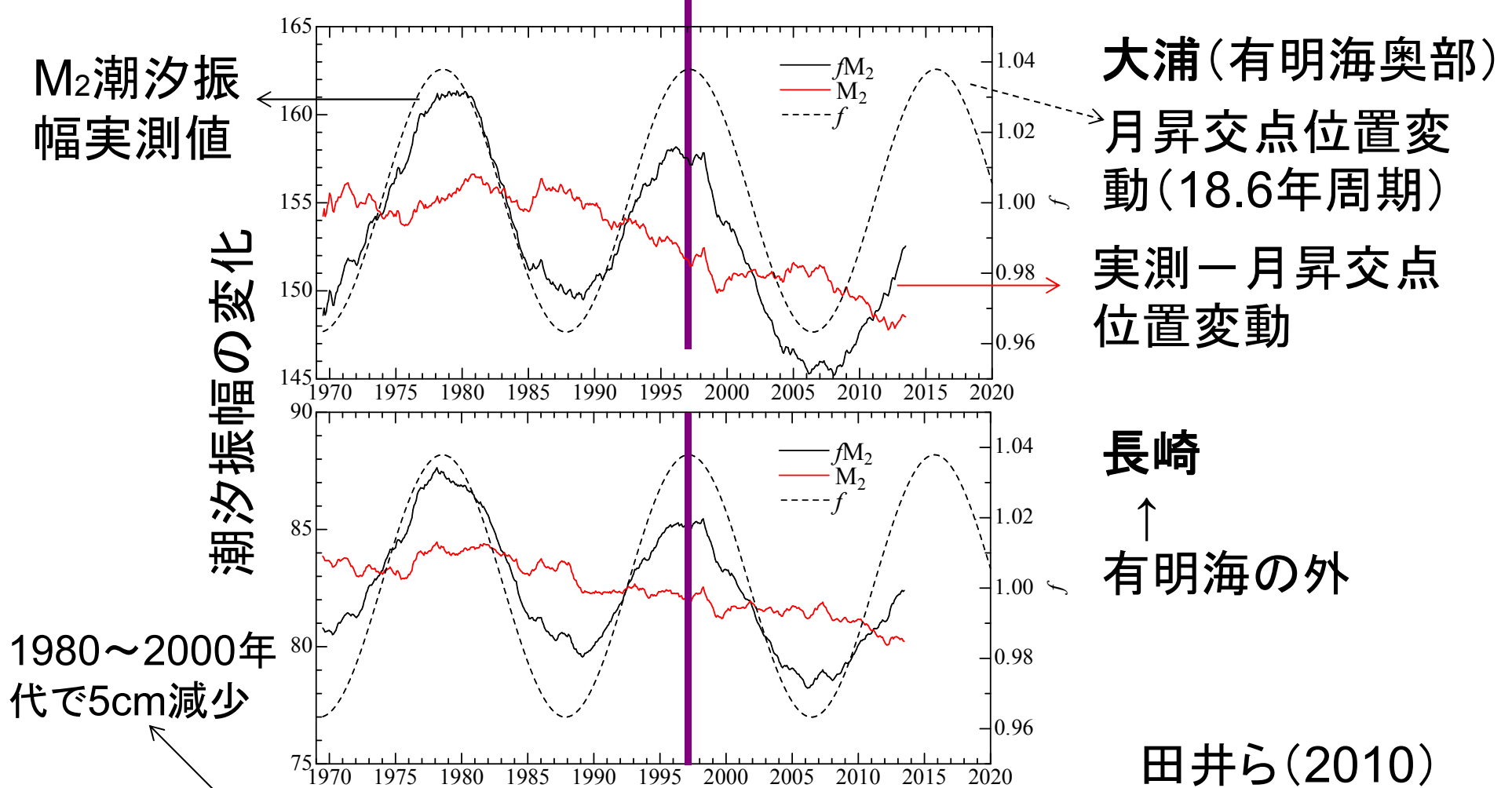


図-12 外海潮位振幅の自然変動と貧酸素水塊の容積³⁵の関係

潮汐振幅の変化 ⇒ 潮流の変化



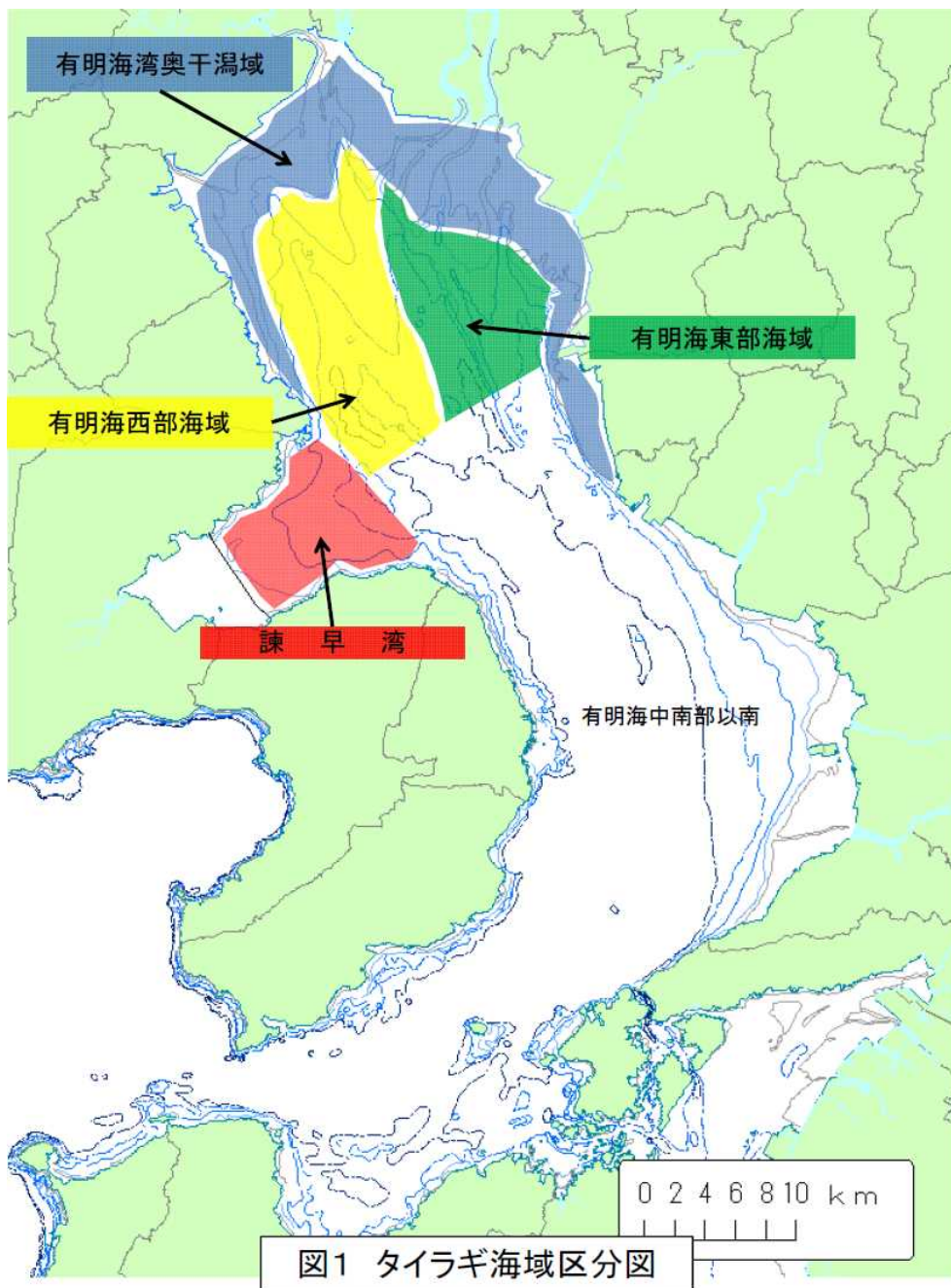
潮汐振幅変化で卓越するのは月昇交点位置変化の影響(~13cm)
 それに加えて長期トレンドがあり、2000年代の有明海は過去40年間で
 最も潮汐振幅の小さい時期⇒潮汐は確かに減少していた→潮流
 長期トレンドの傾向は、有明海奥部と湾外の長崎でよく一致。

貧酸素水塊の経年変動まとめ

- ・過去30年間で**有明海の貧酸素化は進行した可能性が高い**。2004年以降は一定の経年トレンドはみられない。
- ・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**、淡水供給が多いほど成層は強い。
- ・淡水供給が多い年には、成層が長期間続き、貧酸素の継続時間は長く、貧酸素化も深刻化する。
- ・**二枚貝類の減少は有機懸濁物量を増加**させ、貧酸素を促進し、**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。
- ・**潮汐振幅**が大きいほど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。
- ・潮汐振幅はfの影響が大きいものの過去30年間で減少³⁷。

