有明海再生機構主催
有明海市民講座

平成27年6月10日（水）

第8回

有明海異変の解明3
貧酸素発生に与える環境変化

有明海再生機構　顧問

荒牧 軍治

この有明海市民講座の実施に当たっては「福岡都市圏広域行政事業組合流域連携基金」の助成を受けて実施いたしております。

有明海で貧酸素が起こる理由を探る

有明海に流入する有機物・栄養塩

横ばい、むしろ減少傾向

干拓・締切などの陸域の変化

諫早湾締切

外海の干満差の減少

潮位・潮流速の低下

掃流力の低下

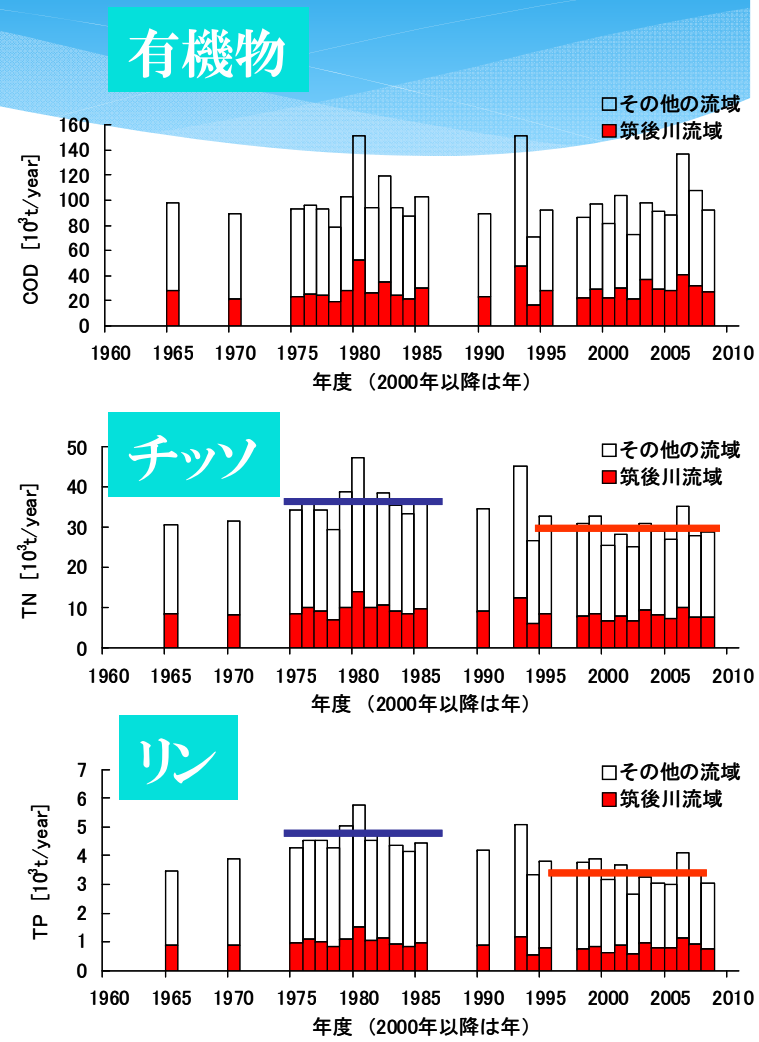
透明度の上昇

赤潮の増加

上下撹拌力の低下

成層化増進

貧酸素

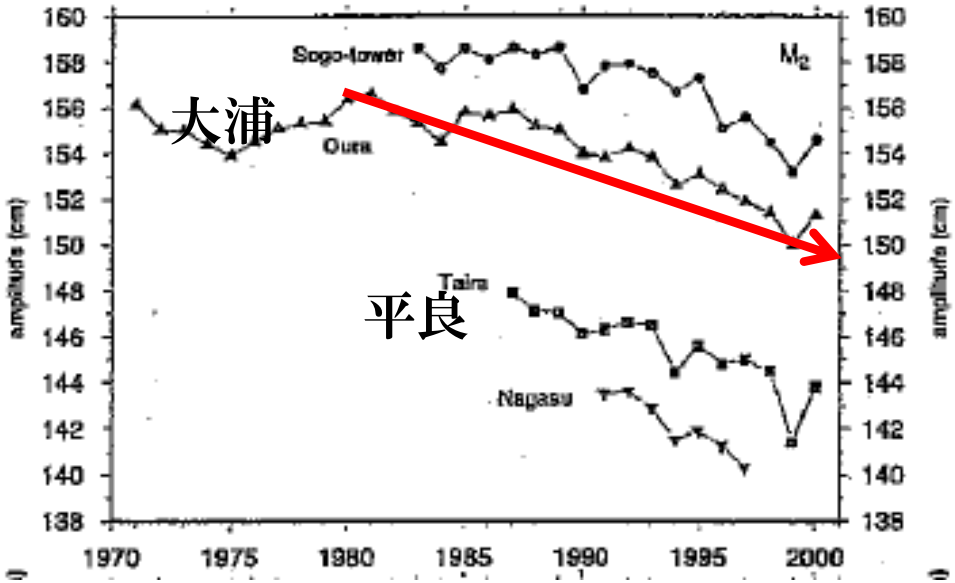


有明海に流入する有機物・栄養塩

提案された有明海モデル → 諫早干拓締切の影響を探る

fの影響を除外したM2分潮振幅

長期的に減少している



fの影響を除外したM2分潮振幅

諫早湾締切の影響　両論併記

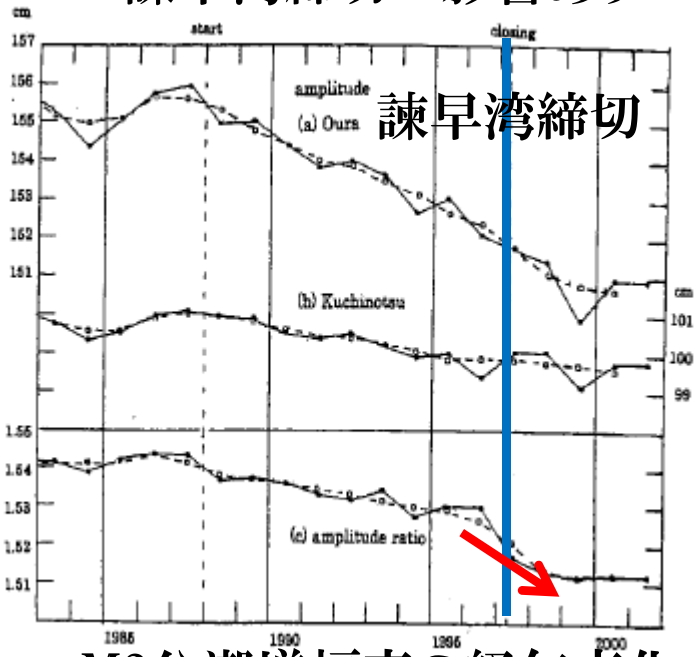
大浦の振幅 / 口之津の振幅 ＝増幅率

諫早湾締切の影響あり

大浦

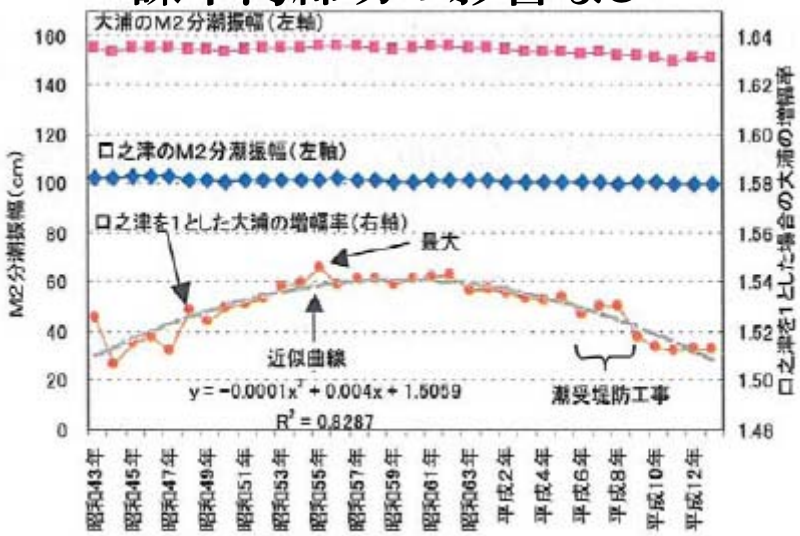
口之津

増幅率



M2分潮増幅率の経年変化

諫早湾締切の影響なし



M2分潮増幅率の経年変化

田井明氏研究論文(2010.1)