二枚貝類と貧酸素素，赤潮との関連

第31回委員会資料より



第32回委員会資料より

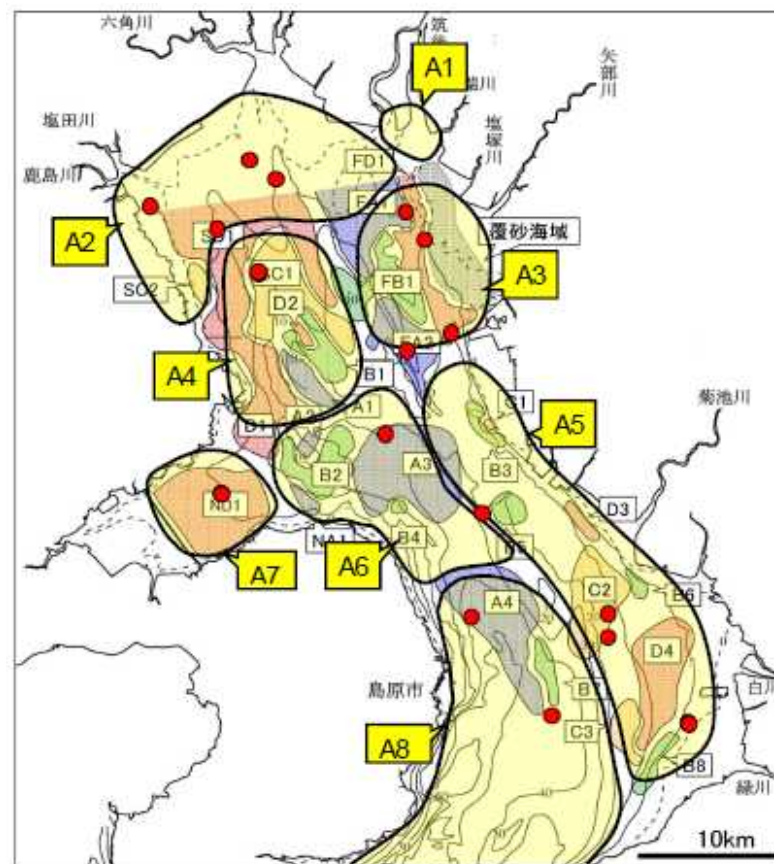


図 3.1 有明海の海域区分

第31回委員会資料より

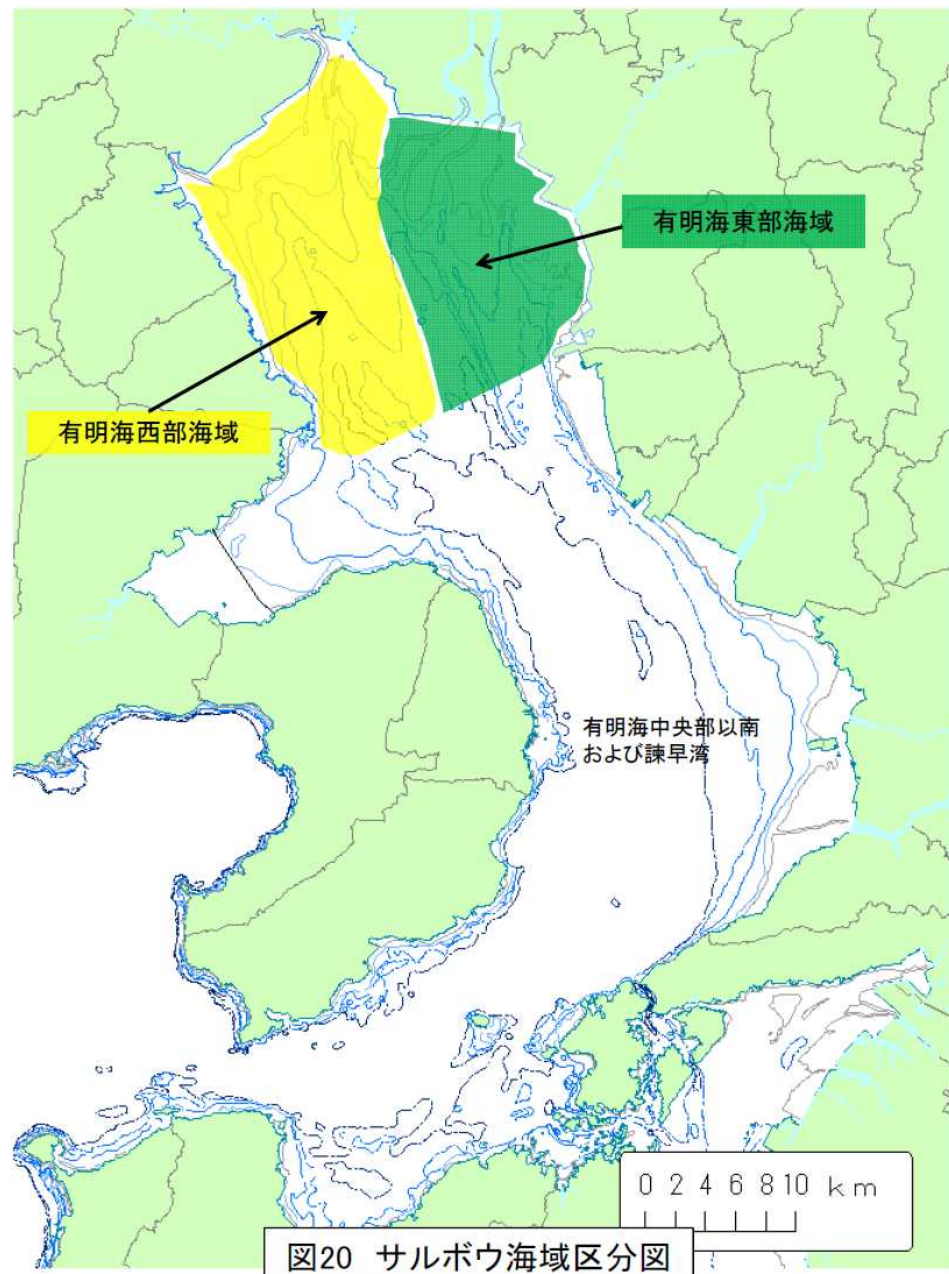


図20 サルボウ海域区分図

第32回委員会資料より

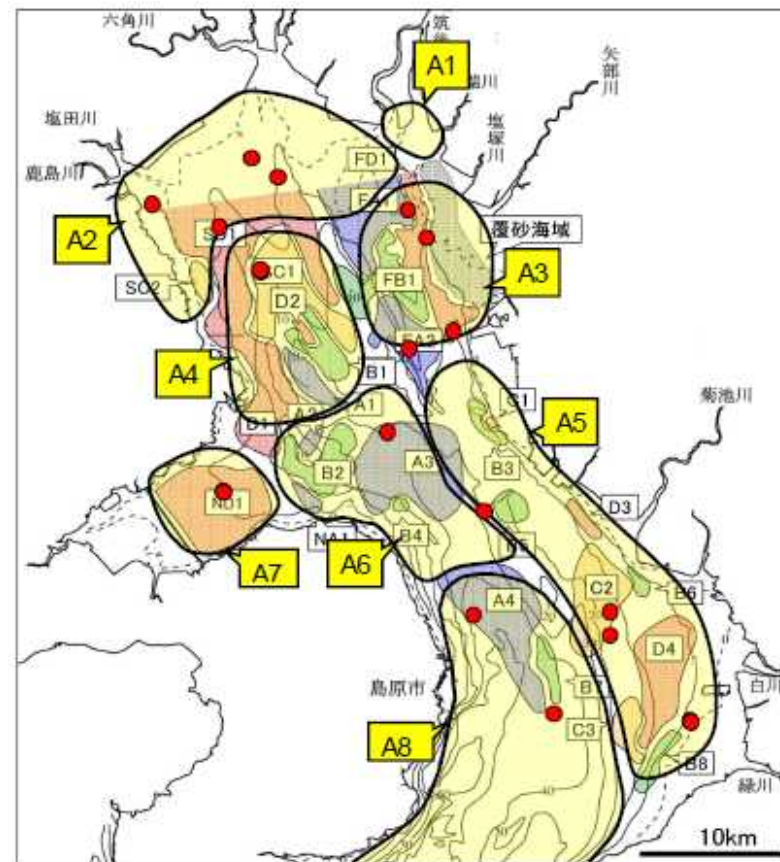
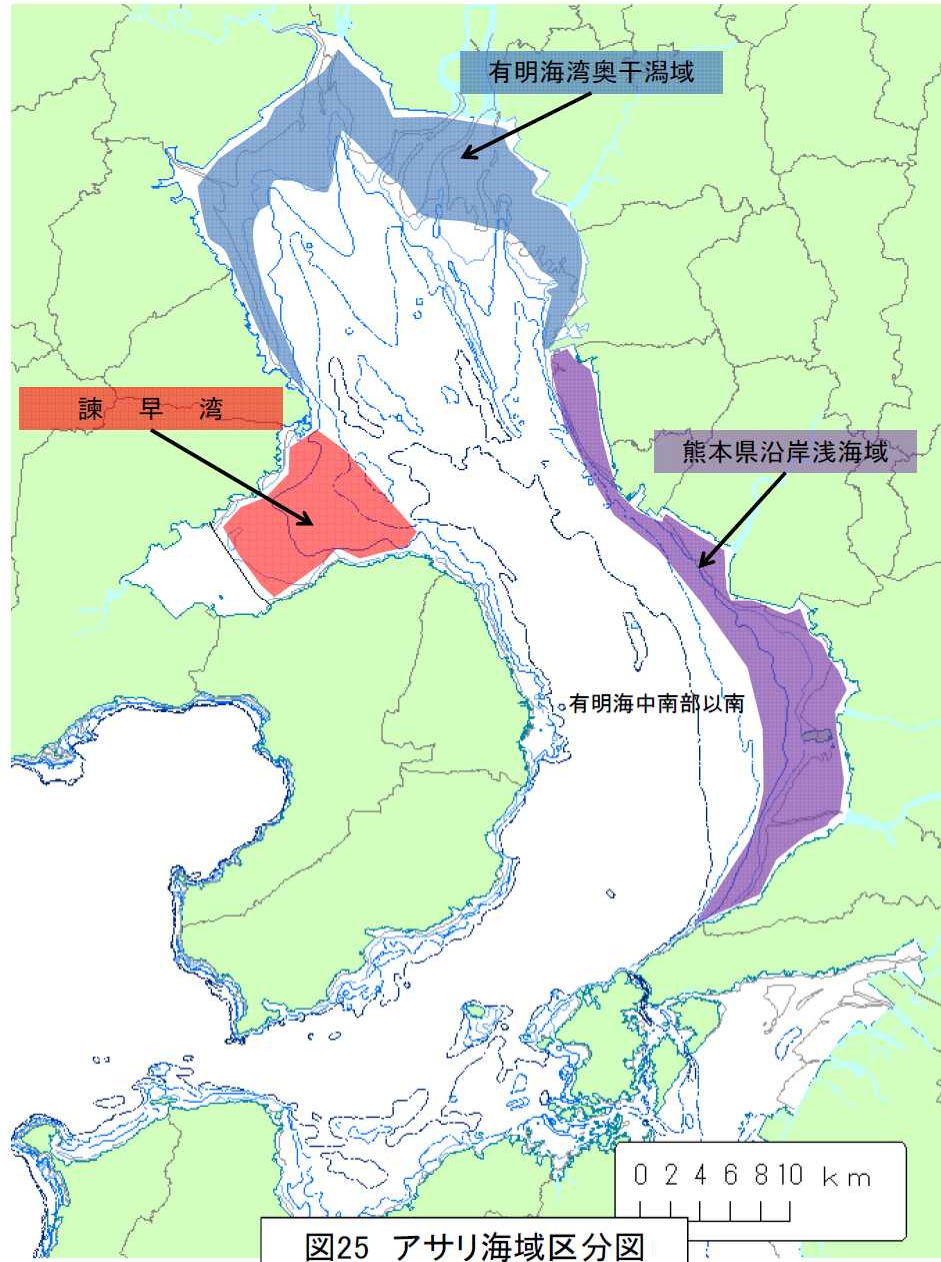


図 3.1 有明海の海域区分

第31回委員会資料より



第32回委員会資料より

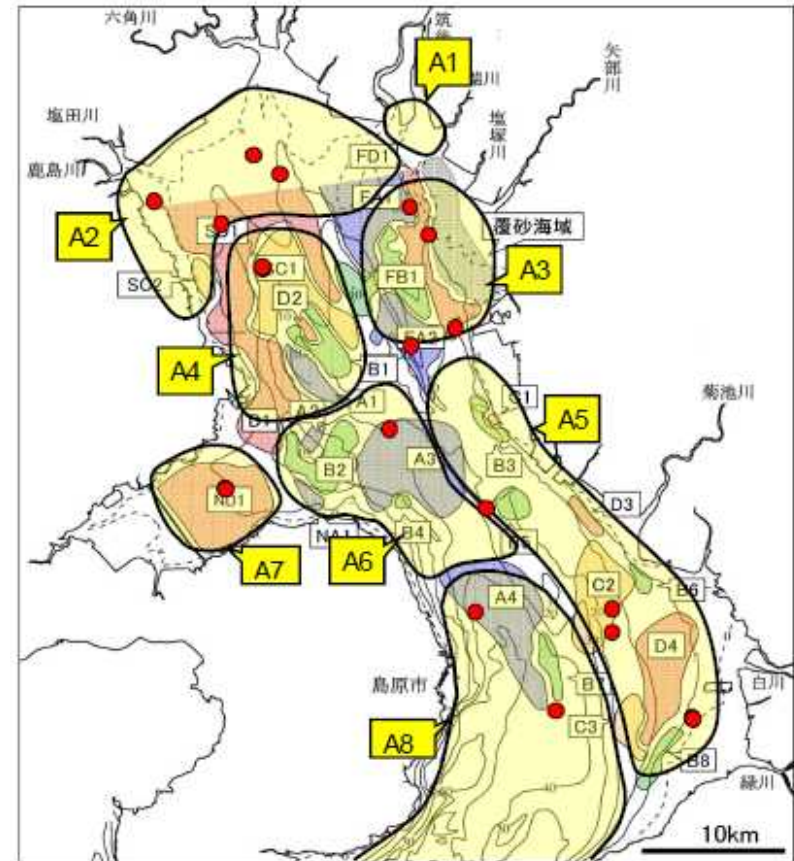


図 3.1 有明海の海域区分

有明海奥部の干潟を含めた底質分布

山本ら(2006)

砂分の割合

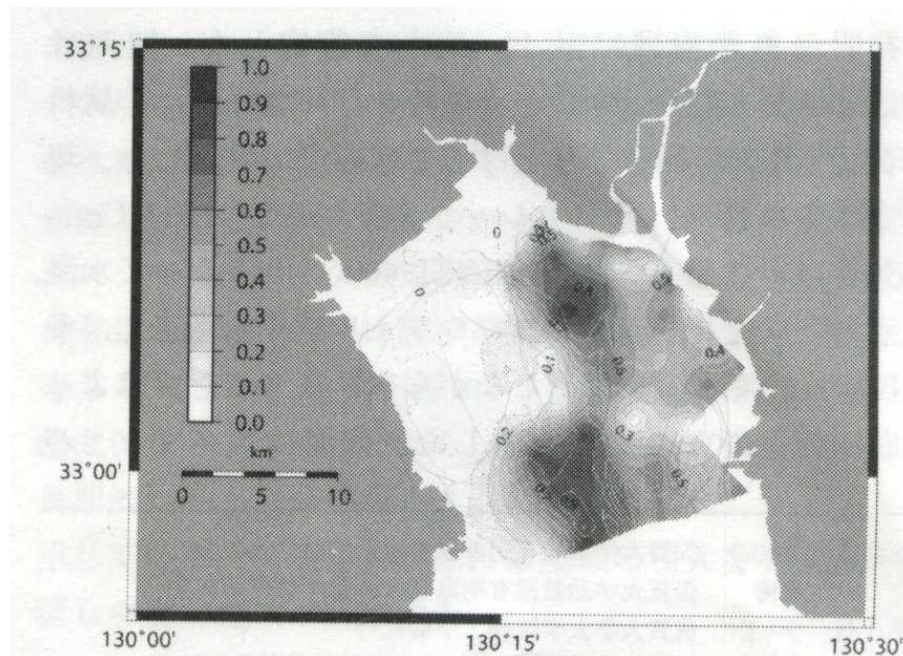


図-3 砂分 (0.063mm 以上) の重量割合 (gDW/gDW). 図中の線は等深線 (2m 間隔).

細粒シルト・粘土の割合

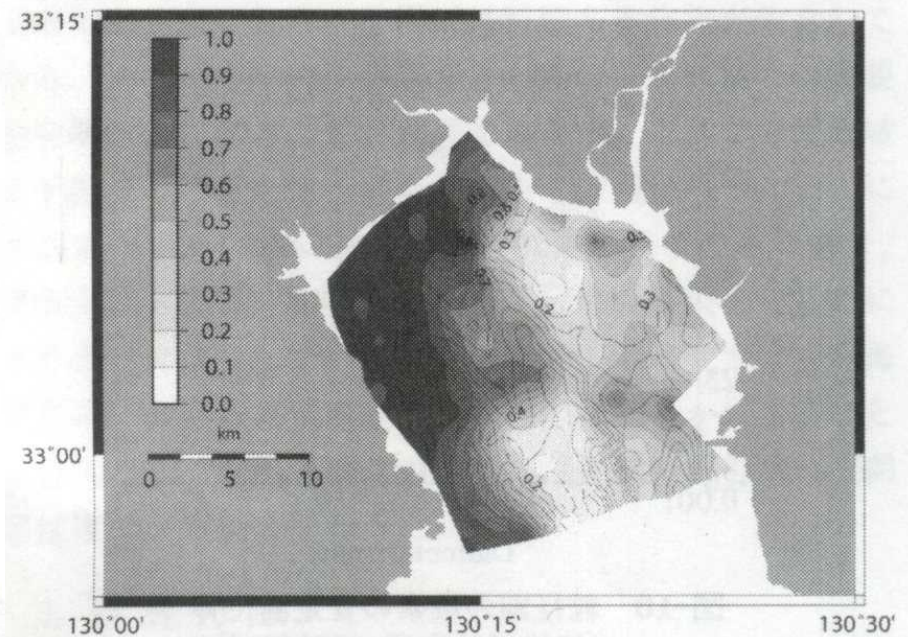


図-5 底質中の細粒シルト・粘土 (0.016mm 以下) の重量割合 (gDW/gDW) 図中の線は等深線 (2m 間隔).