外海を基準とした増幅率

験潮所　有明海　大浦　三角　口之津
外海　長崎　福江　枕崎

増幅の大きいM2、S2潮

1967年～2007年

締切直後減少

f値と逆位相で変動

長期的変化

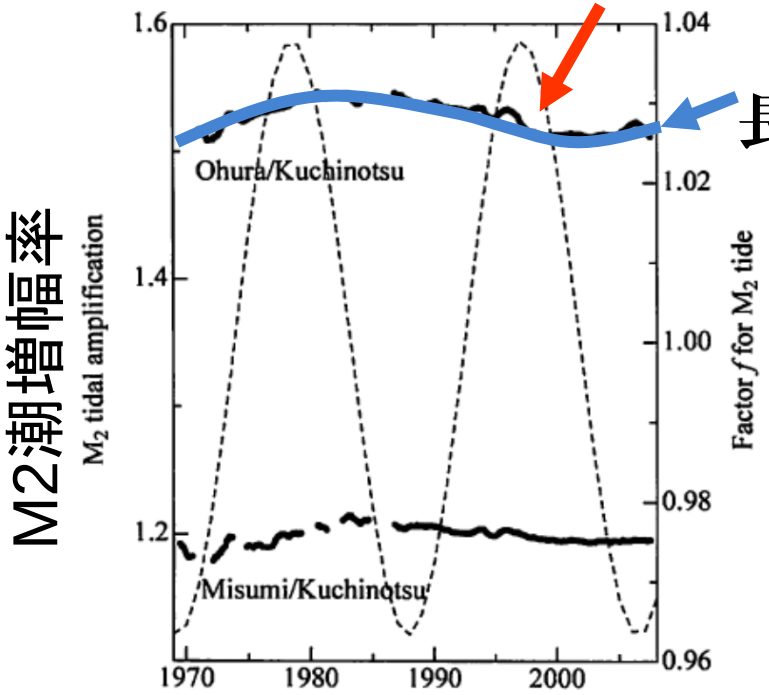


Fig. 2.8　口之津に対する大浦と三角の M_2 潮増幅率の時間変動

湾口口の津に対する大浦　三角

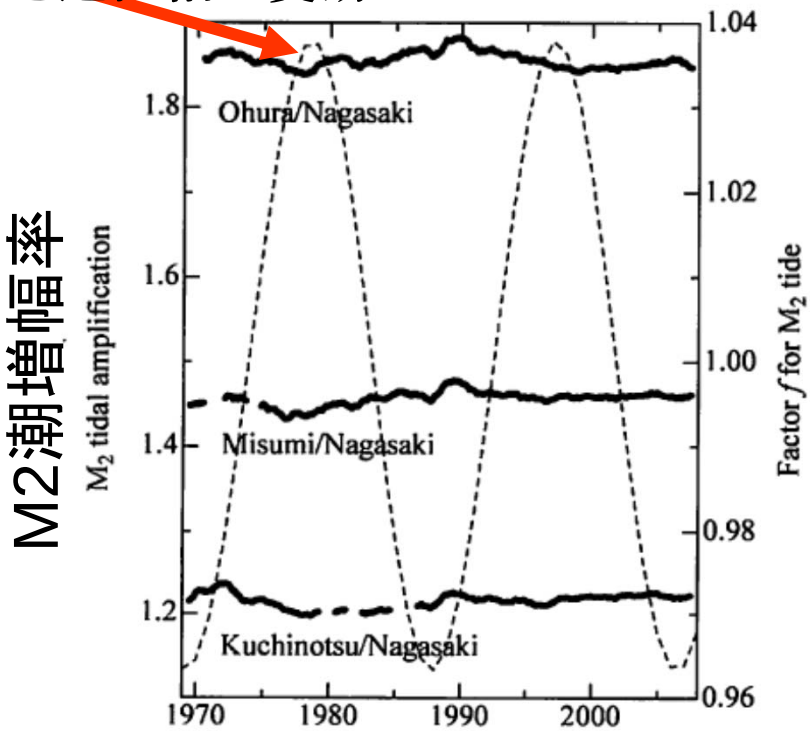


Fig. 2.9　長崎に対する有明海内の M_2 潮増幅率の時間変動

外海長崎に対する大浦　三角

大浦の潮位に与えた影響

1980頃年から2006年までの長期低下
（fと諫早の影響を除いたもの）　**3.5cm**

諫早干拓の影響　**1.5cm**

18．6年周期の最大と最小　**7cm**

有明海湾奥部の干拓　**1.3cm**

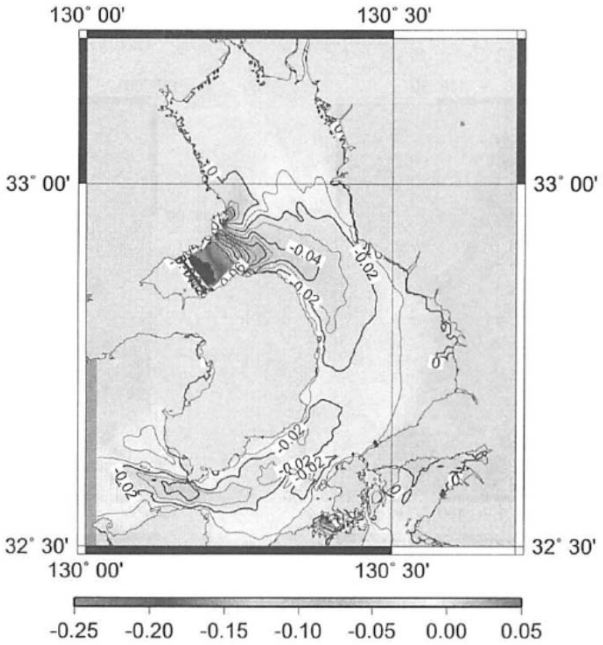


Fig. 5.19　1980 年代から 2000 年代の M_2 潮潮流振幅の変化量（m/s）

表6．5-2　大浦験潮所におけるM2分潮の潮位振幅に与えた諫早湾締切の影響

	18．6年周期	外海における長期的減少	諫早湾締切	有明海湾奥部の干拓
1978（18．6年周期の最大）年と2006年（18．6年周期の最小）の潮位差に与えた影響	58%	29%	13%	0%
1900年代から2000年代までの有明湾奥部の干拓と諫早湾干拓の影響	―――	―――	54%	46%
1980年代から2000年代にかけての長期的減少の影響	―――	70%	30%	―――

有明海モデルの最も重要なもの　流速

九州大学モデル

開境界に0.75mの起潮力

1900年代
1960年代
1980年代
2000年代

潮流速
成層強度

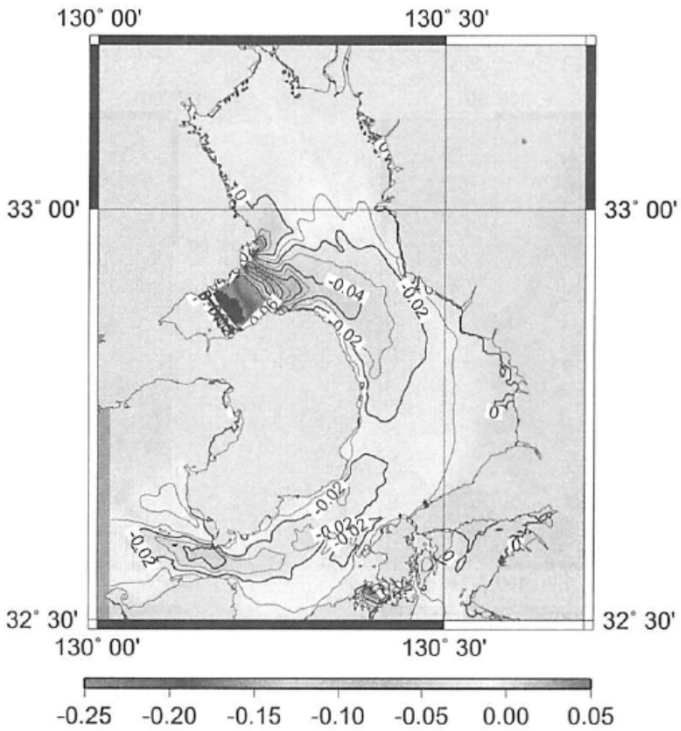
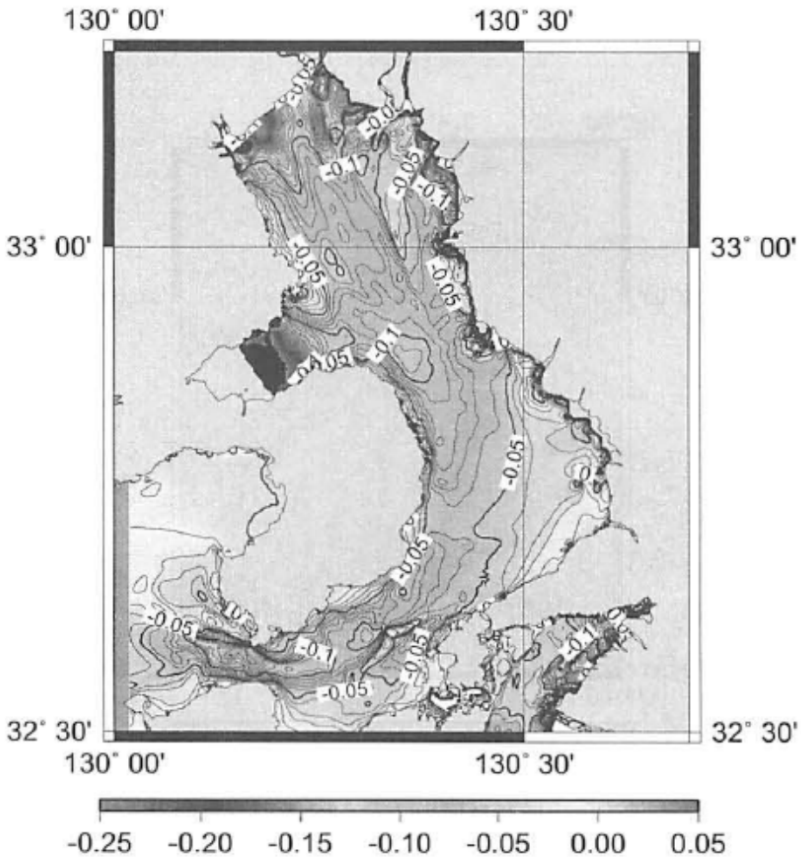


Fig. 5.19　1980 年代から 2000 年代の M_2 潮潮流振幅の変化量（m/s）

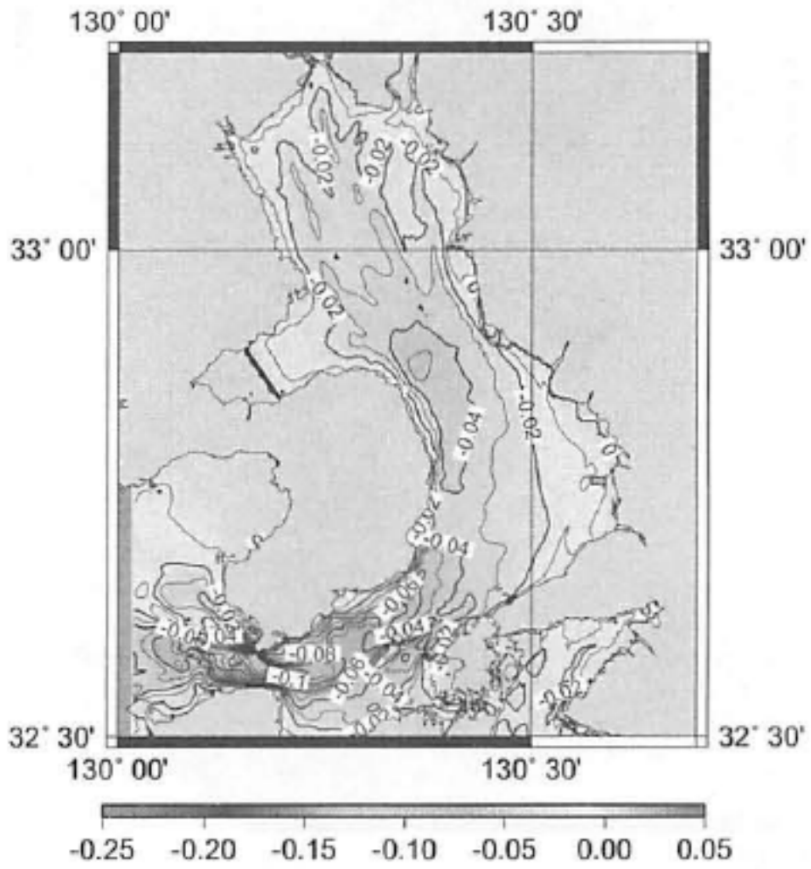


1980→2000　M2潮潮流振幅の変化量

1900→2000　M2潮潮流振幅の変化量

●湾奥部は1980年代までに行われた干拓による海岸線の変化、諫早湾内では、諫早湾潮受け堤防締め切りの影響で流速が減少している

●湾奥部の流速の変化に関しては諫早湾潮受け堤防よりf値の変動による影響が大きい



f値極大→極小
M2潮潮流振幅の変化量

有明海の環境はどう変化してきたか（長期的）

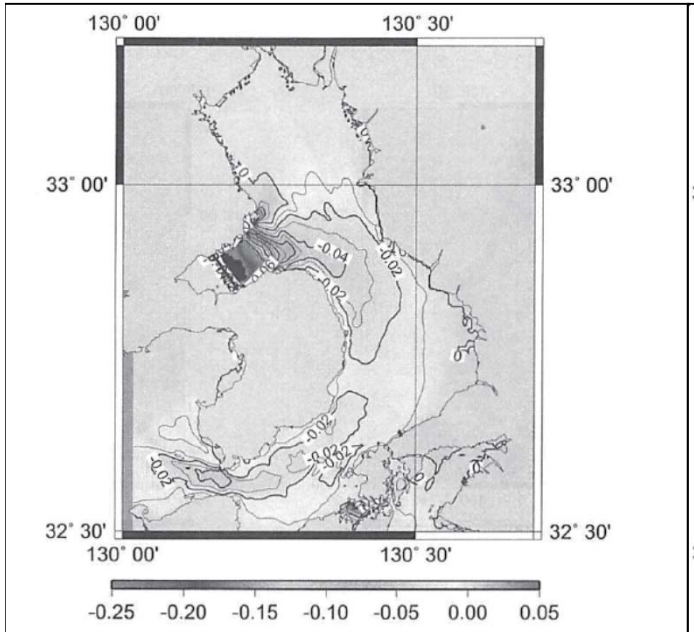
事実の確認

流速の変化

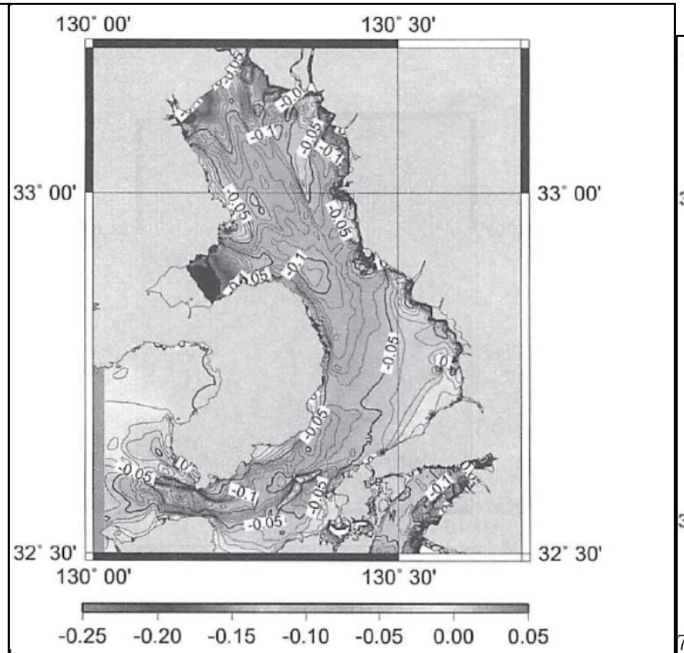
①諫早湾締切によるM2分潮潮流速変化は、諫早湾と大浦・島原半島沖に限られている。（18.6年周期の最大値周辺で計算しているので、この差は締切による影響だけだと考えて良い）（5cm/s～10cm/s程度）

②有明海湾奥部の潮流速の減少は、1900年代（明治30年代）以降続けられてきた大規模干拓の影響であると考えて良い。（諫早湾外では1cm/s～4cm/s程度）

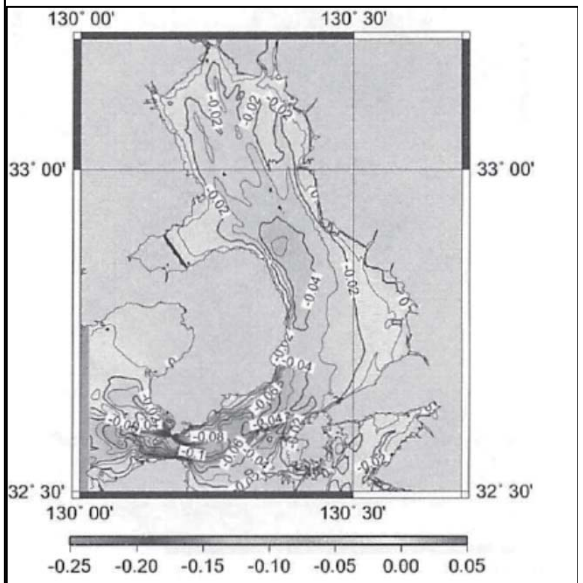
③18.6年周期による潮流速の差は、有明海湾奥部で最大2cm/s程度である



1980 年から 2000 年代の M_2 潮潮流振幅幅の変化量 (m/s)



1900 年から 2000 年代の M_2 潮潮流振幅幅の変化量 (m/s)



74　f 値の極大値から極小値の M_2 潮潮流振幅の変化量 (m/s)

長期的な環境変化による貧酸素水塊の数値実験

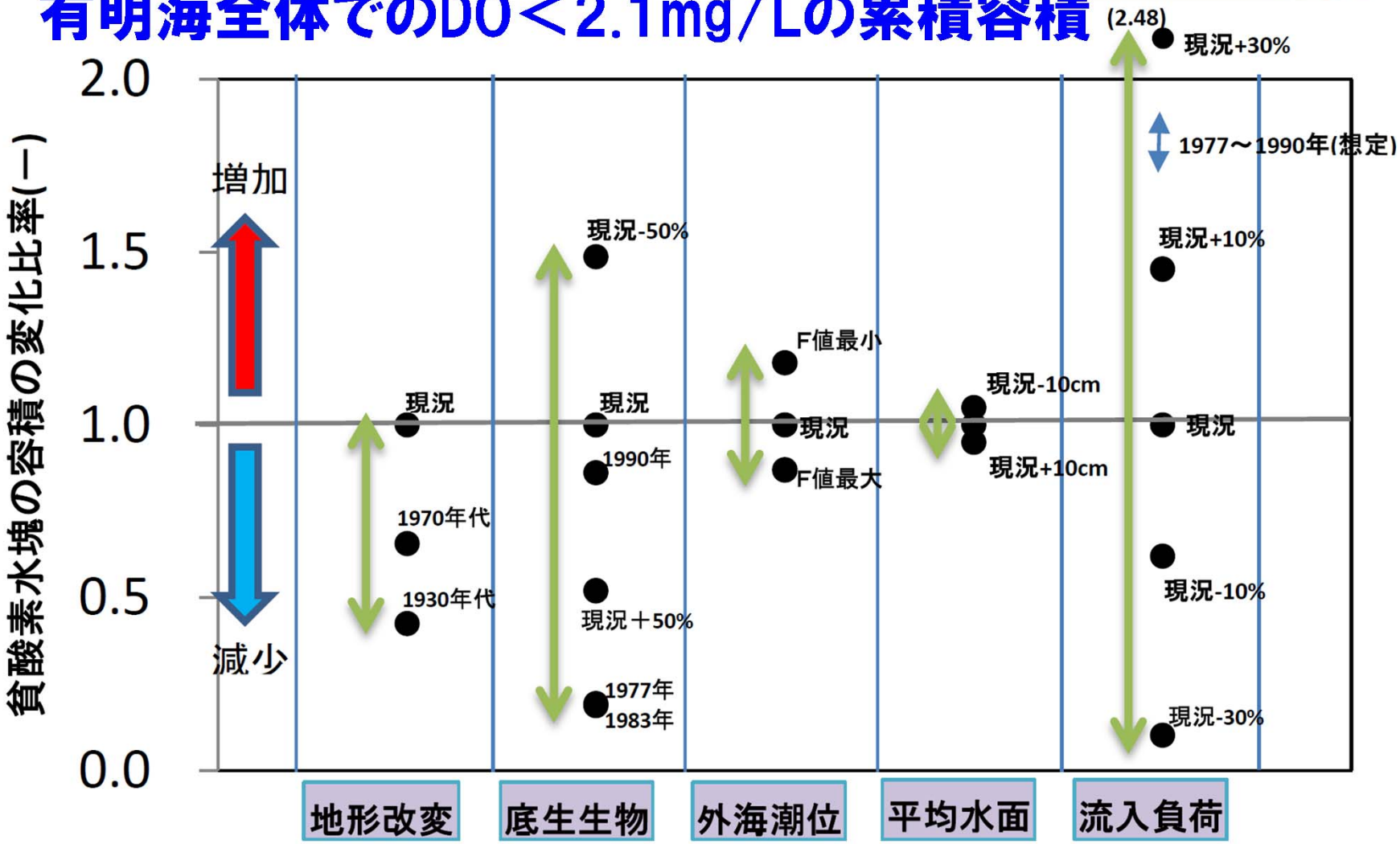
■検討の目的

- 有明海は地形改変や二枚貝類の激減など、とりまく環境が大きく変化した内湾のひとつであるが、近年貧酸素水塊の発生が拡大・長期化していることが指摘されている。
- 現況が再現されたモデルを用いて、過去の外力条件を想定した数値実験を行い、長期的な環境変化の結果として貧酸素水塊の発生状況がどのように変化し、また何が重要な要因であるのかを推定した。
- さらに、必要な感度解析を行い、貧酸素水塊の発生に重要な役割を果たす要因の解析を行った。

個別要因の影響度

JSTモデルによる解析

有明海全体でのDO＜2.1mg/Lの累積容積



■検討ケース

1. 1930年代
2. 1977年
3. 1983年
4. 1990年
5. 2001年(現況ケース)

■以下の条件を各年代の値として設定

a)地形, b)外海潮位振幅, c)平均水位, d)流入負荷量,

e)二枚貝類の生息量,

f)ノリ養殖量および施肥・酸処理材の使用量,

g)水質・底質初期値

気象・淡水流入量は現況と同じ

いであ株式会社

■計算条件

予測ケース / 予測条件	1930年代	1977年	1983年	1990年	2001年
計算年次	1930年代	1977年	1983年	1990年	2001年
地形	1930年代	1970年代後半	1970年代後半	1970年代後半	2000年代
平均水面	0.0cm	-8.2cm	-8.9cm	-5.9cm	0.0cm
気象条件	**2001年**	**2001年**	**2001年**	**2001年**	**2001年**
河川流量	**2001年**	**2001年**	**2001年**	**2001年**	**2001年**
潮位振幅	**2001年**	1977年	1983年	1990年	2001年
負荷量(L-Q式)	1930年代	1977年	1983年	1990年	2001年
ノリ養殖量	なし	1977年	1983年	1990年	2001年
底生生物	1930年代	1977年	1983年	1990年	2001年