二枚貝類の生息・分布状況から見た海域区分の提案

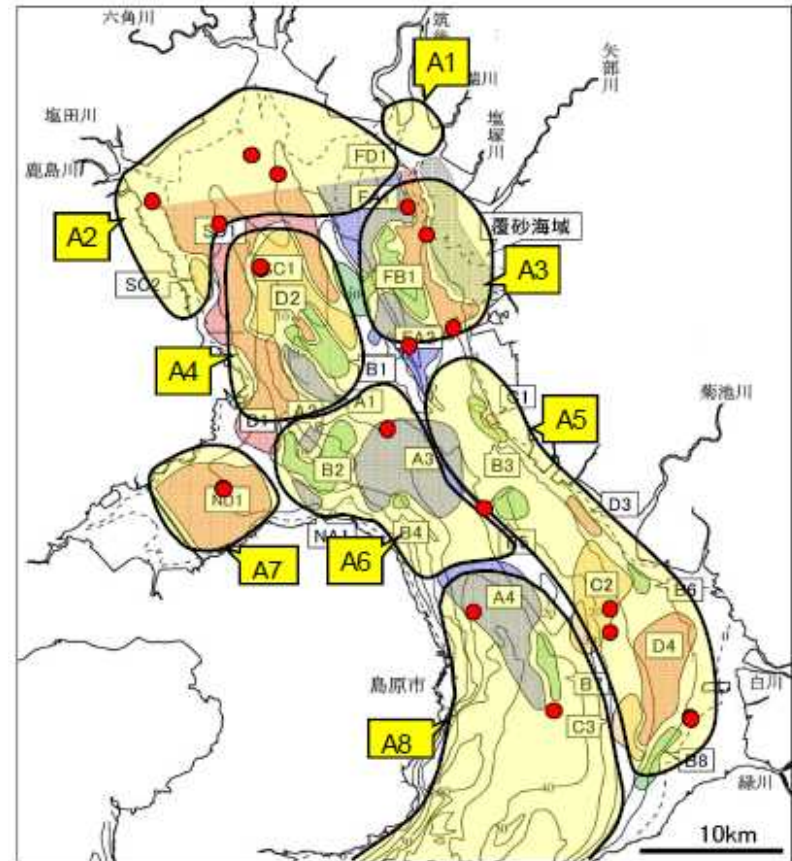
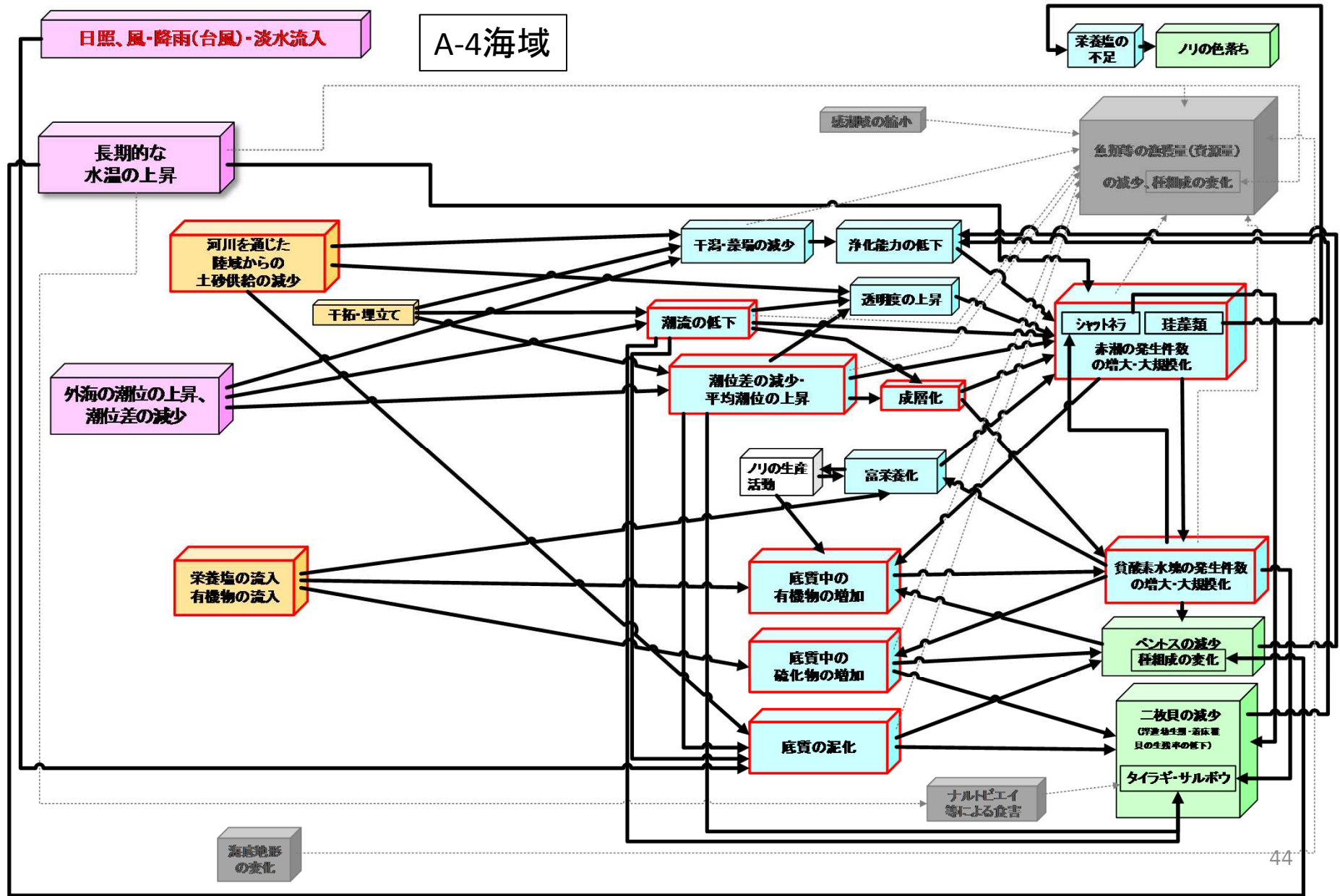
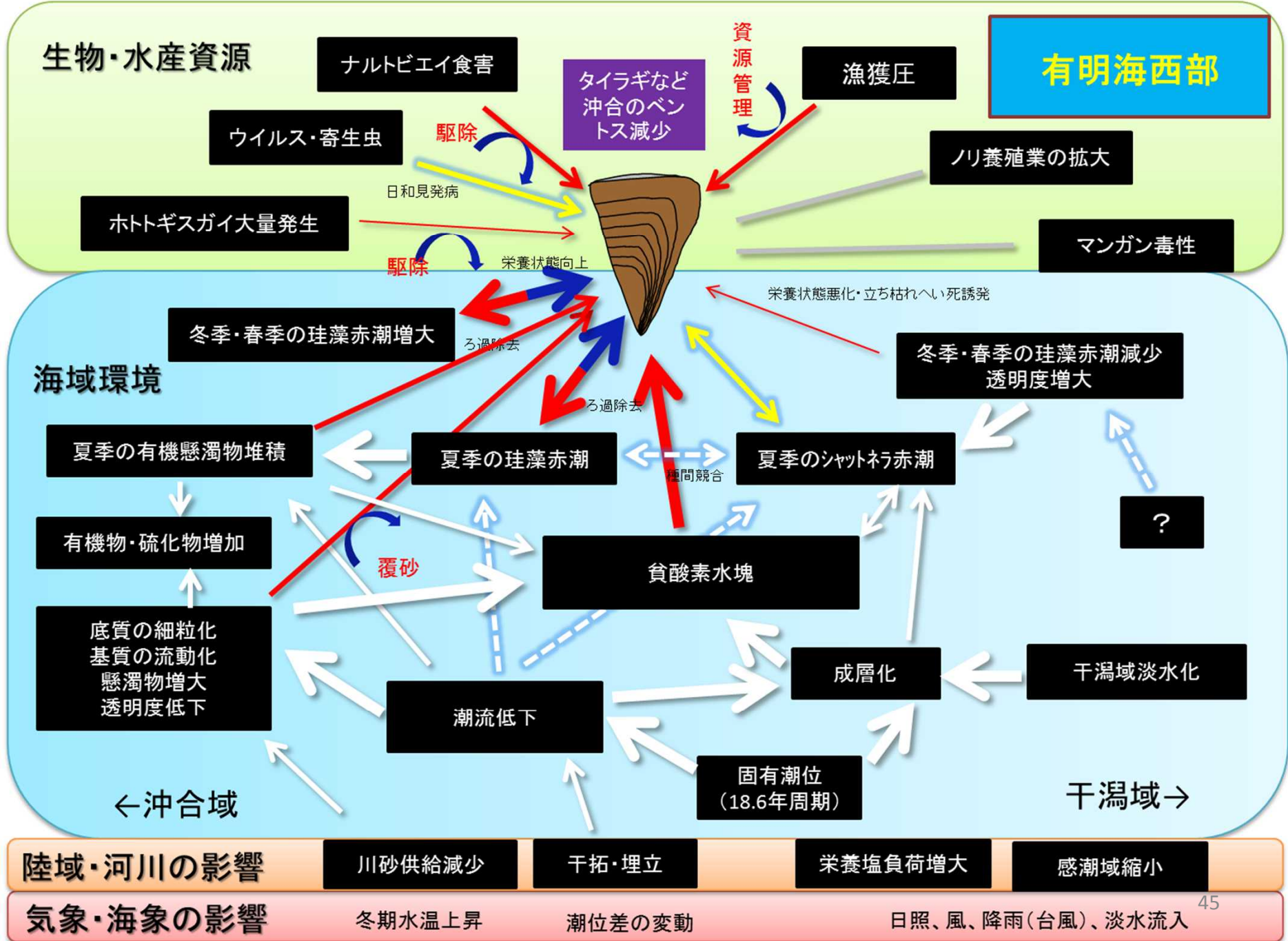


図 3.1 有明海の海域区分

湾奥西部・湾奥干潟域西部：
泥
湾奥東部・湾奥干潟域東部：
砂泥・砂

海域再生小委作成の連関図の例





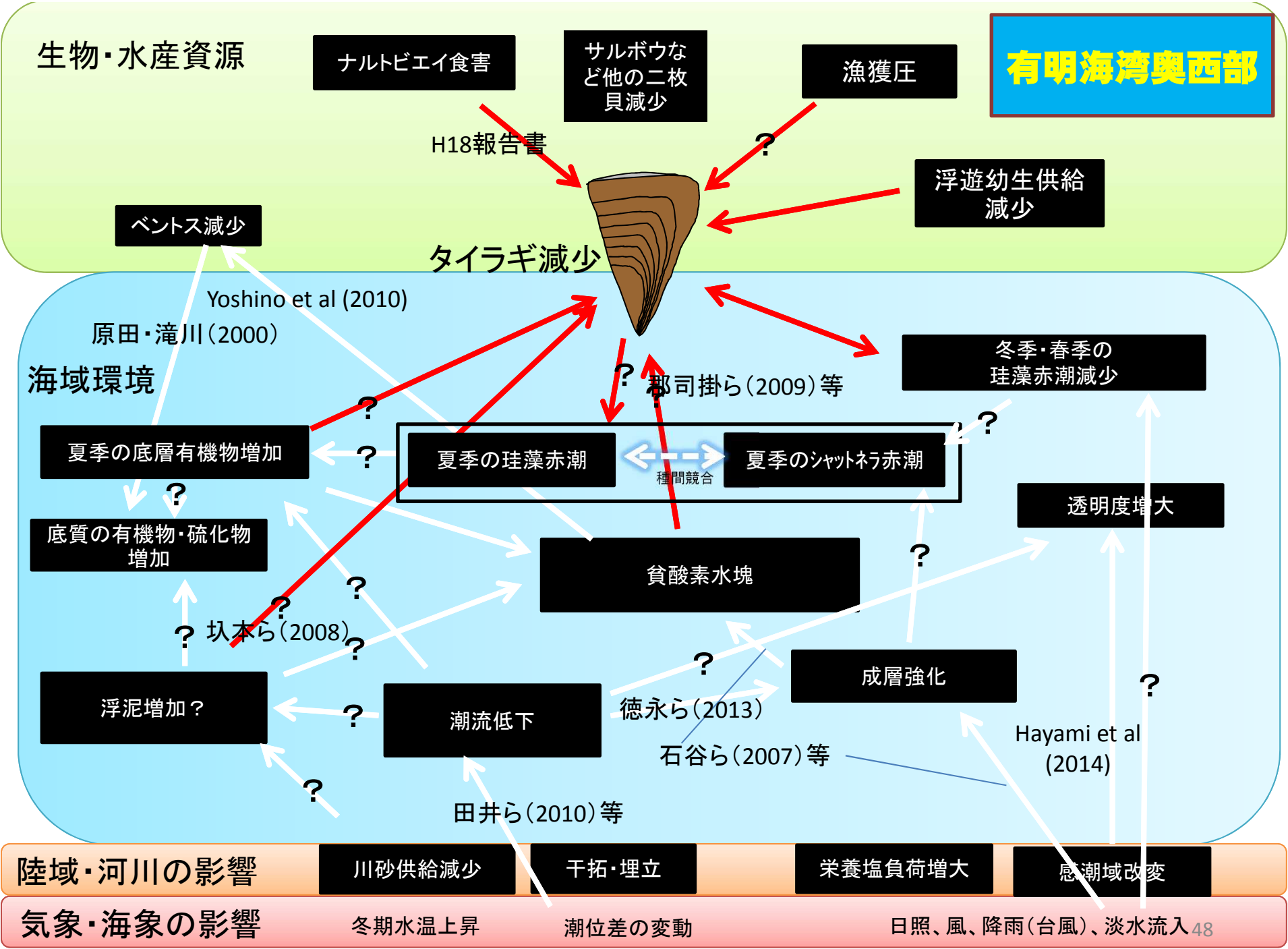
生物・水産資源小委提出資料の再検討

検討の方向について

1. 変化の期間に関する共通認識
1975～85に比較した2005以降の10年を基本とする
2. 検証されているパス(査読付き論文掲載)、あるいはデータで説明できるパスと、そうでないパス(仮説) の明確化
3. 関連が薄いと認められる要素は取り去る
(グレーのライン、黄色のライン(文献あり))
4. 追加項目の有無
例)タイラギの浮遊幼生供給
5. 時間スケールの統一(周期変動の除外)
6. 対策(青の矢印)については図から省く

タイラギ

有明海湾奥西部

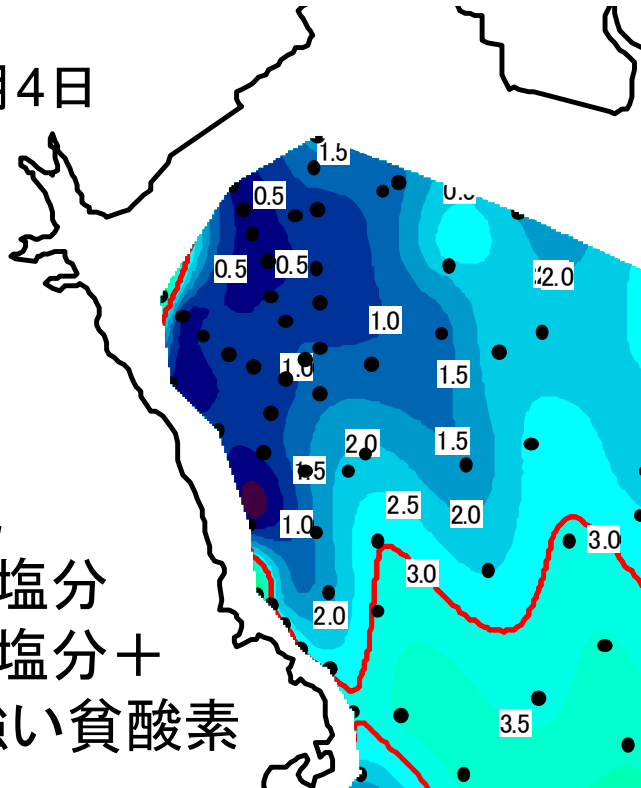


タイラギへの影響

荒巻・大隈
(2011)

2010年夏季の1歳貝の大量斃死

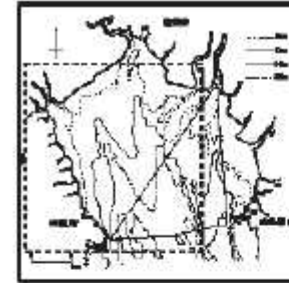
2010年8月4日
底上DO



2段階の斃死

7月上旬: 低塩分

8月上旬: 低塩分 +
強い貧酸素



タイラギ
高密度分布域

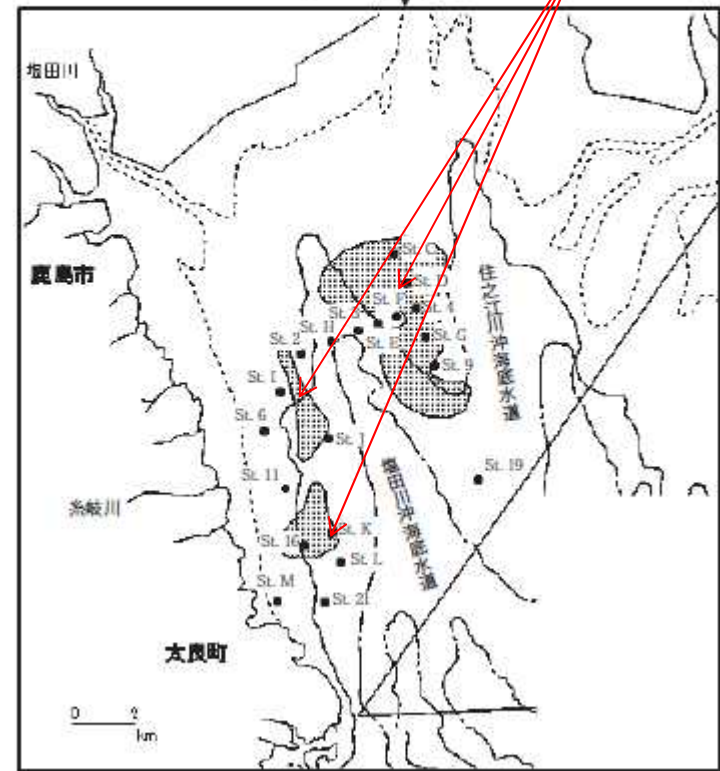


図1 生息状況調査地点
■: 2008年級群の高密度分布域
●: 調査地点

タイラギ成貝は比較的貧酸素耐性は高い。10日間無酸素に近い状況が続いたために大量斃死したと考えられる。

低酸素水に対するリシケタイラギの反復暴露実験

郡司掛ら(2009)

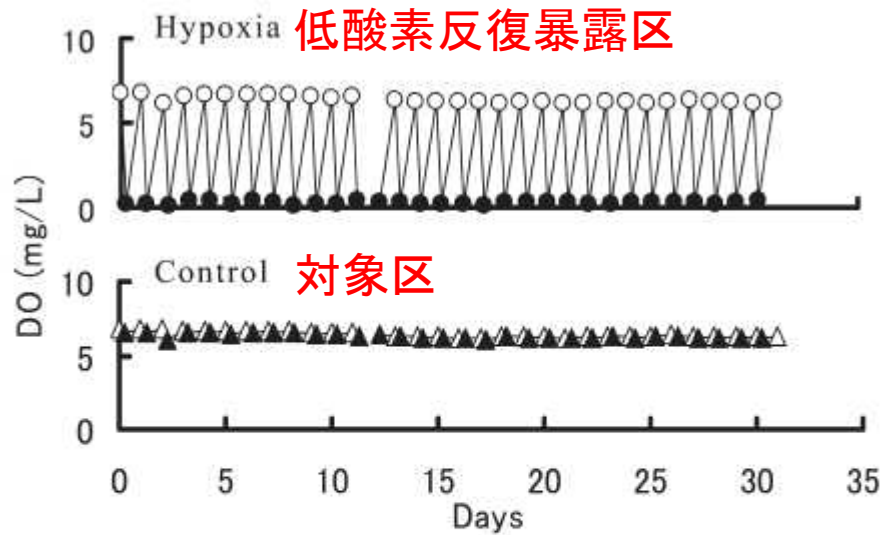


Fig. 1. The level of dissolved oxygen (DO) concentrations in seawater before (○) and after (●) exposure in hypoxia, and before (△) and after (▲) exposure in control.