1930年代については、平均水面、潮位、負荷量、底生生物は現況と同じとし、地形およびノリ(養殖無し)のみ変更した。

　　は現況と同じ条件

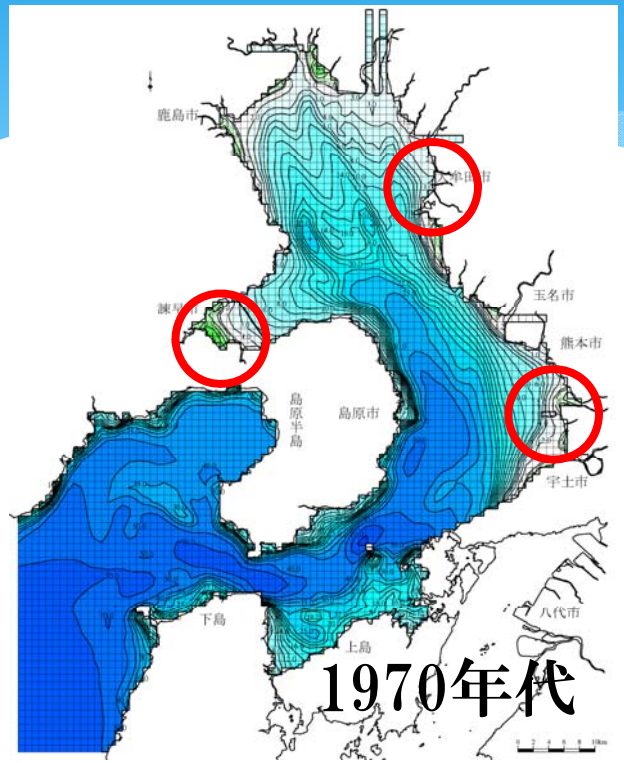
いであ株式会社

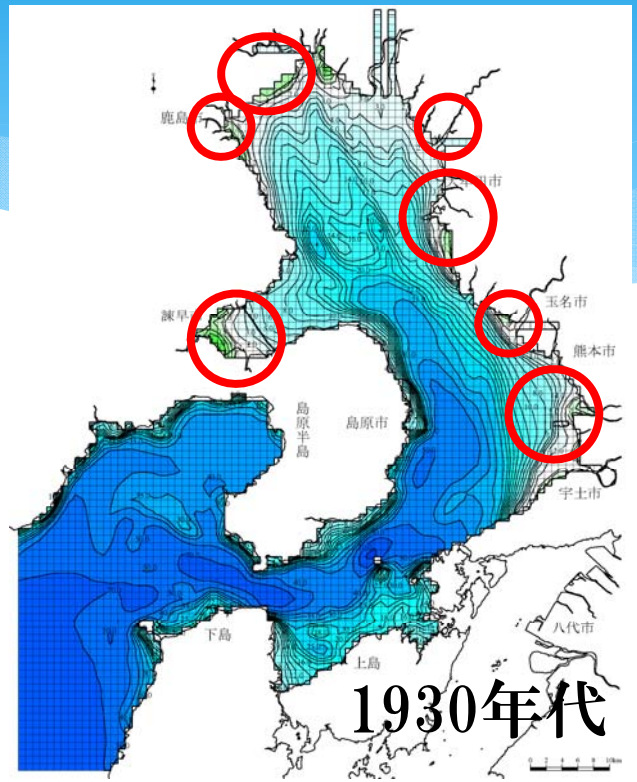
計算条件

計算条件	1930s	1950s	1977	1983	1990	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
2001年対比														
海域面積	1.043	1.043	1.024	1.024	1.024	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
F値(M2分潮)	1.000	1.000	1.030	0.992	0.972	1.012	1.000	0.988	0.976	0.967	0.961	0.959	0.961	0.967
淡水流入量	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.883	1.000	0.817	1.184	1.070	0.849	1.425	0.929	1.095
COD 負荷量	0.630	0.800	1.040	1.052	1.035	0.785	1.000	0.703	0.947	0.879	0.851	1.325	1.041	0.889
TN 負荷量	0.460	0.590	1.209	1.248	1.215	0.904	1.000	0.894	1.093	1.025	0.952	1.240	0.987	1.015
TP 負荷量	0.490	0.630	1.164	1.284	1.268	0.857	1.000	0.723	0.883	0.824	0.812	1.113	0.915	0.826
IN 負荷量	0.480	0.630	1.206	1.247	1.215	1.011	1.000	1.011	1.189	1.113	0.968	1.249	0.932	1.101
SS 負荷量	2.000	1.500	1.021	1.130	1.198	0.364	1.000	0.340	0.762	0.640	0.659	1.735	1.298	0.685
ノリ生産量(N)	0.011	0.108	0.521	0.664	0.568	0.503	1.000	0.858	0.812	0.987	1.071	1.010	1.087	0.925
酸処理剤使用量(P)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.268	0.787	1.000	0.780	1.093	0.973	0.932	1.174	1.148	1.111
施肥量(N)	0.000	0.000	6.123	2.809	0.096	2.909	1.000	3.893	3.334	2.854	1.764	0.318	0.000	1.381
懸濁物食者(C)	3.016	2.886	4.354	3.762	1.445	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
アサリ	2.010	1.846	1.635	1.151	1.441	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
その他	6.834	6.834	14.678	13.674	1.461	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2001年との差														
平均水面 [cm]	-9.1	-9.1	-8.1	-8.9	-5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