DOを0.5mg/L以下に下げ、低酸素状態で6h、通気・濾過海水導入により貧酸素解消を31日間繰り返した

生存率(%)

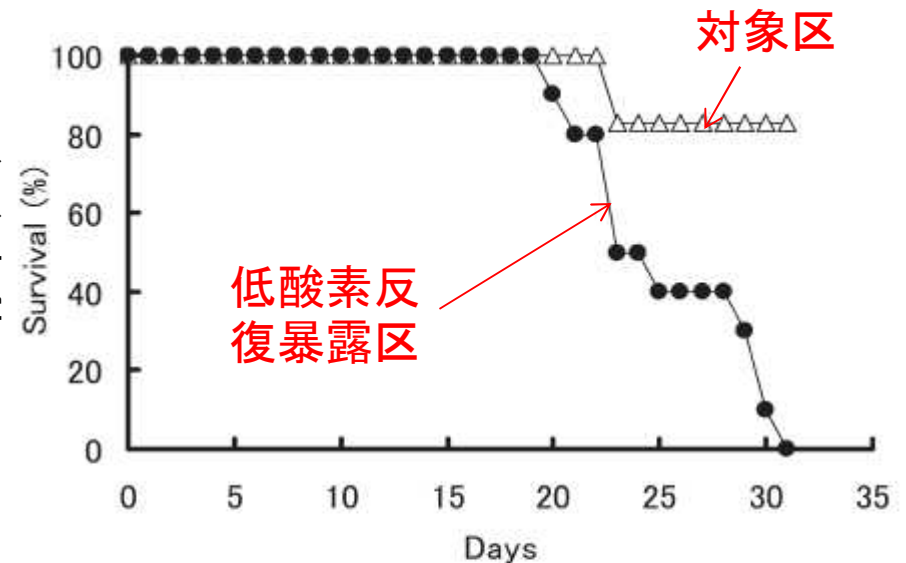
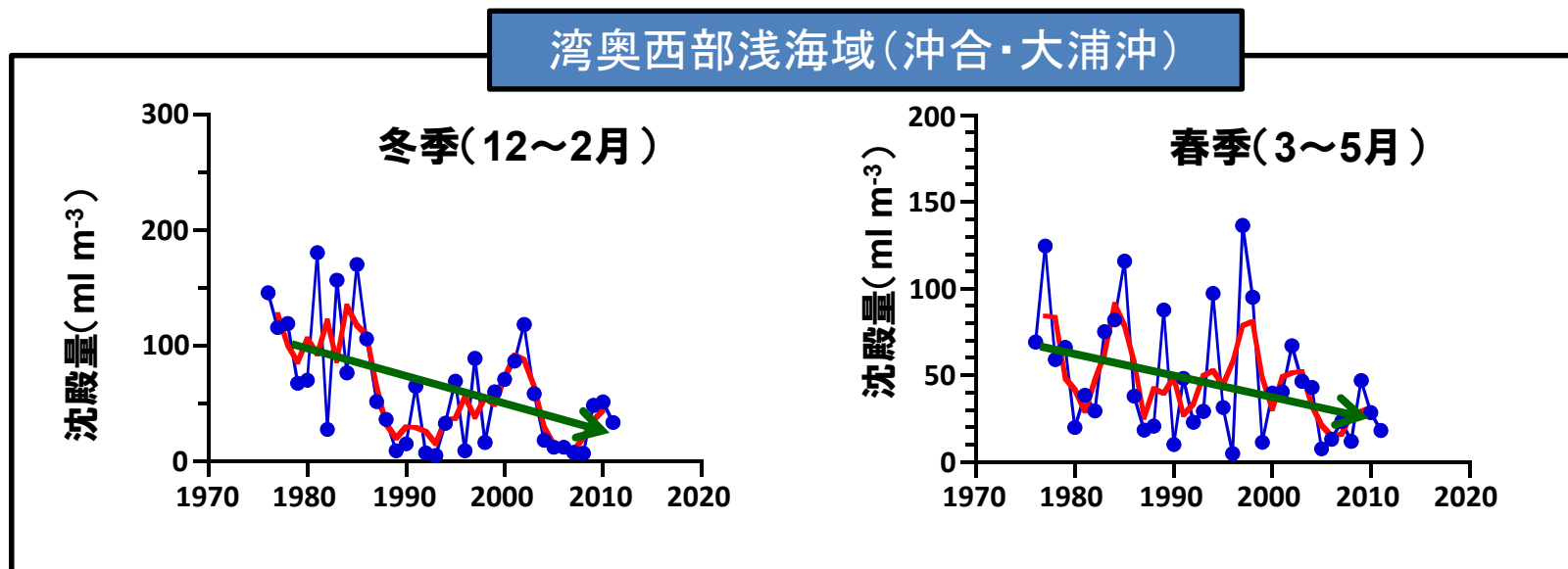
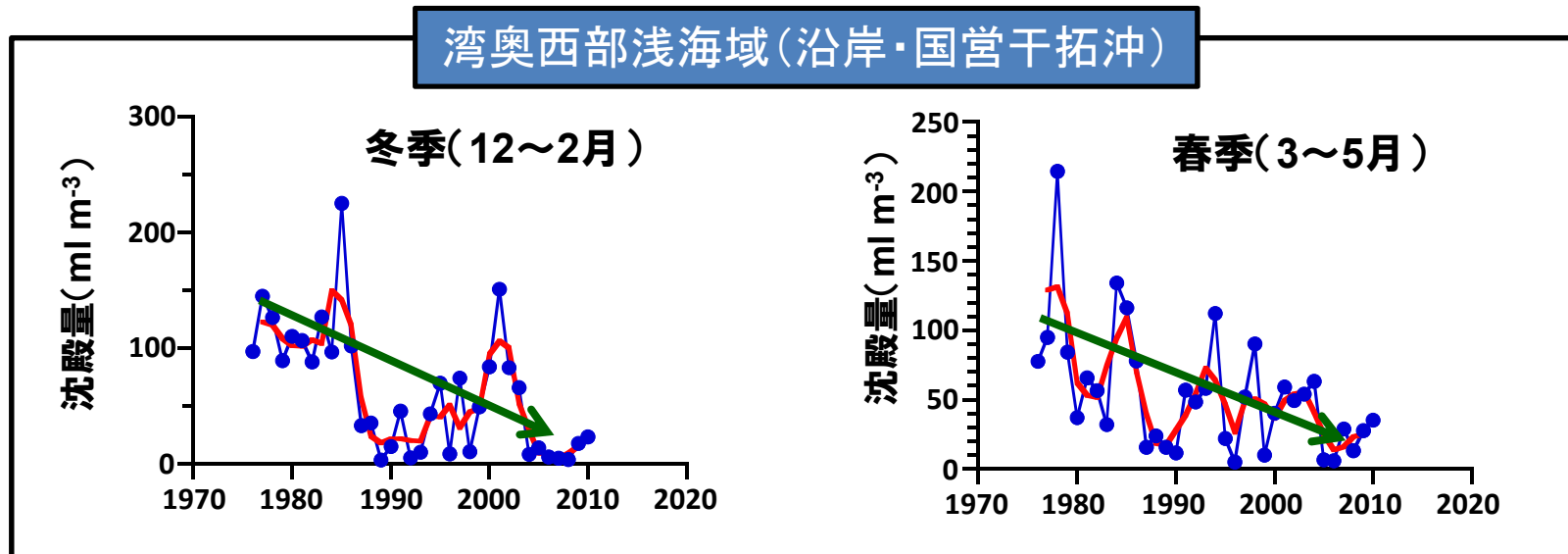


Fig. 3. The percentages of survival in pen shell *Atrina lischkeana*, treated with repeated hypoxia (●), and control (△).

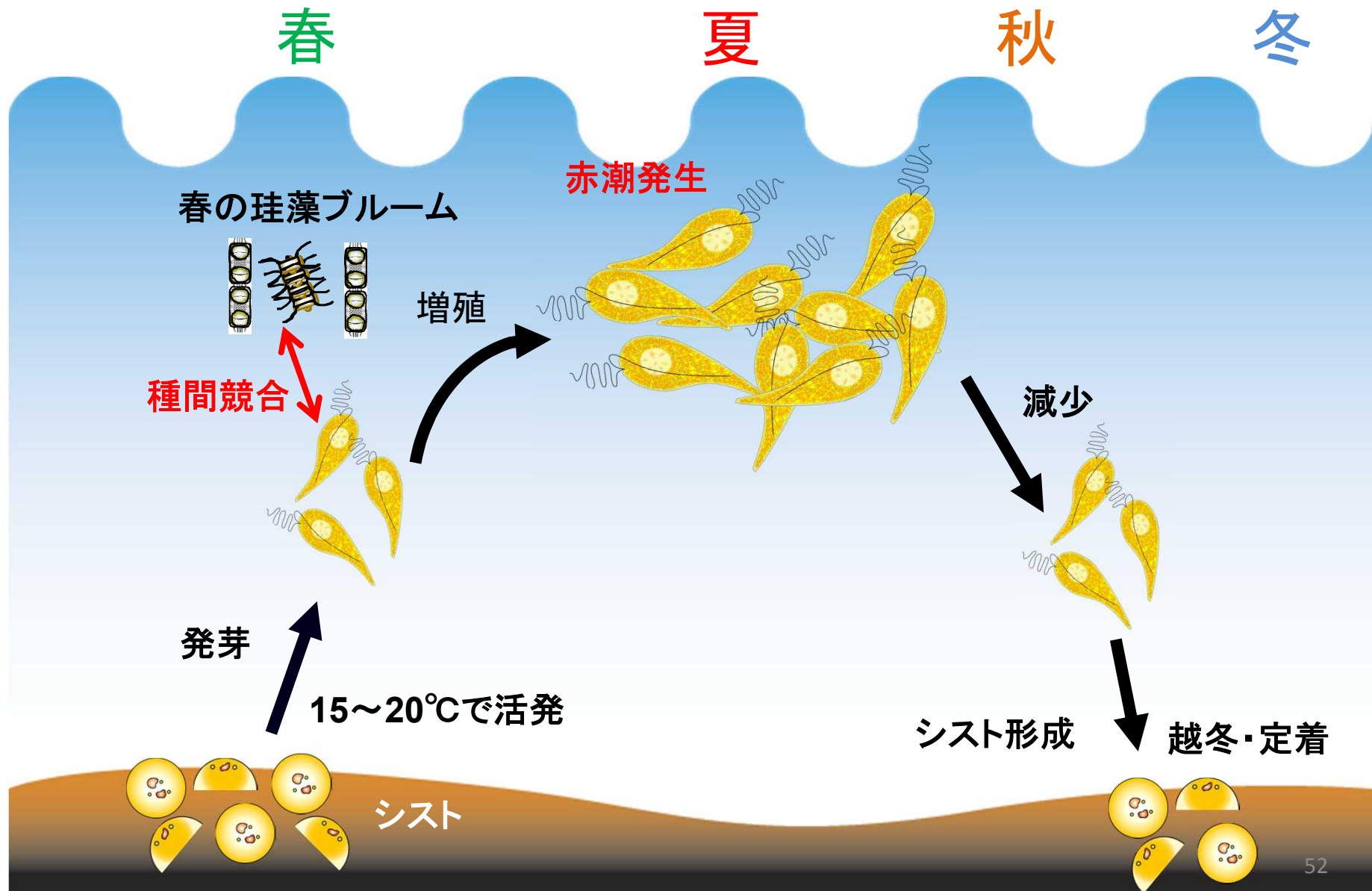
- 暴露日数増加とともにタイラギが砂から露出する程度が大きくなった.
- その後、衰弱した個体増加、最後に斃死に至った.
- 海底直上水のDOの重要性を指摘