長期的な環境変化による貧酸素水塊の数値実験

■計算条件（地形）



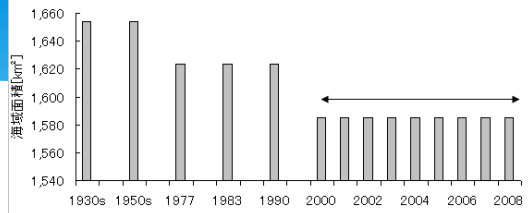


諫早干拓の有無
熊本新港の有無
海底地形の変化（三池港付近）

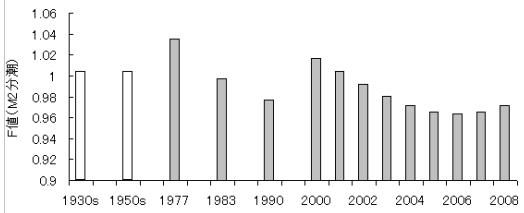
白石干拓の有無
塩田川河口、矢部川河口、菊地川河口での地形改変

計算条件

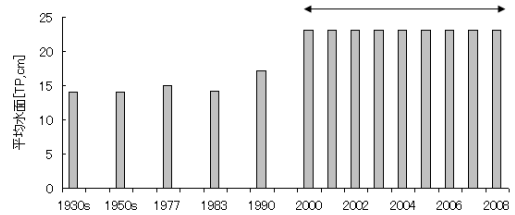
地形条件
（海域面積）



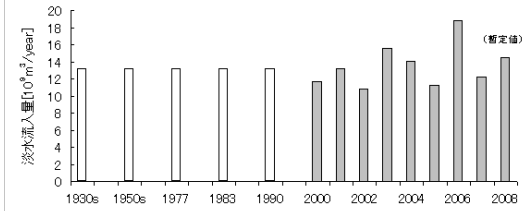
F値



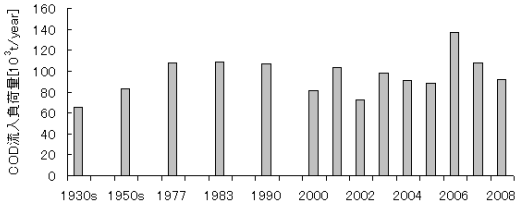
平均水面



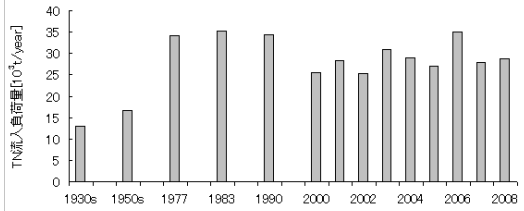
淡水流入量



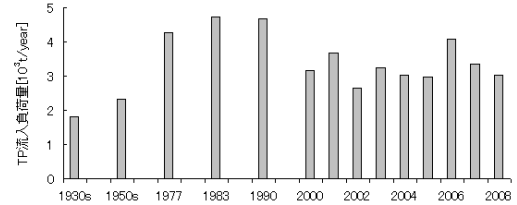
COD流入負荷量



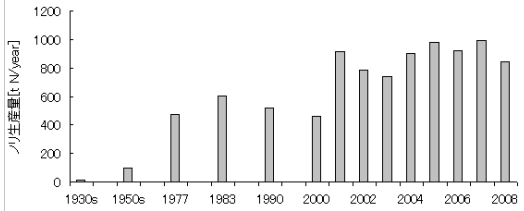
TN流入負荷量



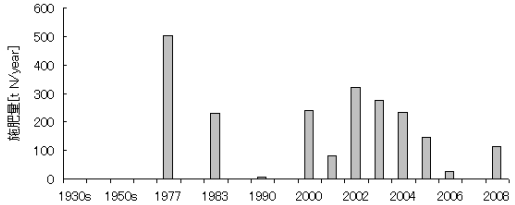
TP流入負荷量



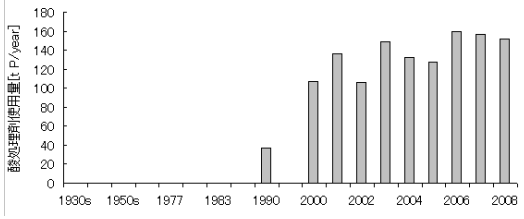
ノリ生産量



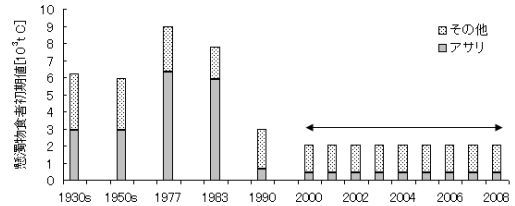
施肥量



酸処理剤
使用量

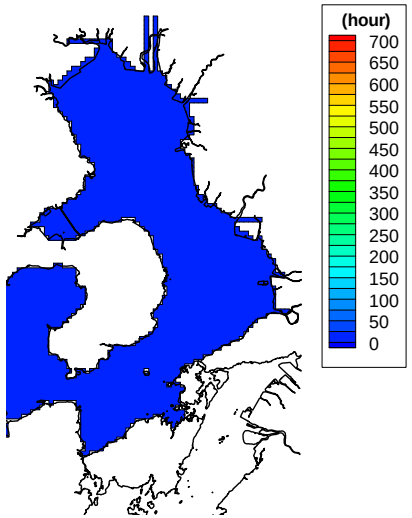


懸濁物食者
初期値

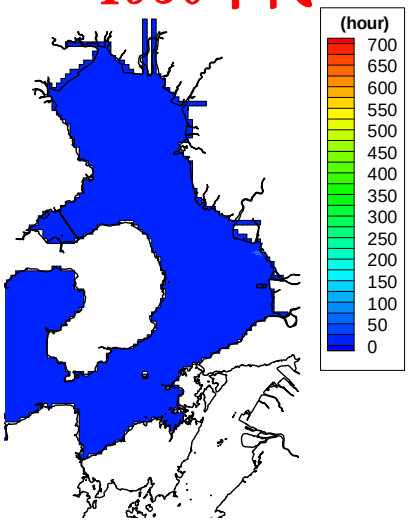


1930～2000年代の貧酸素発生規模

1930年代

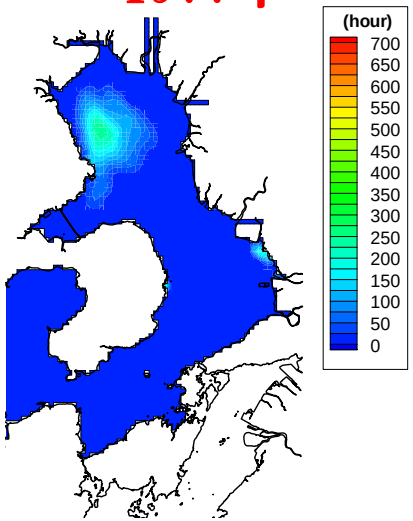


1950年代

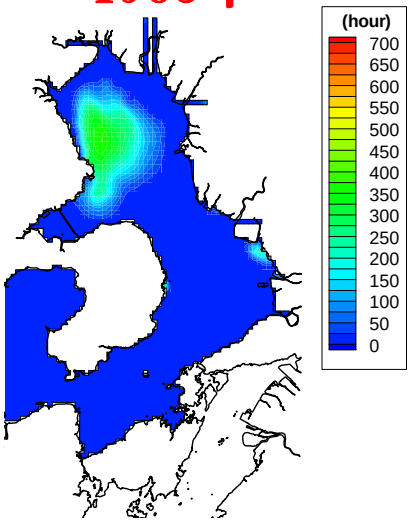


DO＜2.1mg/Lの継続時間
（年間累積値）

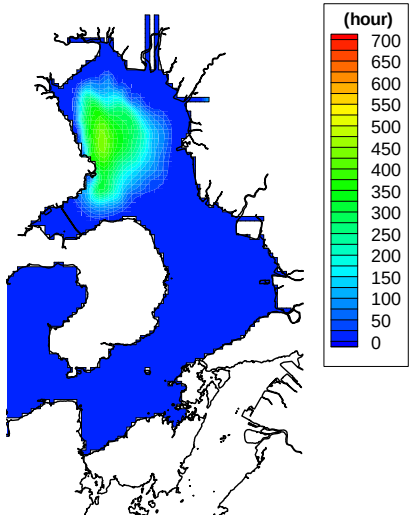
1977年