有明海湾奥におけるプランクトン沈殿量の長期変動傾向

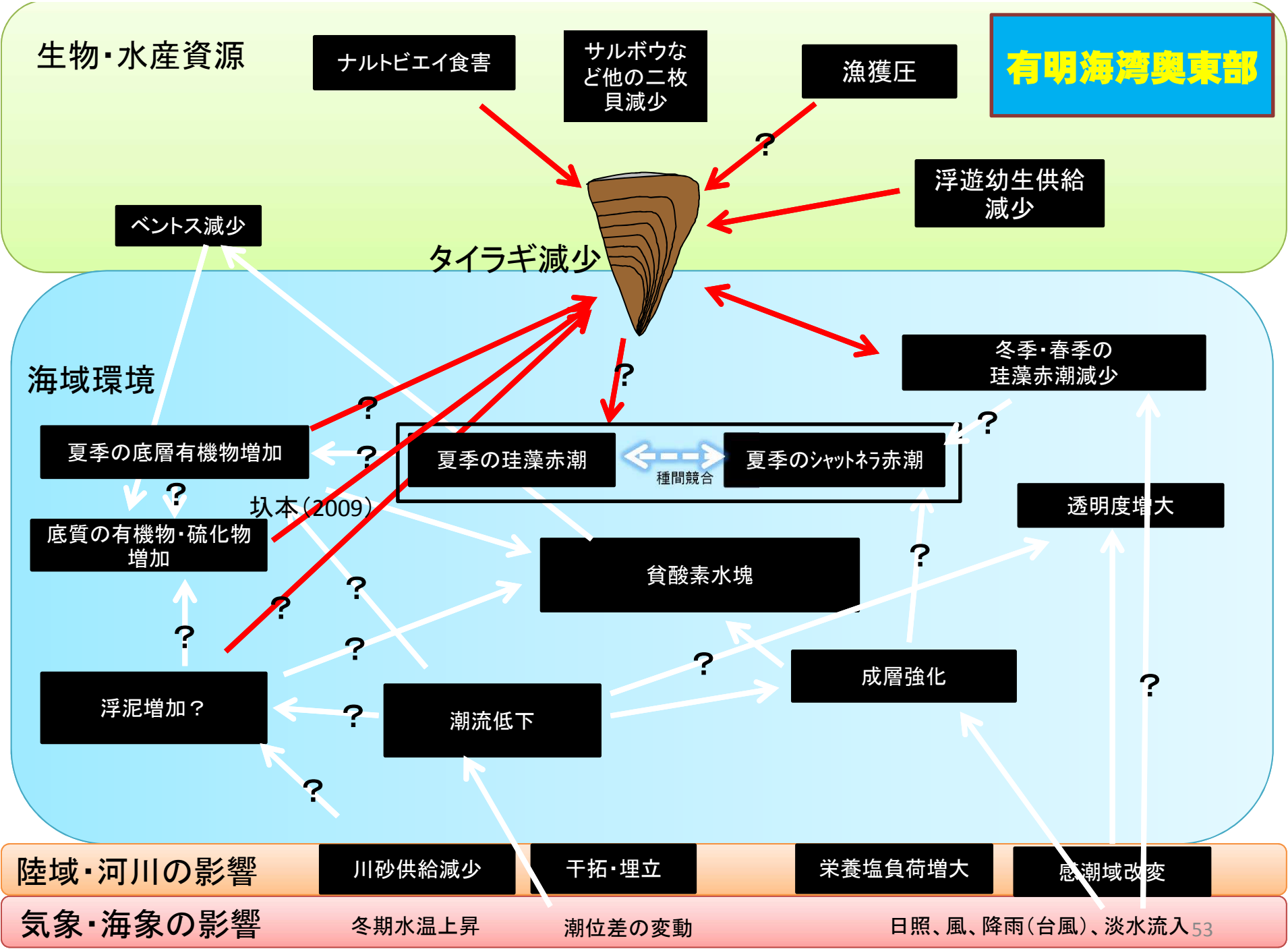


季節別のプランクトン沈殿量の経年変化。赤線は3ヶ年移動平均。

シャットネラの生活史と珪藻類との種間競争との関係図



有明海湾奥東部



有明海湾奥干潟域東部

生物・水産資源

ナルトビエイ食害

サルボウなど他の二枚貝減少

漁獲圧

浮遊幼生供給減少

ベントス減少

タイラギ減少

海域環境

夏季の底層有機物増加?

底質の有機物・硫化物増加?

浮泥増加?

夏季の珪藻赤潮

種間競合

夏季のシャットネラ赤潮

潮流低下

冬季・春季の珪藻赤潮減少

透明度増大

陸域・河川の影響

川砂供給減少

干拓・埋立

栄養塩負荷増大

感潮域改変

気象・海象の影響

冬期水温上昇

潮位差の変動

日照、風、降雨(台風)、淡水流入

サルボウ

有明海湾奥西部

生物・水産資源

ナルトビエイ食害
タイラギなど他の二枚貝減少
漁獲圧

H18報告書

ベントス減少

サルボウ減少



海域環境

夏季の底層有機物増加

底層の有機物・硫化物増加

浮泥増加?

夏季の珪藻赤潮

夏季のシャツネラ赤潮

種間競争

貧酸素水塊

潮流低下

成層強化

冬季・春季の珪藻赤潮減少

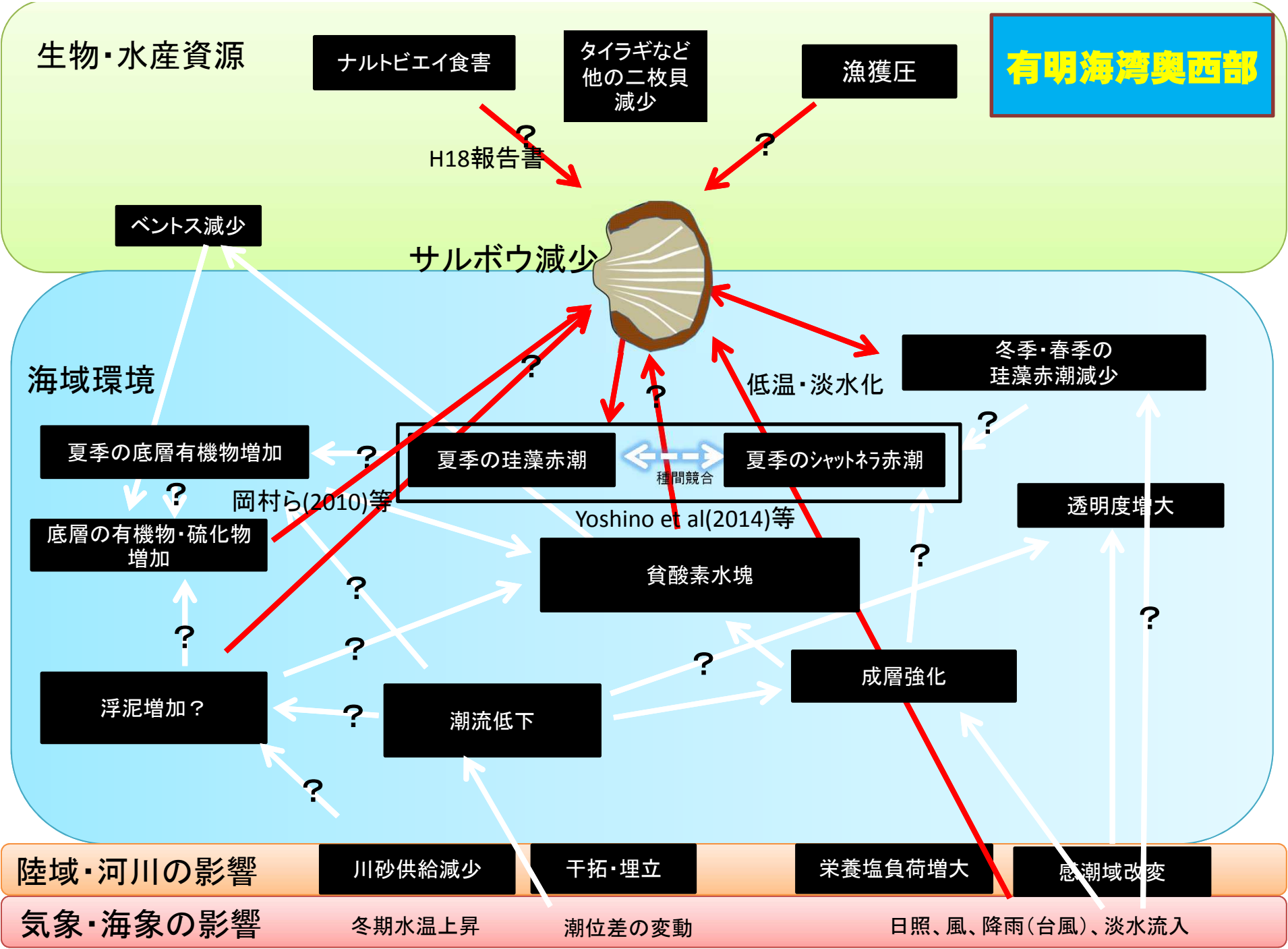
透明度増大

陸域・河川の影響

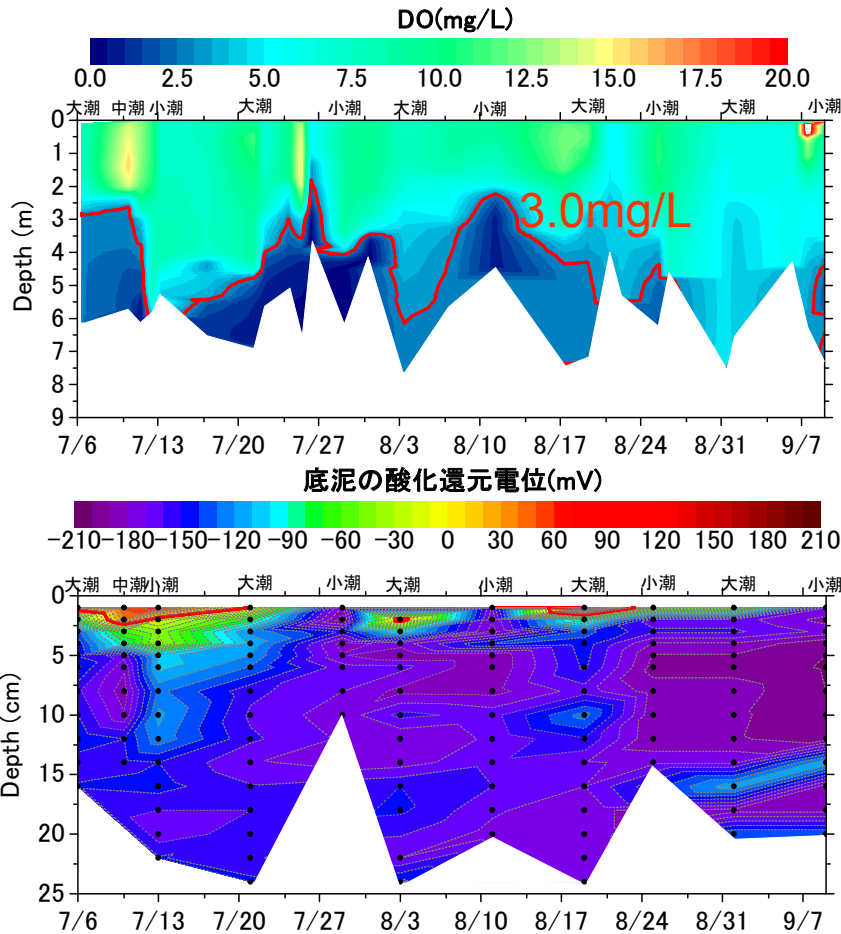
川砂供給減少
干拓・埋立
栄養塩負荷増大
感潮域改変

気象・海象の影響

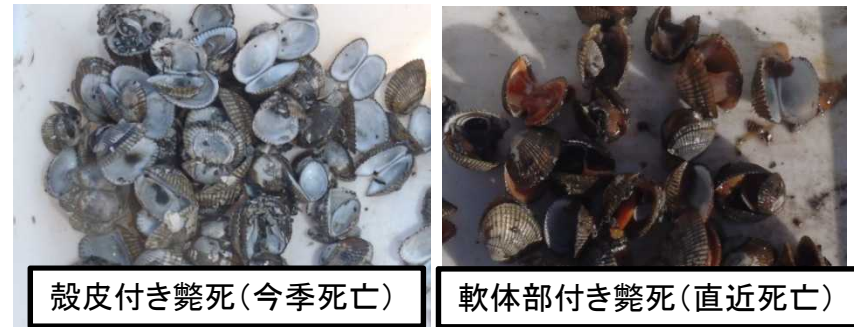
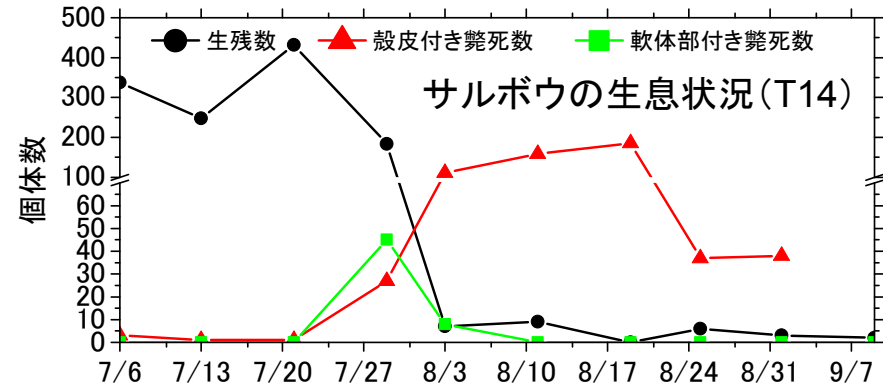
冬期水温上昇
潮位差の変動
日照、風、降雨(台風)、淡水流入



サルボウへの影響

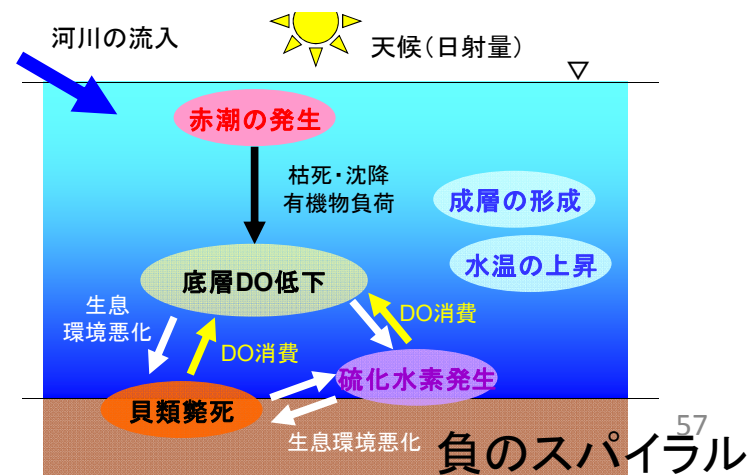


観測点14(浜川沖)(干潟縁辺域)における底質の鉛直分布とサルボウ生息状況(2012年)



貧酸素化が継続すると底泥中の還元化進行

(西海区水産研究所提供)



【サルボウに対する低塩分と貧酸素の複合影響】

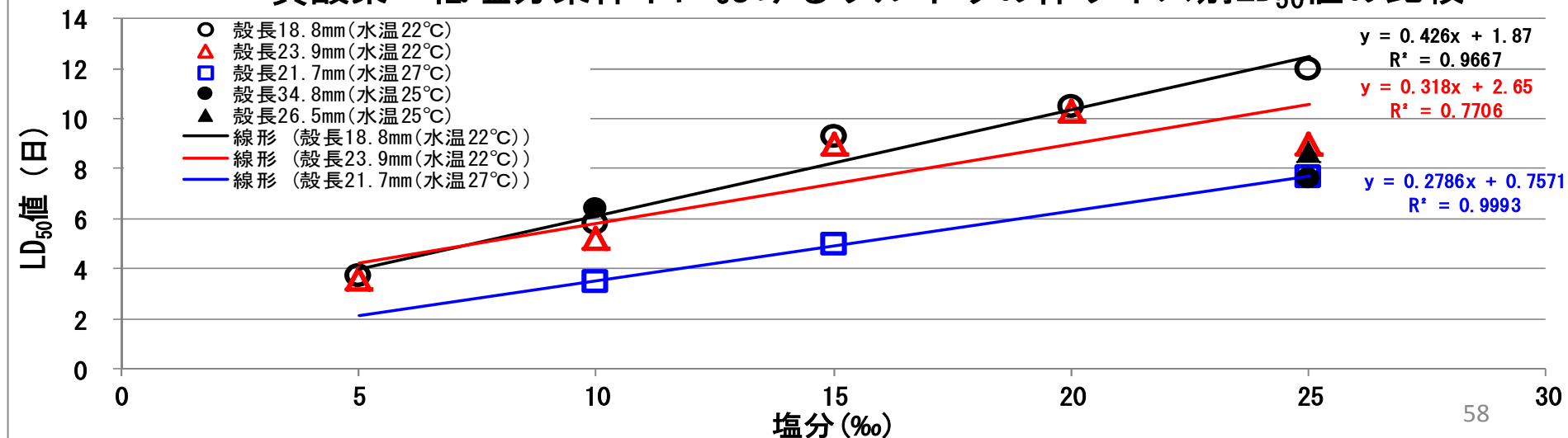
● 下記条件で3日間飼育後に鰓の損傷程度を観察(n=20)

水温 (°C)	塩分 (‰)	貧酸素	体腔液 の pH	鰓の損傷レベル 毎の出現率(%)		
				1	2	3
25	10	有	6.8±0.1	0.0	31.6	68.4
	15		6.9±0.1	16.7	55.5	27.8
	25		6.9±0.1	68.7	31.3	0.0
	10	無	7.0±0.3	21.0	57.9	21.1
	15		7.3±0.2	78.9	21.1	0.0
	25		7.3±0.2	100.0	0.0	0.0

● 金子らは、三河湾においてサルボウの初期成長に及ぼす貧酸素の影響を調査→溶存酸素飽和度が50%を下回ると濾過速度が低下し、成長も停滞する

金子ら(2011)

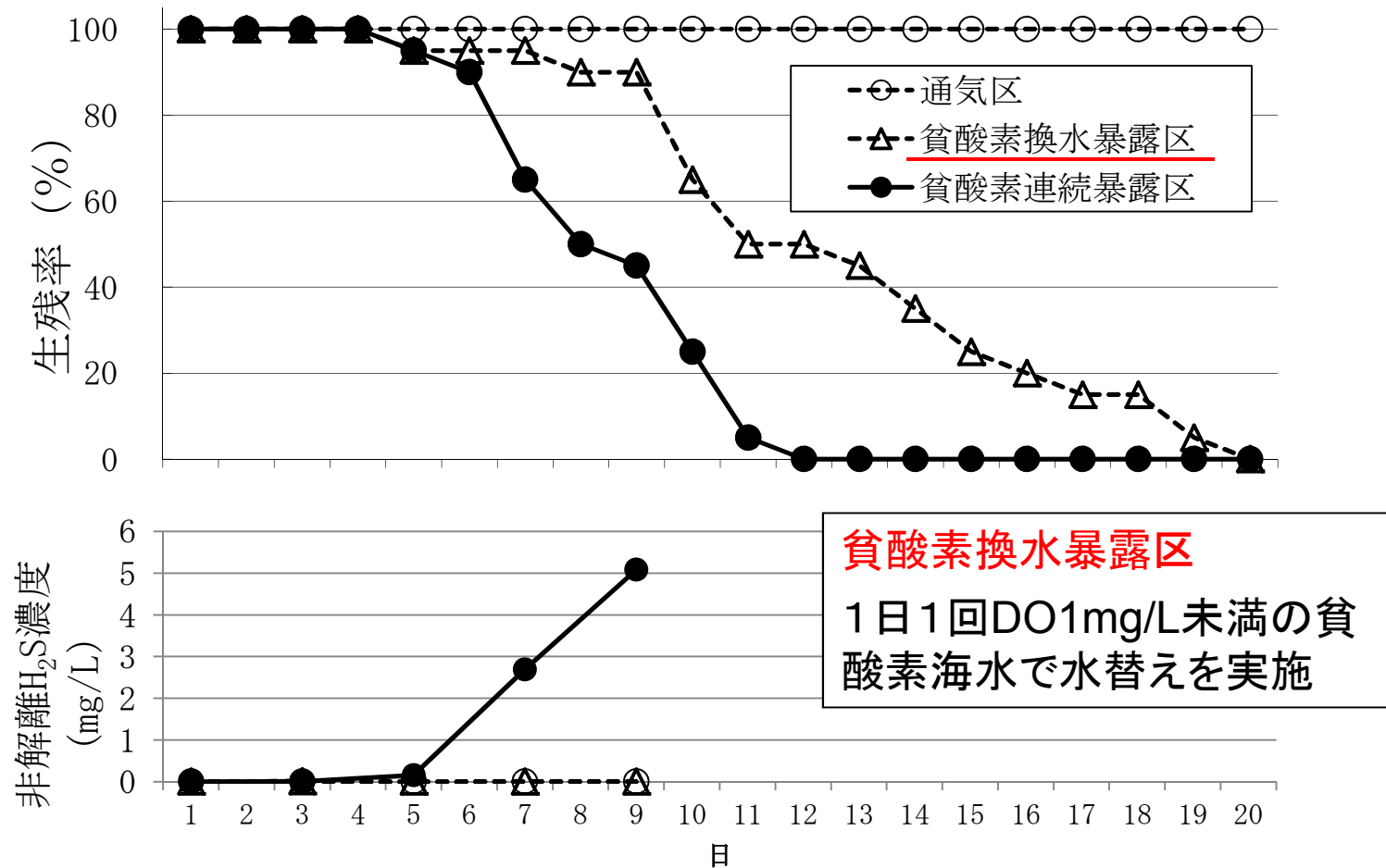
貧酸素・低塩分条件下におけるサルボウの体サイズ別LD₅₀値の比較



サルボウへの貧酸素素暴露実験

佐賀県有明水産振興
センター提供

通気区: DO5mg/L以上



貧酸素素区ではいずれもサルボウの斃死発生

貧酸素素連続暴露区では硫化水素が発生，同時に生残率急落

サルボウへ低温・低塩分の影響

濾過速度

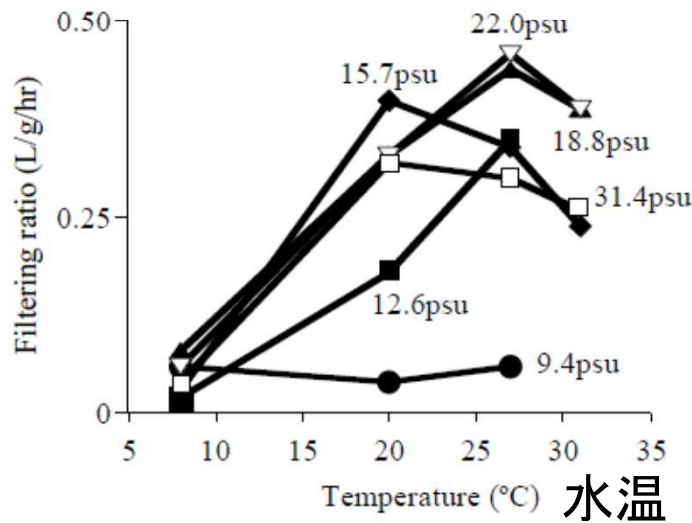
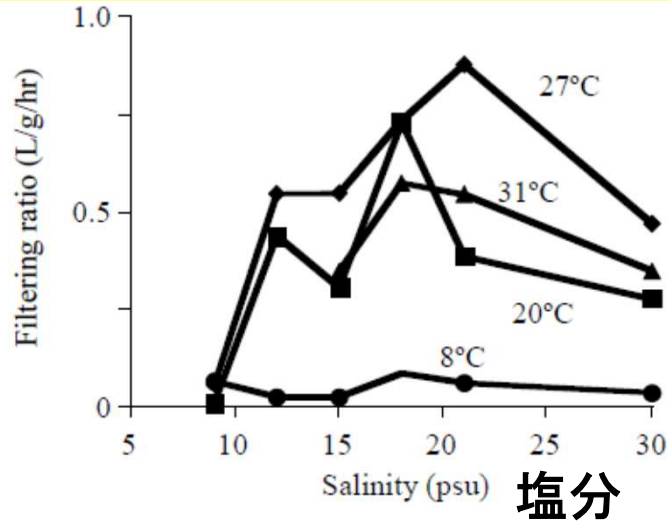


図2. 塩分と水温がサルボウの濾過速度に与える影響.

生残率

宮本・初田 (2008)より

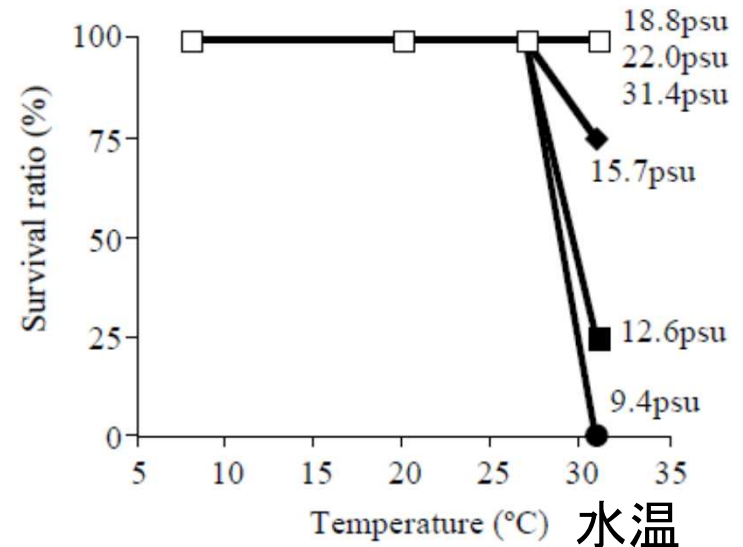
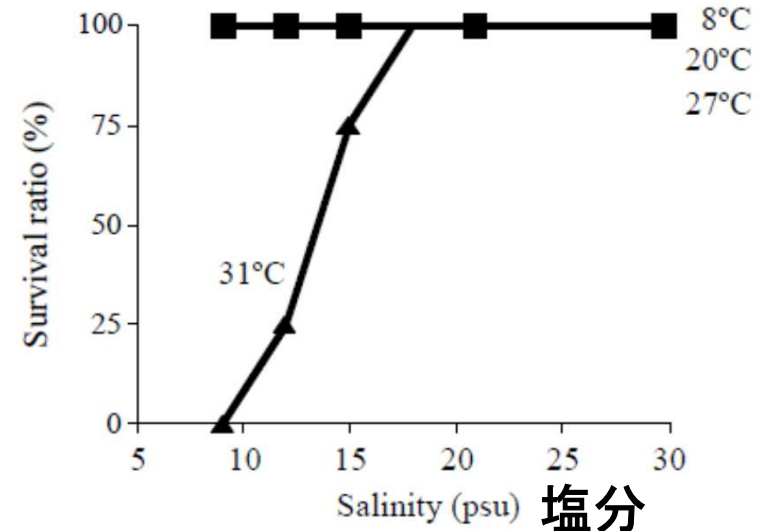
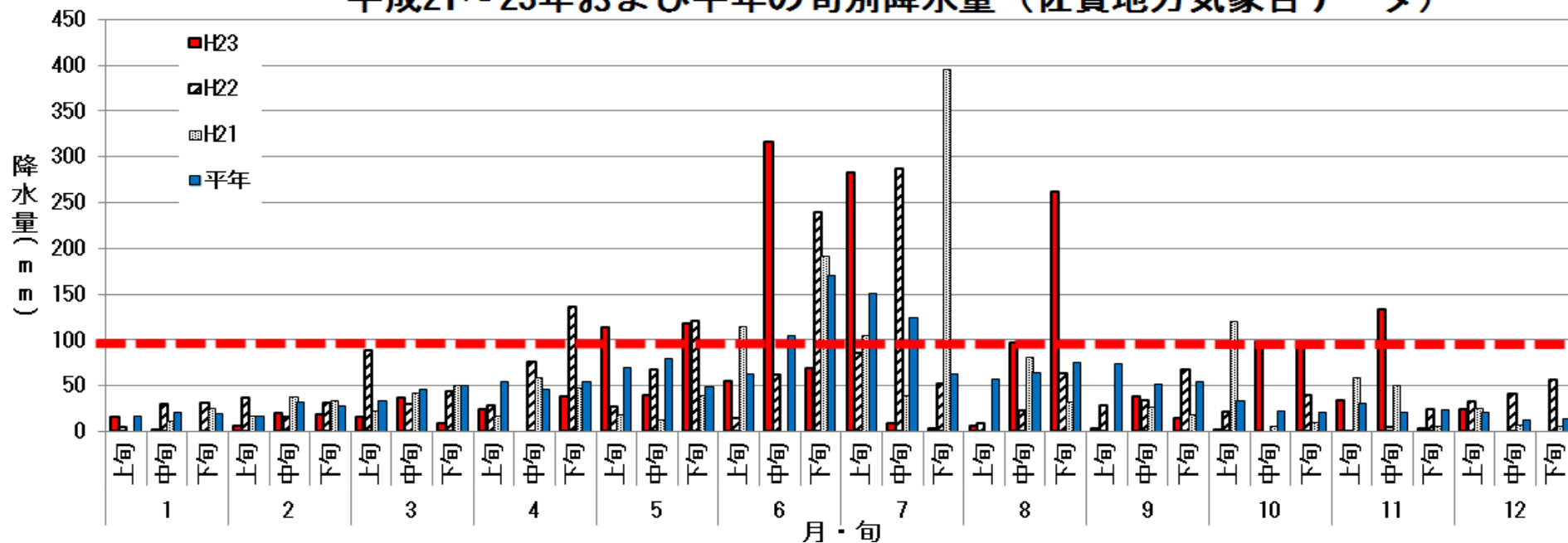