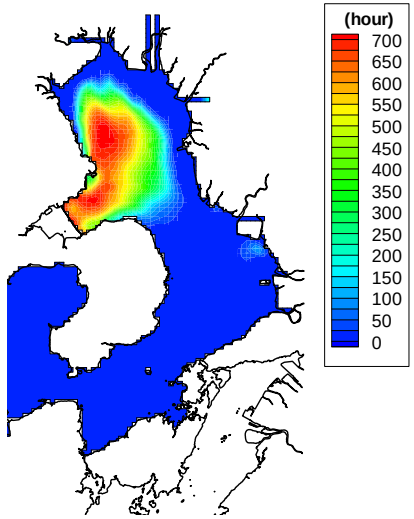
1983年



1990年

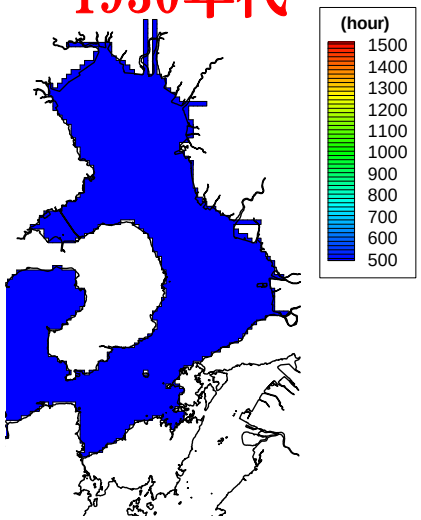


2001年

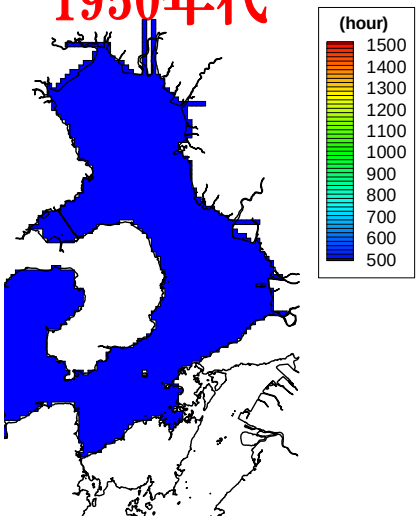


1930～2000年代の貧酸素発生規模

1930年代

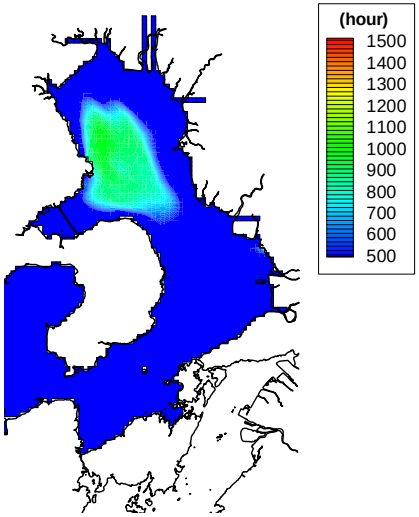


1950年代

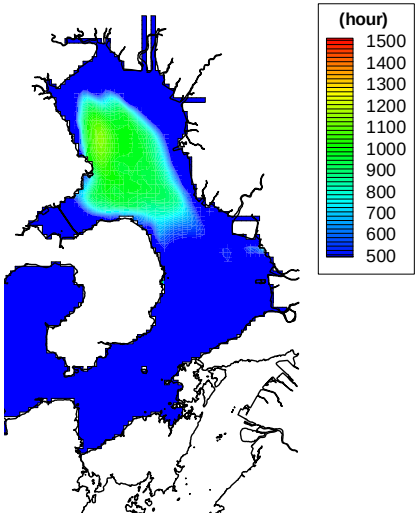


DO＜4.3mg/Lの継続時間
（年間累積値）

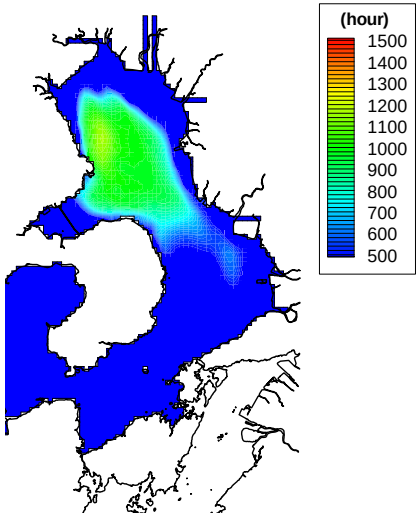
1977年



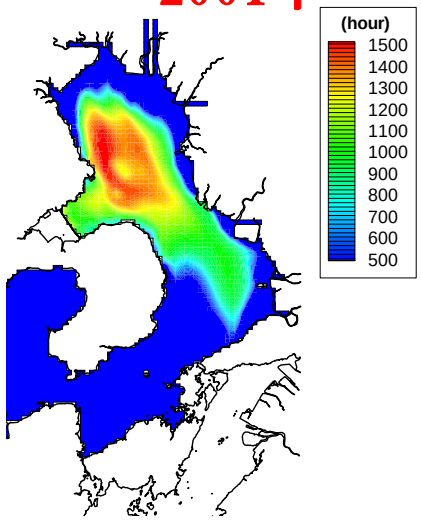
1983年



1990年

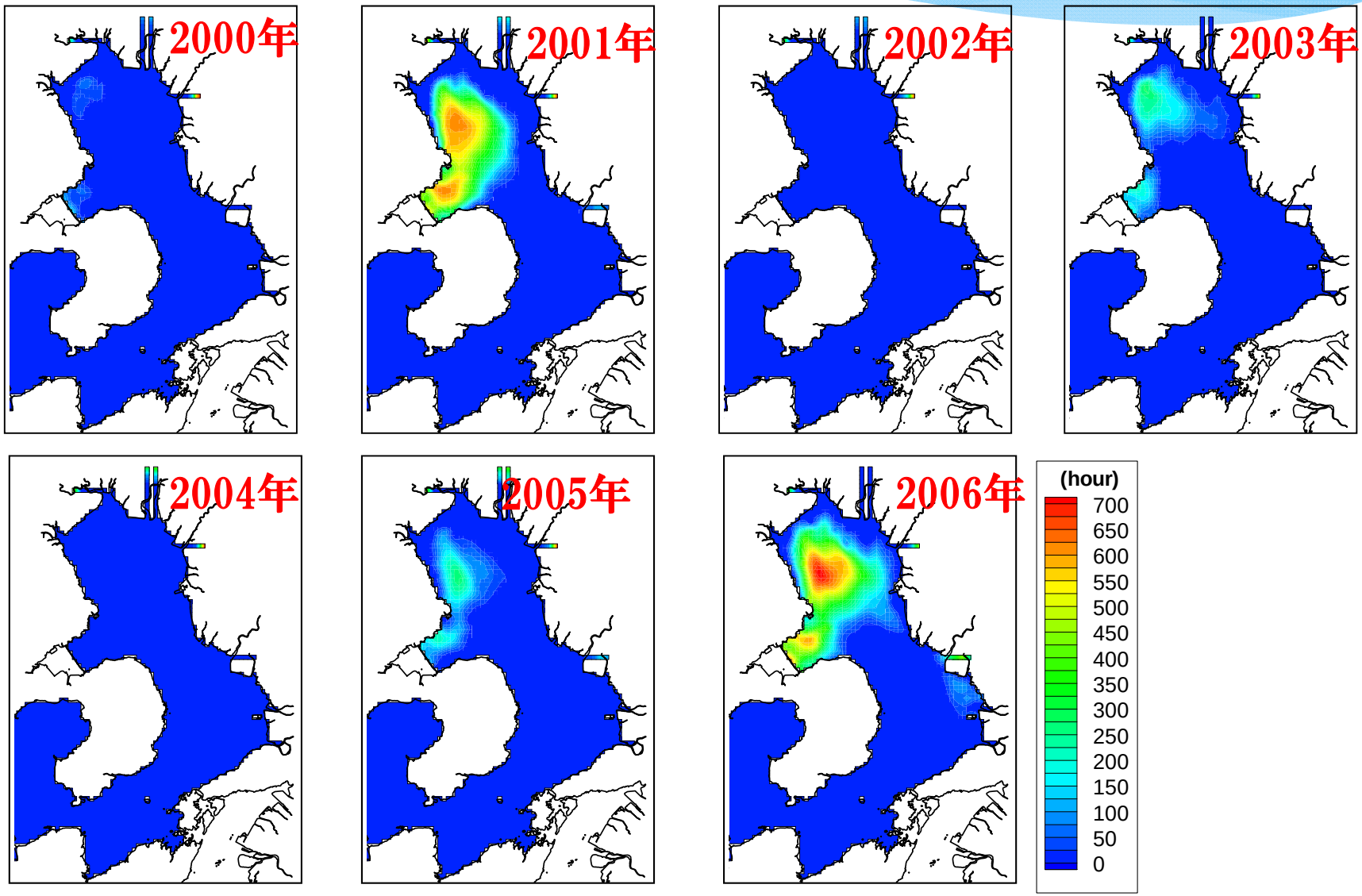


2001年



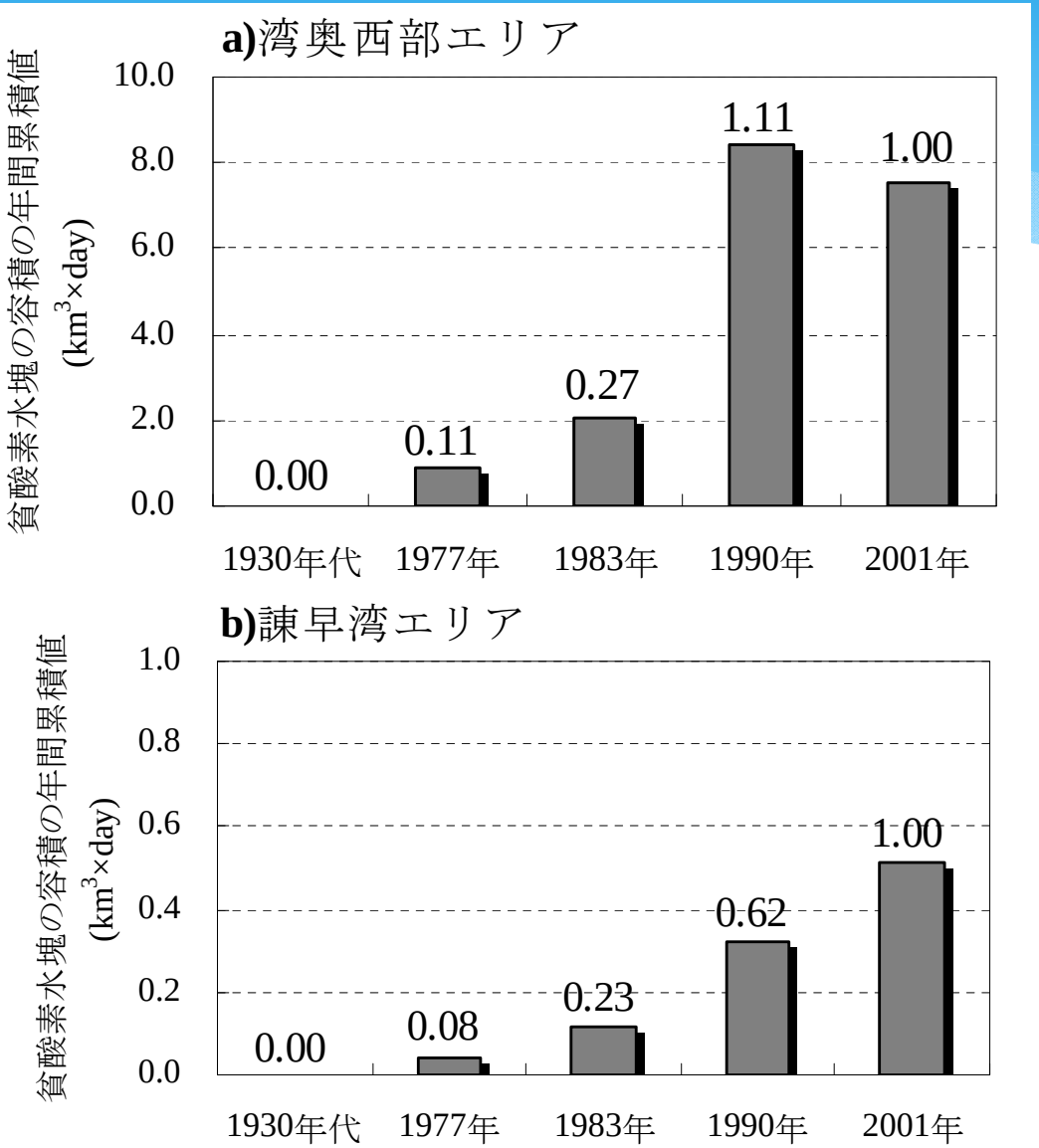
2000～2006年の貧酸素発生規模

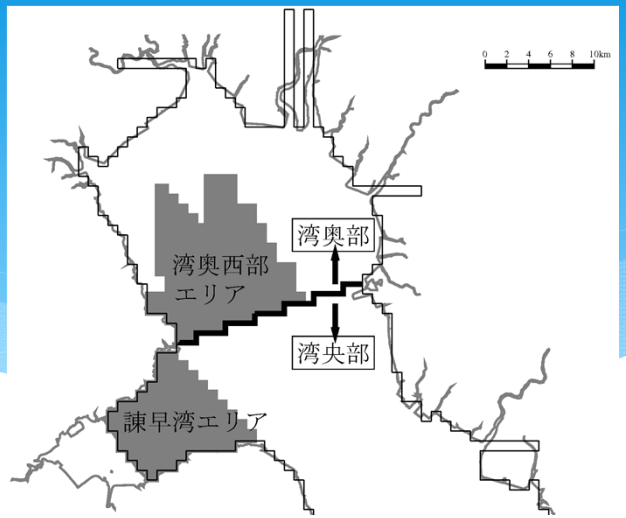
- DO＜2.1mg/Lの継続時間（年間累積値）



長期的な環境変化による貧酸素水塊の数値実験

■貧酸素水塊の発生規模

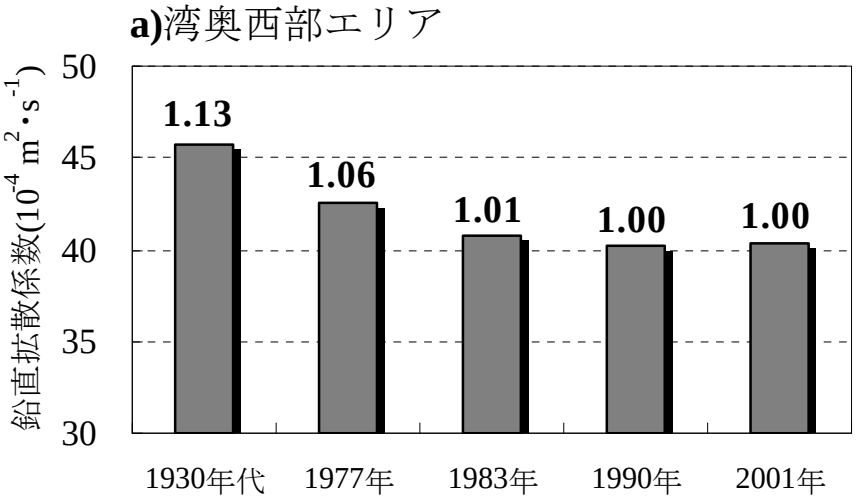


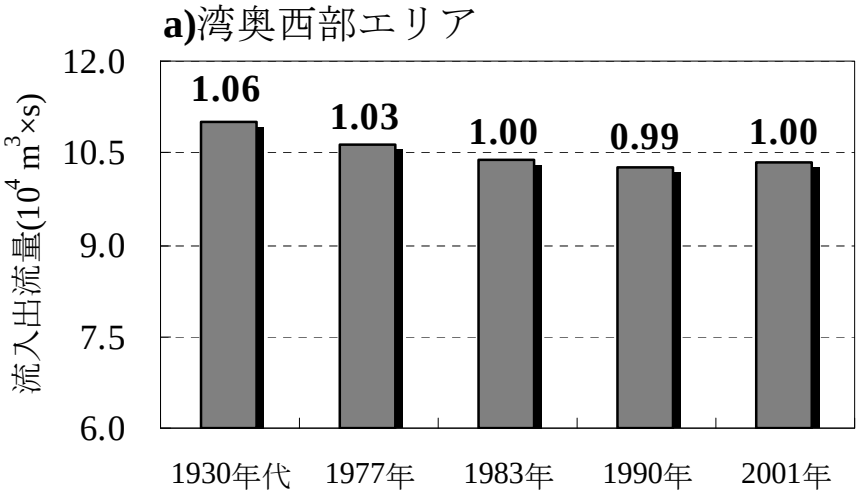


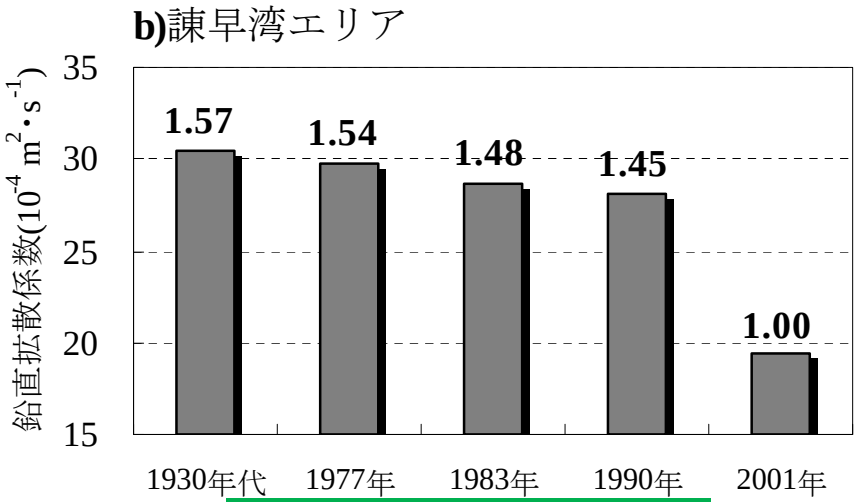
いであ株式会社

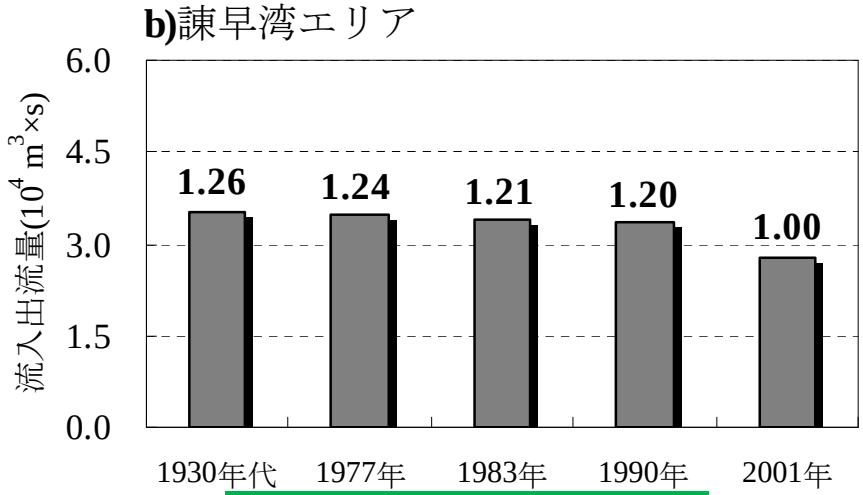
③　長期的な環境変化による貧酸素水塊の数値実験

■物理環境の変化









鉛直拡散係数

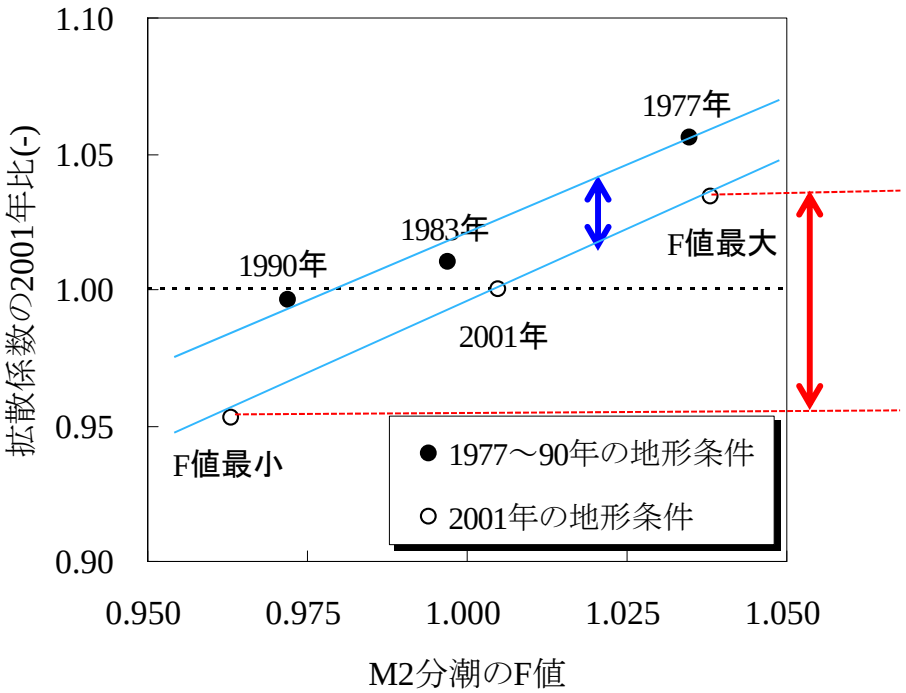
流入出流量

いであ株式会社

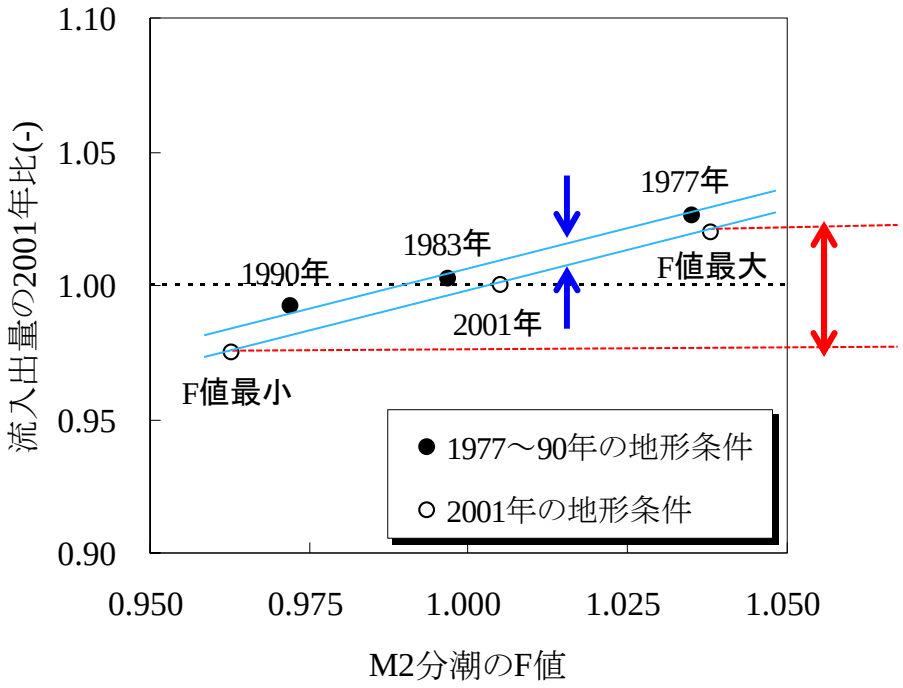
③　長期的な環境変化による貧酸素水塊の数値実験