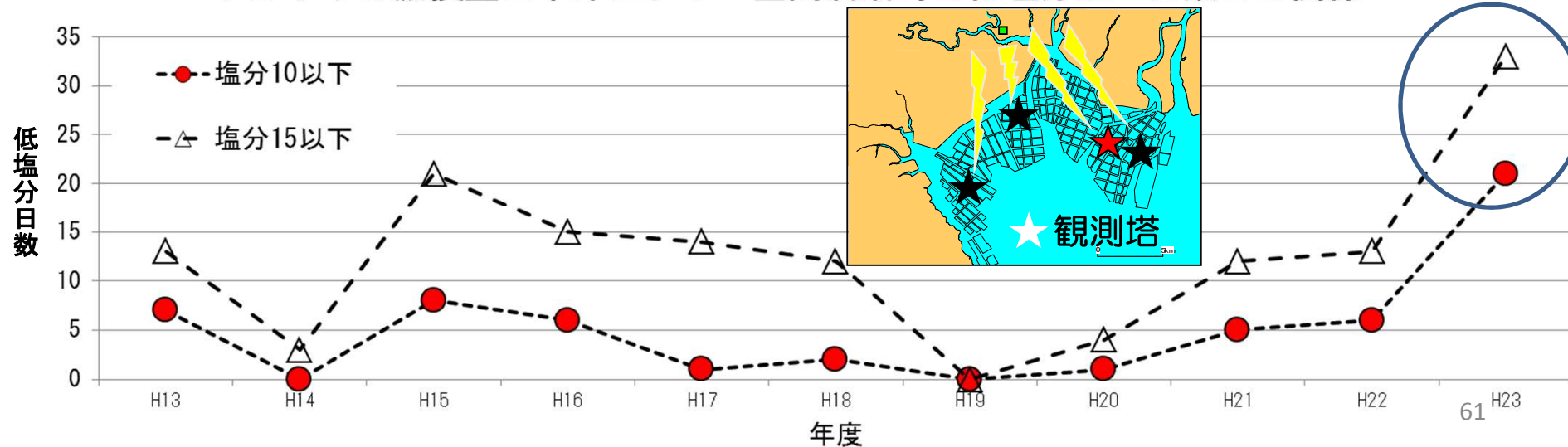
図3. 塩分と水温がサルボウの生残に与える影響.60

【H23年度大量死と低塩分との関係】

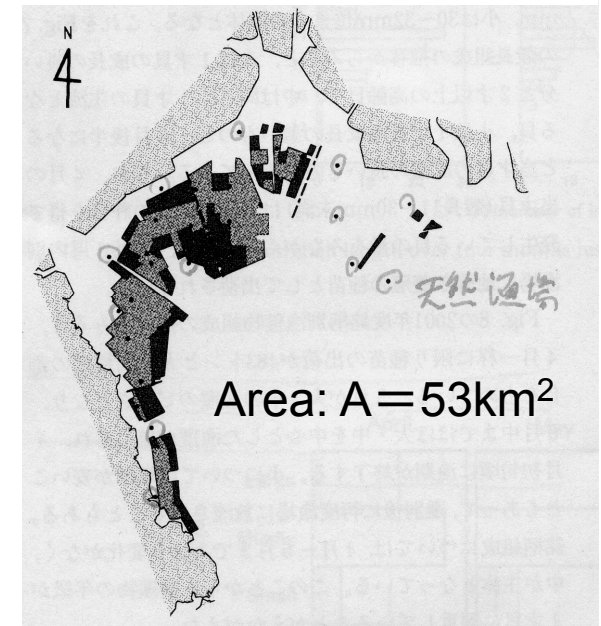
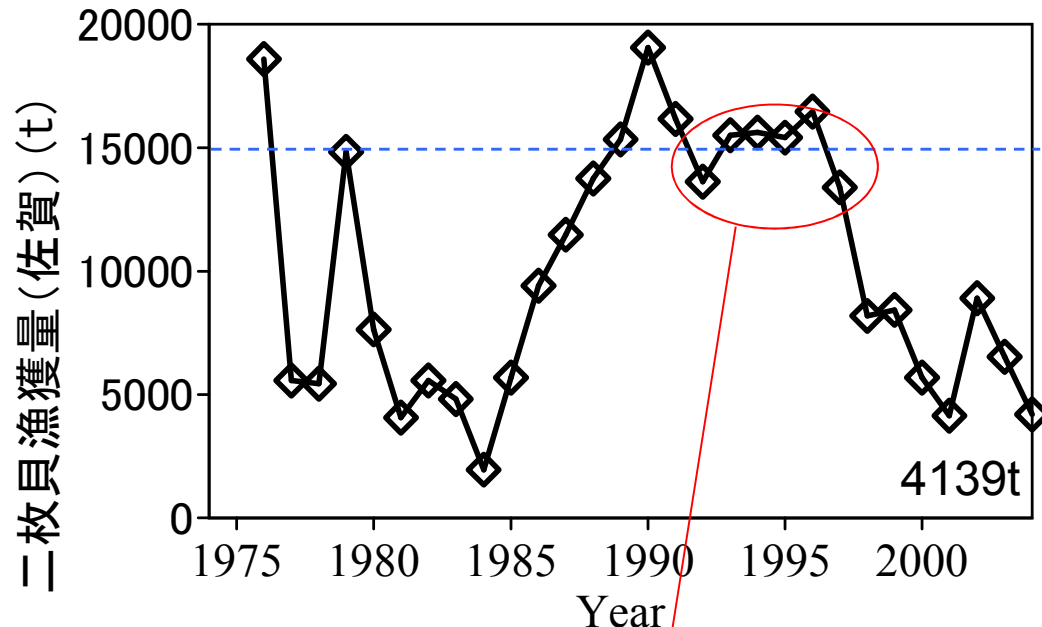
平成21～23年および平年の旬別降水量（佐賀地方気象台データ）



サルボウの漁獲量と早津江タワー昼間満潮時の低塩分延べ日数との関係



サルボウ濾水量変化の推定



有明海奥部のサルボウ漁場

サルボウ濾水量 (Nakamura, 2005)

$F = 1.6 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$: Oct. 2001

$F \times$ サルボウ漁場面積

$$F_a = F \times A = 86 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$$

1990s前半の濾水量推定値

$$F_a' = F_a / 4139(t) \times 15000(t) \\ = 310 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$$

1990年代前半には、有明海奥部のサルボウによる濾水量は、物理的な交換量の約2倍であった。

有明海奥部の容積

$$V = 2230 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$V / F_a' = 7.2 \text{ days}$$

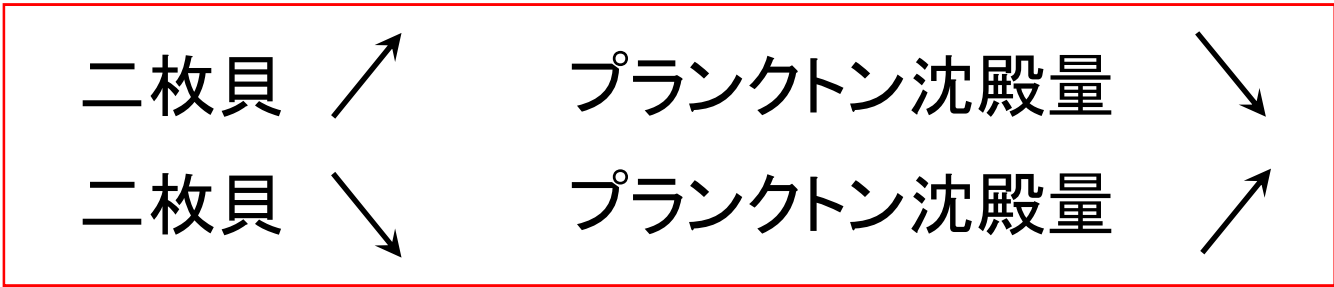
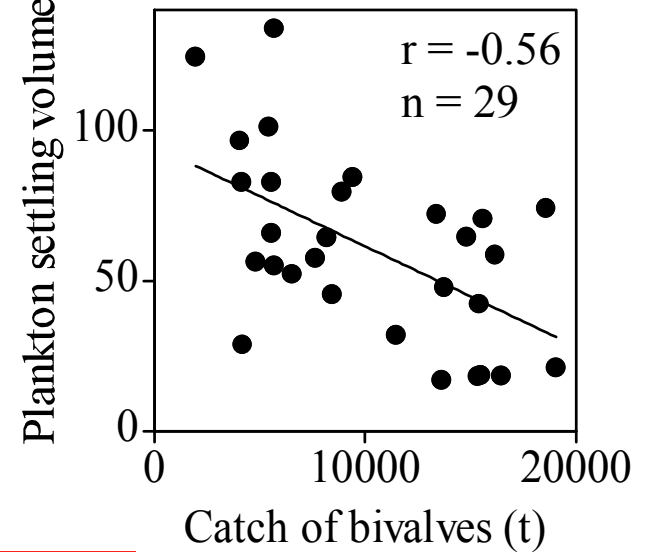
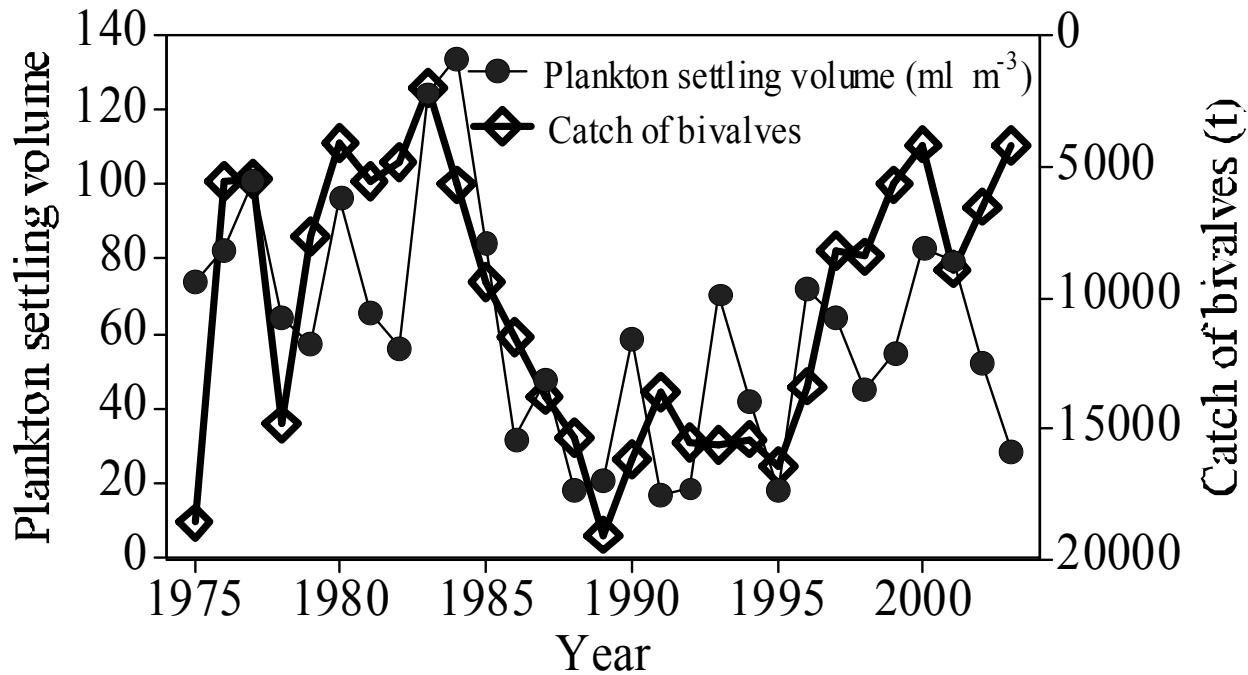
$$V / F_a = 25.6 \text{ days}$$

有明海奥部の淡水滞留時間(年平均) 15日

(Yanagi and Abe, 2005)

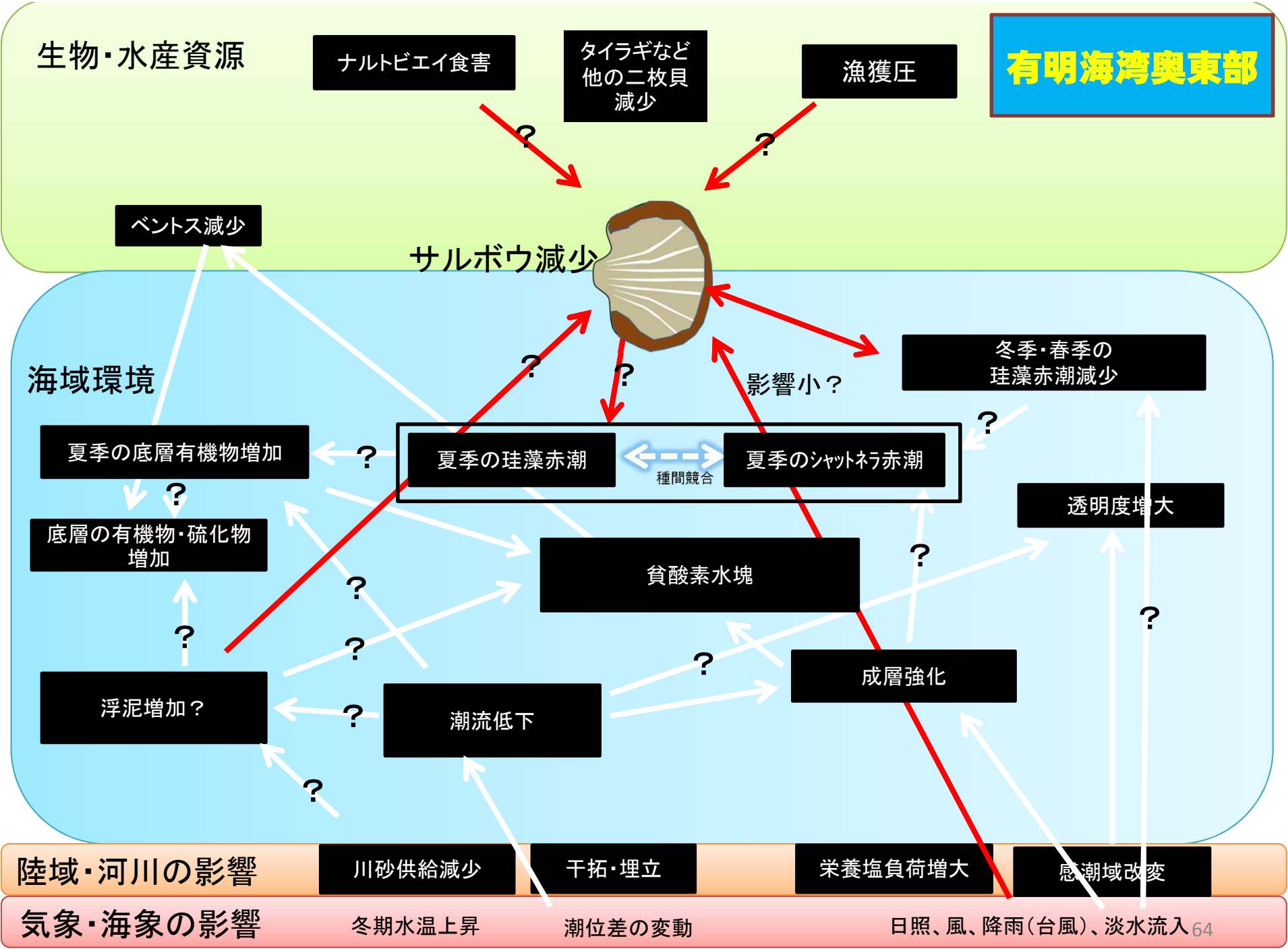
2000年代には濾水量は物理的な交換量の約1/2に

佐賀県海域の二枚貝漁獲量(9割以上サルボウ)と秋冬季のプランクトン沈殿量の関係



速水ら(2007)

有明海湾奥東部



有明海湾奥干潟域西部

生物・水産資源

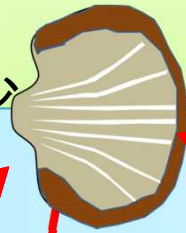
ナルトビエイ食害

タイラギなど
他の二枚貝
減少

漁獲圧

ベントス減少

サルボウ減少



海域環境

夏季の底層有機物増加?

底層の有機物・硫化物
増加?

浮泥増加?

夏季の珪藻赤潮

種間競合

夏季のシャットネラ赤潮

低温・淡水化

冬季・春季の
珪藻赤潮減少

透明度増大

陸域・河川の影響

川砂供給減少

干拓・埋立

栄養塩負荷増大

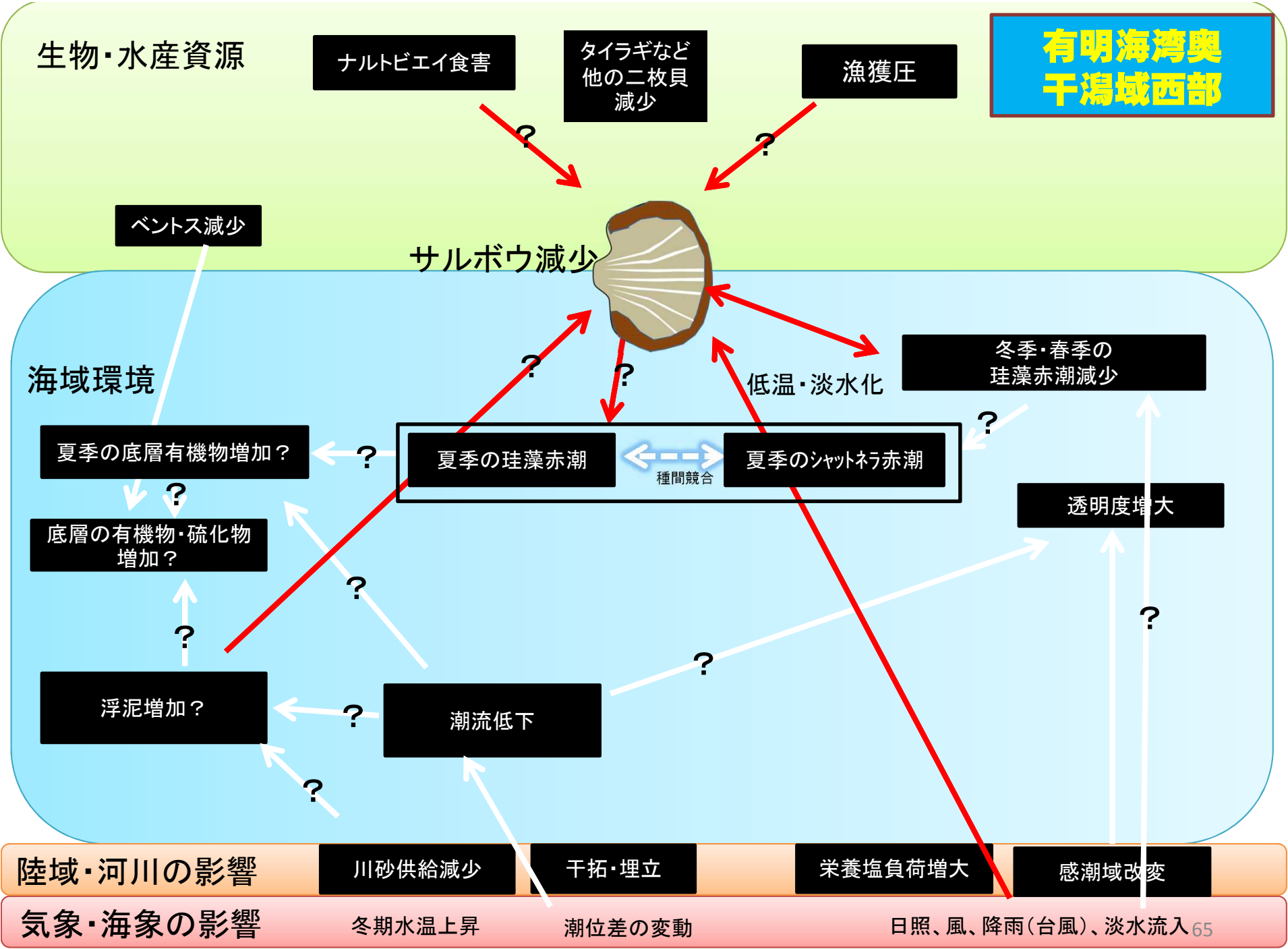
感潮域改変

気象・海象の影響

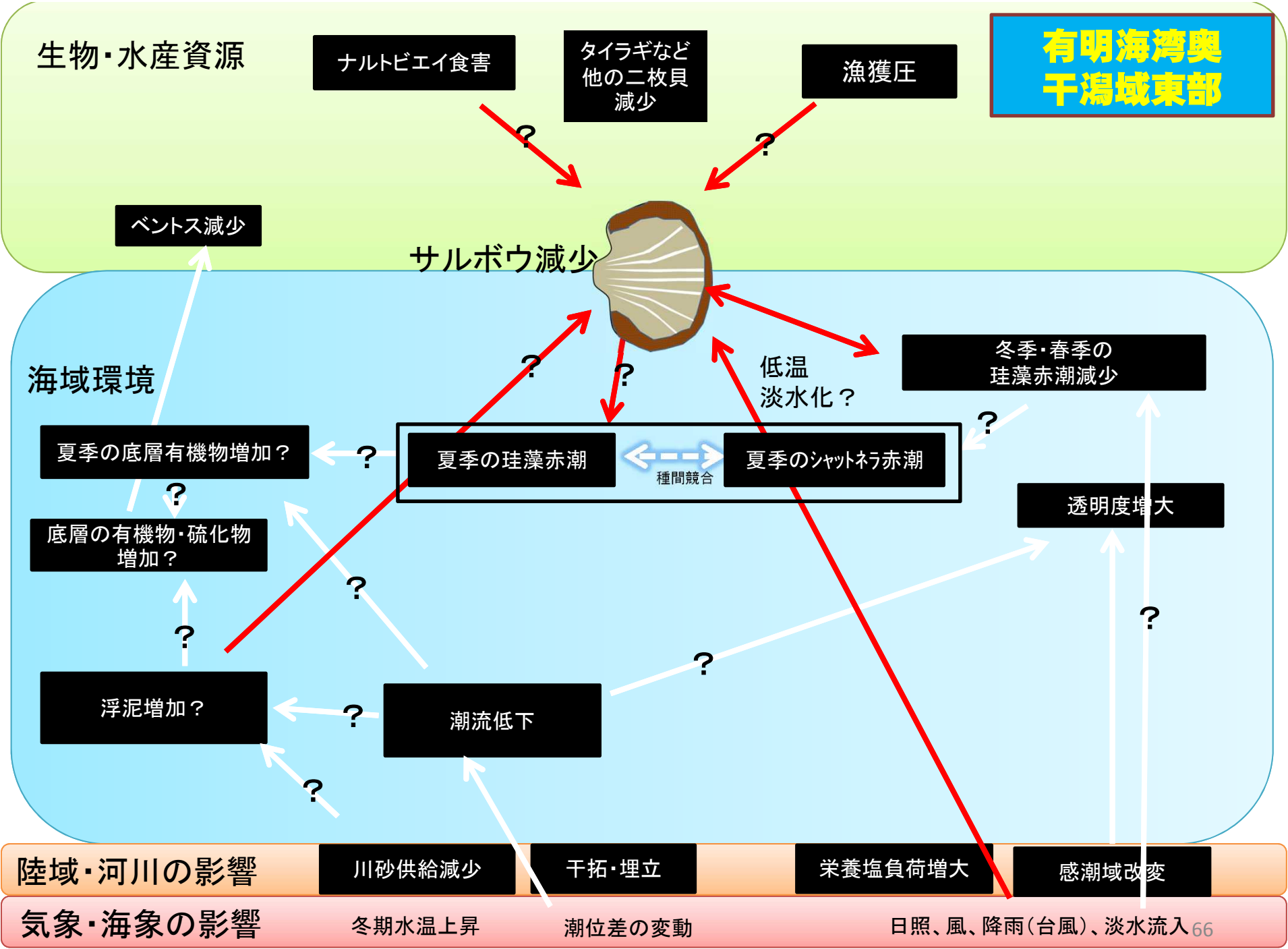
冬期水温上昇

潮位差の変動

日照、風、降雨(台風)、淡水流入⁶⁵

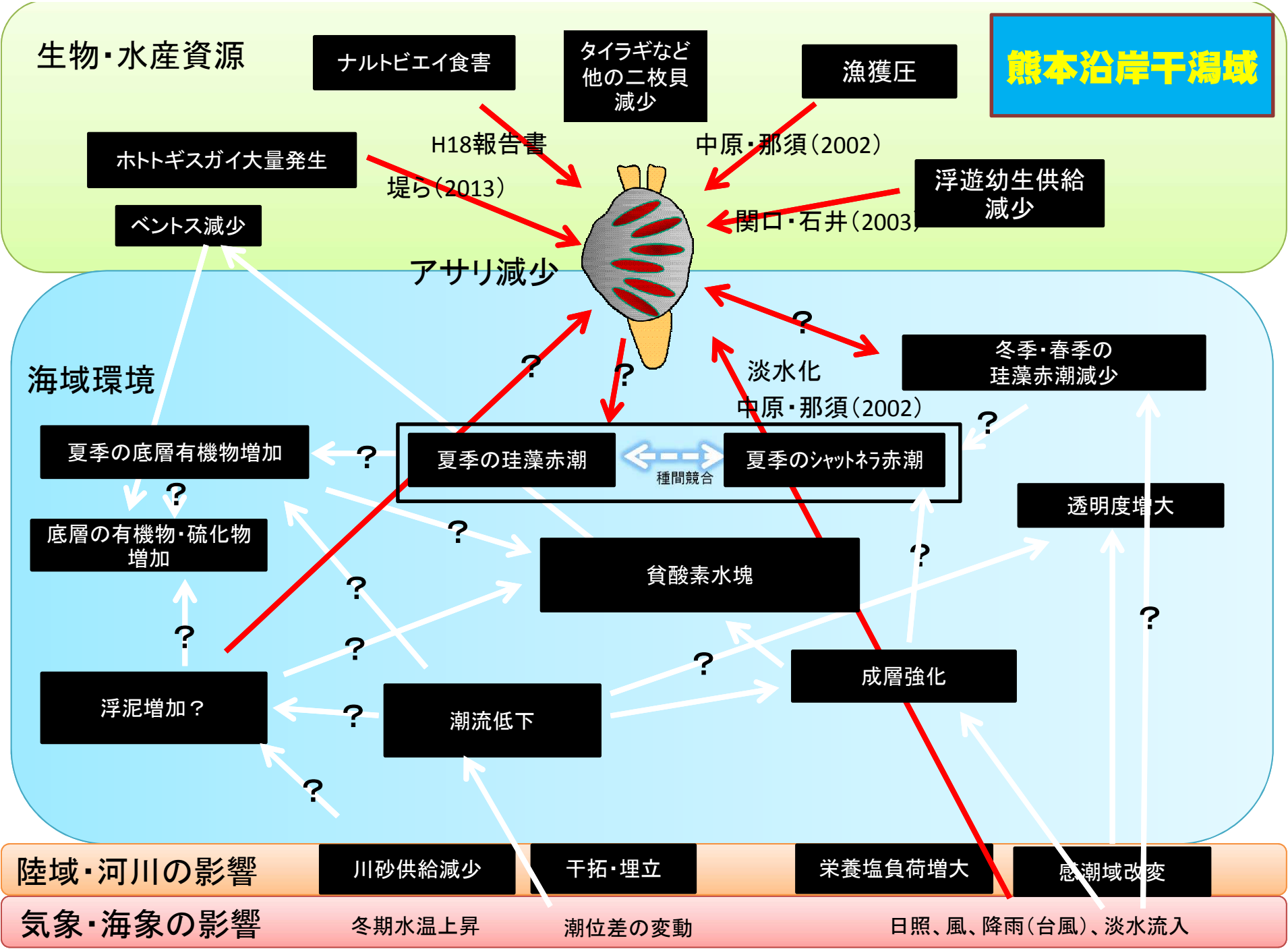


有明海湾奥干潟域東部



アサリ

熊本沿岸干潟域





ホトギスガイのマット下で還元化した底質

文献1

滝川清ほか（2003）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, 50, 1001-1005.

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・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), 66, 1136-1140.

田井明・酒井公大・齋田倫範・橋本彰博・矢野真一郎・多田彰秀・小松利光（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.

山本浩一ほか（2006）有明海奥部における表層底質の分布特性と底質環境の形成要因. 海岸工学論文集, 53, 961-965.

塚本達也・田中勝久・那須博史・松岡數充（2008）有明海の浮泥がタイラギに及ぼす影響. 水産増殖, 56(3), 335-342.

原田浩幸・滝川清（2000）生物攪乱と底泥性状が水質浄化機能に関係する微生物活性に与える影響. 海岸工学論文集, 47, 1131-1135.

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.

文献2

Yoshino et al (2010) Effects of hypoxia and organic enrichment on estuarine macrofauna in the inner part of Ariake Bay. *Hydrobiologia*, . 652, 23–38.

Hayami Y., Maeda K., and Hamada T. (2014) Long term variation in transparency in the inner area of Ariake Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, doi:10.1016/j.ecss.2014.11.029.

徳永貴久・田井明・木元克則(2013)有明海湾奥西部の干潟縁辺域におけるDO経年変動特性. *土木学会論文集B3(海洋開発)*, 69, 1018-1023.

荒巻裕・大隈斉(2011):有明海佐賀県海域で2010年夏季に発生したタイラギ1歳貝の大量斃死について. *佐有水研報*, 25, 1-7.

郡司掛博昭ほか(2009)低酸素海水に反復暴露したリシケタイラギ(*Atrina lischkeana*)の浮上行動とへい死. *九大農学芸誌*, 64, 19-22.

塚本達也(2009)有明海における水産重要二枚貝リシケタイラギおよびサルボウの環境生理学的研究. 博士学位論文, 長崎大学, 128pp.

岡村和麿・田中勝久・木元克則・藤田孝康・森勇一郎・清本容子(2010)有明海北西部における貧酸素水塊と底質がサルボウの大量斃死に与える影響. *沿岸海洋研究*, 74, 194-207.

Yoshino K, Katano T, Ito Y, Hamada T, Fujii N, Hayami Y (2014) Community assembly by limited recruitment in a hypoxia-stressed soft bottom: a case study of macrobenthos in Ariake Bay. *Plankton & Benthos Research* , 9, 57-66.

文献3

金子健司ほか(2011)三河湾におけるサルボウの初期成長に及ぼす貧酸素の影響. 水産工学, 48, 109-116.

宮本康・初田亜希子(2008)塩分と水温に応じたサルボウ(*Scapharca kagoshimensis*)の濾過速度と生残率の変化. LAGUNA(汽水域研究), 15, 13-18.

Nakamura, Y(2005) Suspension feeding of the ark shell *Scapharca subcrenata* as a function of environmental and biological variables. FISHERIES SCIENCE, 71, 875–883.

柳哲雄・阿部良平(2005)有明海奥部における塩分とDIP・DIN収支の経年変動. 海の研究, 14 (1), 21 – 33.

速水祐一ほか(2007)有明海奥部における物質輸送と低次生態系の動態について-2年目の成果-. 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, 3, 71-80.

中原康智・那須博史(2002)主要アサリ生産地からの報告-有明海熊本県沿岸. 日本ベントス学会誌, 57, 139-144.

堤裕昭、野村龍之介、田上貴文、小森田智大、岩崎敏治、藤森隆美(2013)砂質干潟におけるホトギスガイの泥状のマット形成と基質攪拌によるマット破壊が底生生物群集の季節変動に及ぼす影響. 日本ベントス学会誌, 67, 47-55.

関口秀夫、石井亮(2003)有明海の環境異変 有明海アサリ漁獲量激減の原因について. 海の研究, 31, 241-245.