■物理環境の変化の要因

湾奥西部エリア



鉛直拡散係数



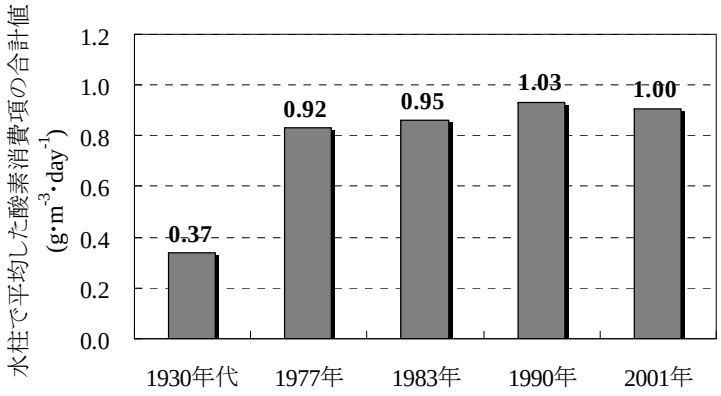
流入出流量

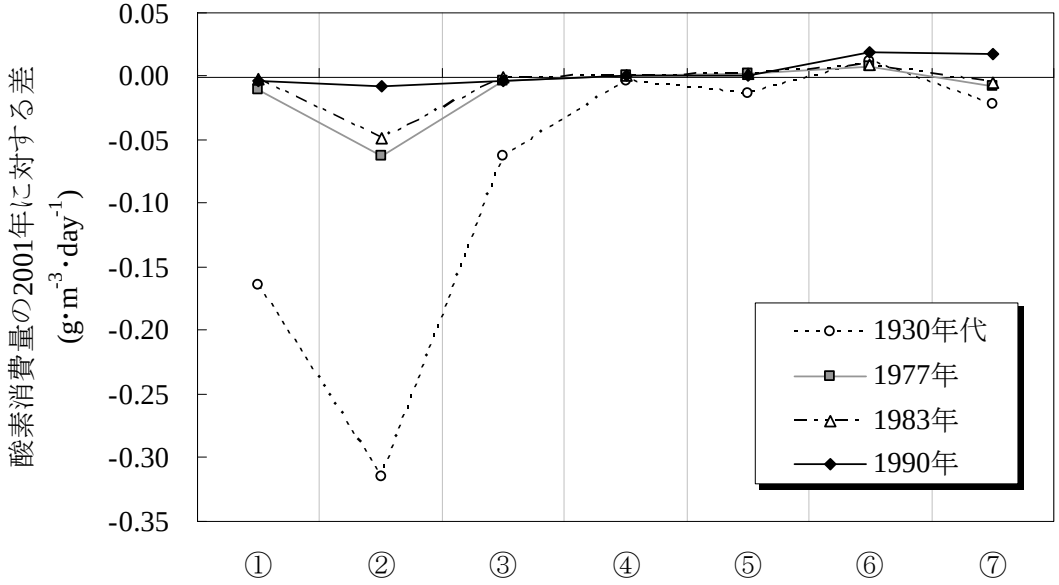
湾奥西部エリアでは、地形条件の影響(⇔)を変更した影響よりも、F値の影響(⇔)による変化幅の方が大きい傾向。

長期的な環境変化による貧酸素水塊の数値実験

■生化学的な酸素消費量の変化要因

湾奥西部エリアにおける水中での全酸素消費量（8月平均値）





POMの分解や、プランクトンの呼吸などの一次生産に関連した酸素消費の変化が大きい。

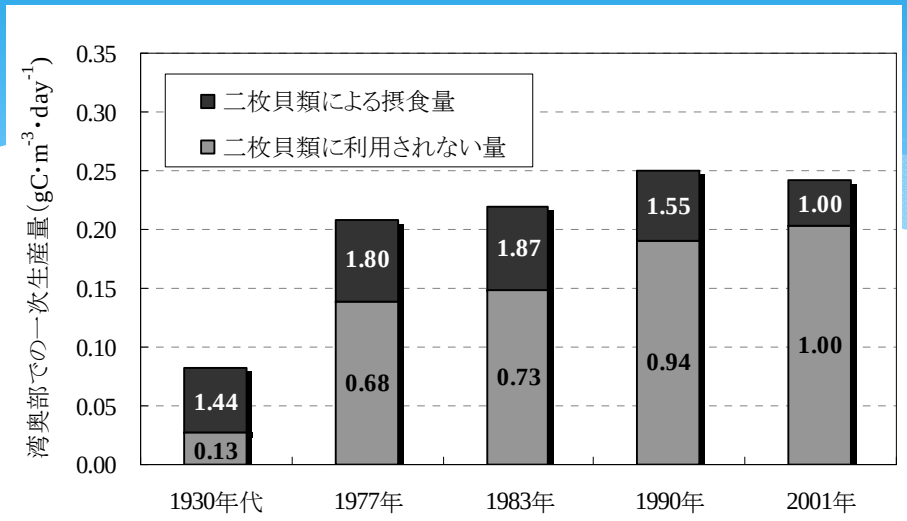
溶存態有機物：DOM
懸濁態有機物：POM
酸素を消費する物質の総量：ODU

全酸素消費量の内訳

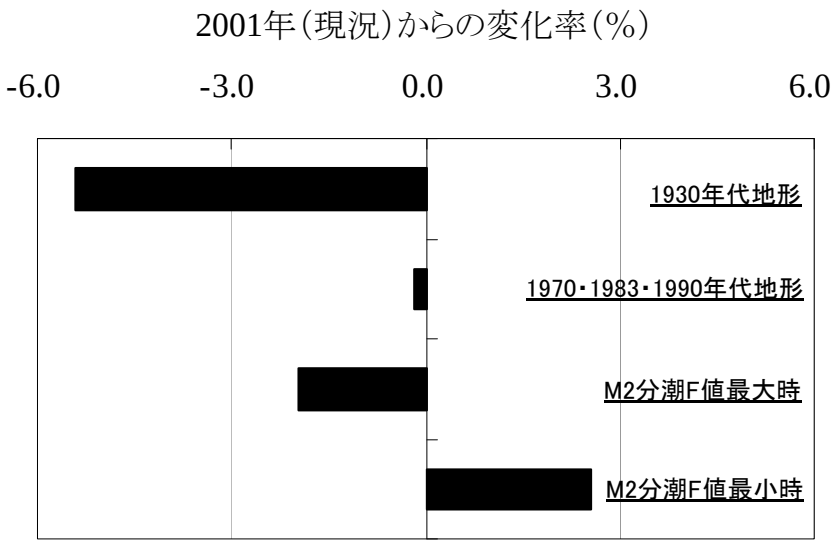
①プランクトンの呼吸
②POMの分解
③DOMの分解
④硝化
⑤底泥による直接的な消費
⑥底生生物の呼吸
⑦ODUの参加

長期的な環境変化による貧酸素水塊の数値実験

■一次生産量の変動要因



二枚貝類の生息量に依存して、摂食されずに酸化分解へ移行する有機物量が年代ごとに大きく変化しており、1930年代では、現況の13%となっている。

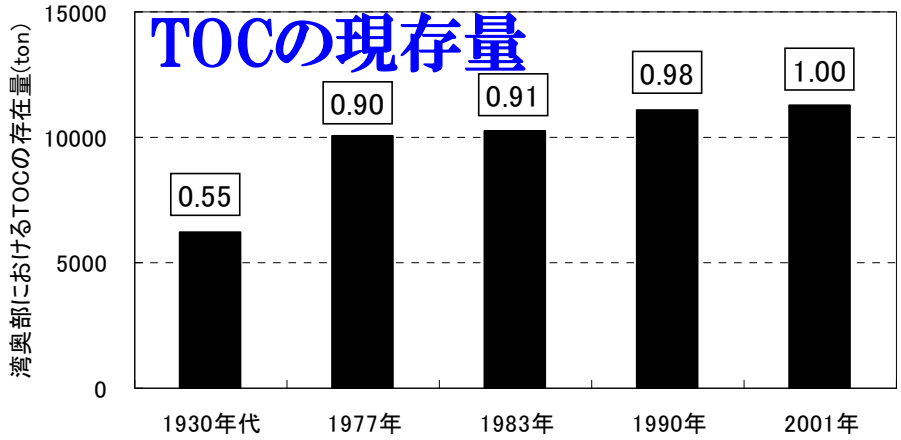


湾奥部での酸化分解へ移行する有機物量は、1930年代の地形条件では5%程度減少している。
一方、外海潮汐の影響でも2～3%程度の変化が見られた。

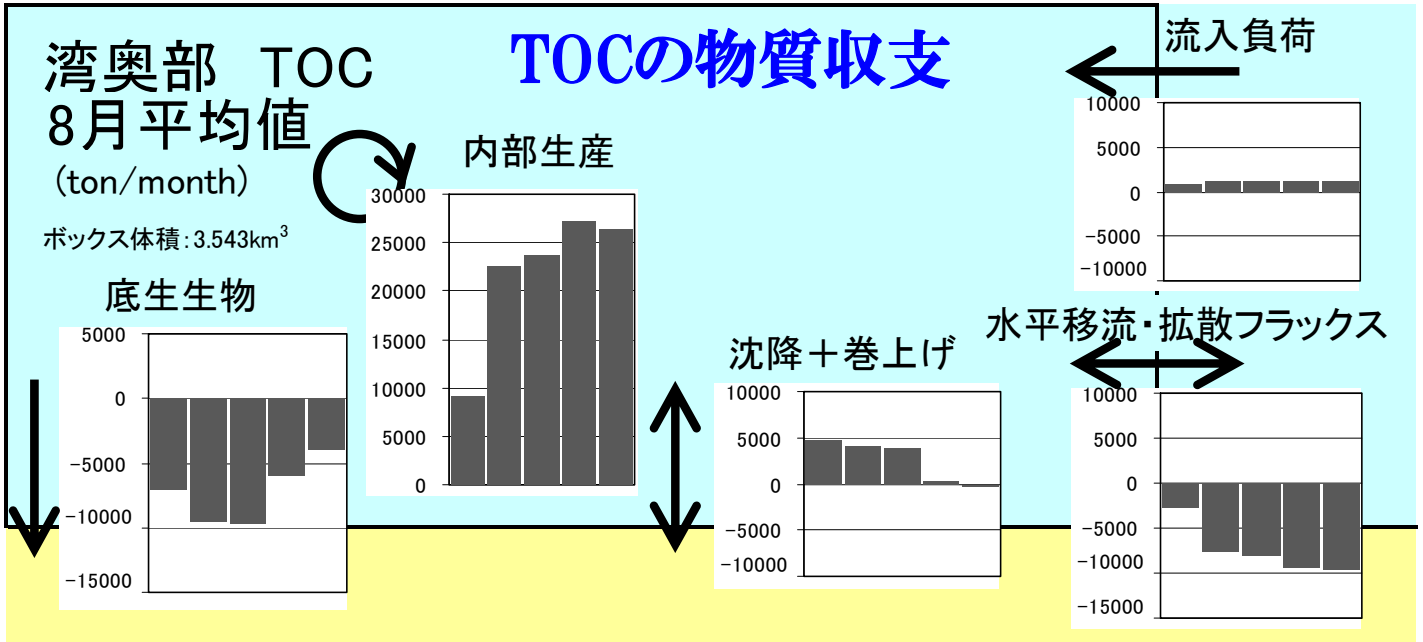
いであ株式会社

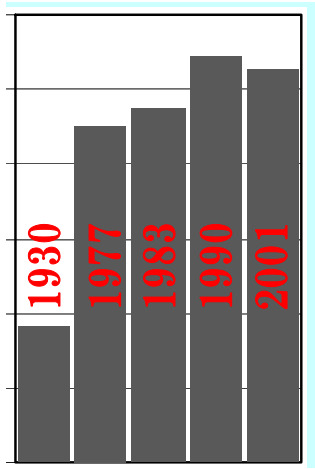
③ 長期的な環境変化による貧酸素水塊の数値実験

■TOCの収支



1. 内部生産起源のTOCの増加が支配的。底生生物による取り上げ量も減少しており、水中でのストックが増加する要因。
2. 湾央部への移流拡散も増加しているが、前者の増加分をカバー出来ていない。



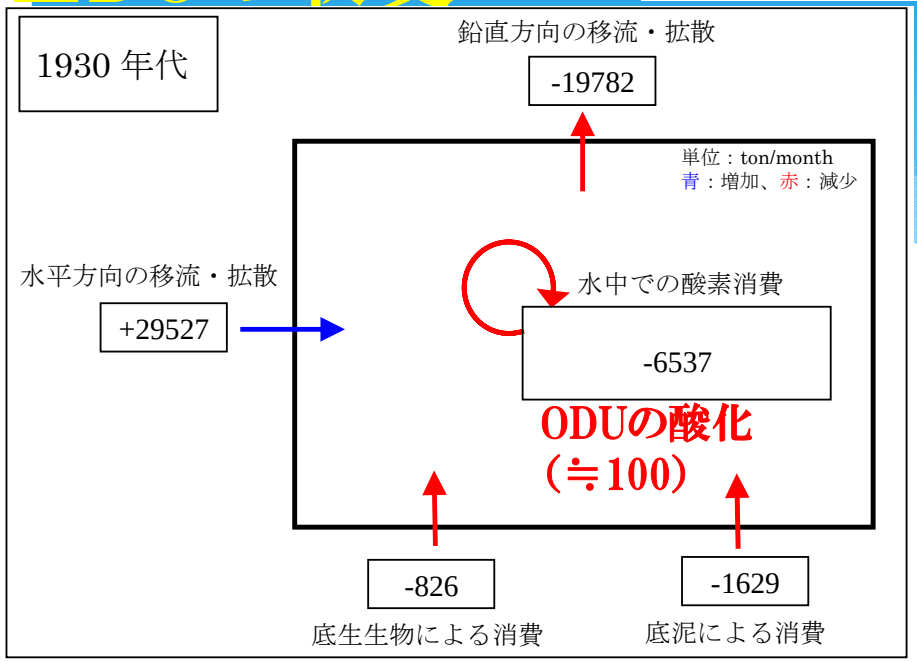


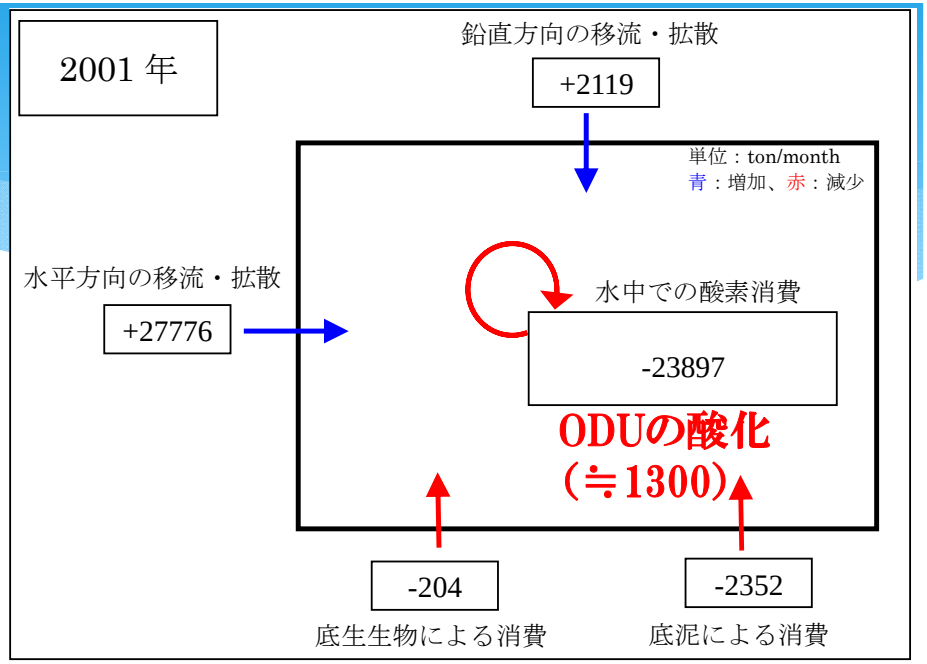
いであ株式会社

長期的な環境変化による貧酸素水塊の数値実験

■DOの収支

湾奥西部エリア3m以深でのDO収支の比較





1. 水中での酸素消費は1930年代から2001年までに約3.7倍に増加した
2. 底泥による消費はあまり変化がないが、ODU（還元物質）の酸化も含めると2倍程度になっている
3. その結果2001年での底泥での消費は1オーダー小さい
4. 底生生物による消費は2001年に1/4になっていたが、 1オーダー小さい
5. 水平移流はわずかに減少、鉛直移流は1930年代は上層への供給であったが、2001年は上層からの供給と変化していた。

いぐあ株式会社

長期的な環境変化による貧酸素水塊の数値実験

■まとめ

1. 1930年代、1977年、1983年および1990年を想定した数値実験を実施し、現況（2001年）と比較することにより、貧酸素水塊の形成に重要な役割を果たす要因を検討した。
2. 湾奥西部エリアでの鉛直拡散と流入出流量は、1970年代以降は、地形改変の影響よりも外海潮位振幅の自然変動の影響を強く受けている。（1930年代のケースからは湾奥部の地形改変の影響が大きい結果が示された）
3. 酸素消費は一次生産量と強く関係しているが、近年は二枚貝類の減少により、一次生産起源の有機物が利用されずに酸化分解へ移行する割合が増加している。
4. 一次生産量は流動場の変化によっても変動し、外海潮位振幅の自然変動の影響も無視できない。

今後の課題

関連性の解明

環境要因の解明 ⟷ 生物・生態系の解明

水産生物・プランクトン
一定の関連づけ

- 環境因子の継続的モニタリング
  （浅海定線、観測塔）
- 懸濁物輸送（浮泥、堆積、底質）
  （短期→長期堆積）
- シミュレーション技術の精度向上

- 低次生態系（プランクトン）と高次生態系間の物質循環移動
- 非水産生物の実態解明
  （人材の確保）
- 安定的漁業技術の開発
  （持続性、環境との親和性）

里海の思想

- 環境－生態系の相関
  （観測・シミュレーション）

異なる分野の研究者間の交流連携

（人材確保と交流の場の確立）

もっとも複雑な環境問題－有明海－

複雑系の科学

表れる現象が複数、考えられる原因も複数、その関係も複雑

有明海の環境の現状をどう認識するか

一昔前より貧酸素が起きやすい状態にあるか？

貧酸素発生するメカニズム

①大規模な出水で密度躍層が発生し、水柱中央から底層で貧酸素水塊が発生する（大潮時でも解消しない）

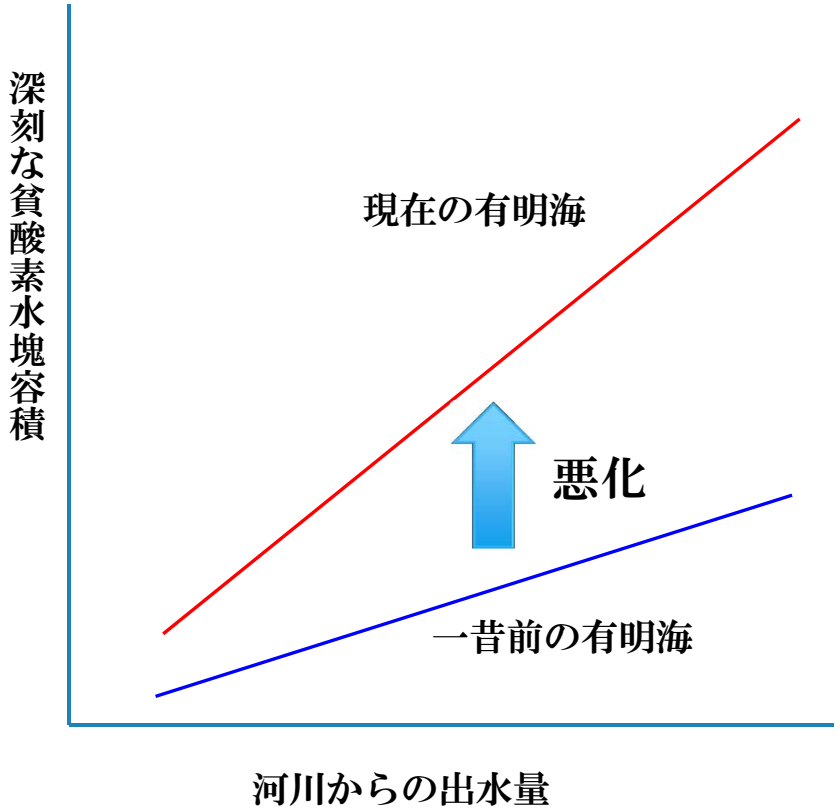
②小潮時に高塩分海水が底層に浸入して密度躍層が派生し、貧酸素水塊が発生する（大潮時には大部分解消する）

環境に深刻な影響を与えるのは出水に伴う密度躍層

多くの有明海研究者の感覚

一昔前より貧酸素しやすい海になった

佐賀県有明海水産振興センター　古賀所長ら



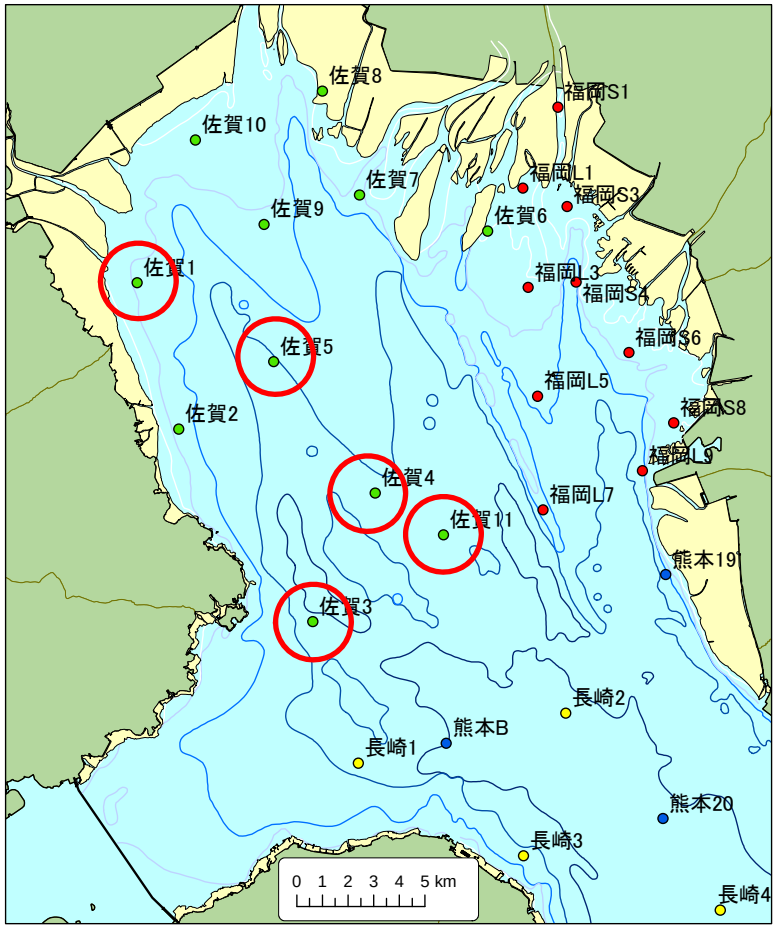
有明海海況のイメージ

長期的なDOの経年変動に関する既存知見

2015.3.23　有明海・八代海等総合調査評価委員会

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）

速水祐一（佐賀大学）・松山幸彦・木元克則・徳永貴久（西水研）



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以下の出現状況に大きな変化なし(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。

浅海定線調査データの解析1

●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)

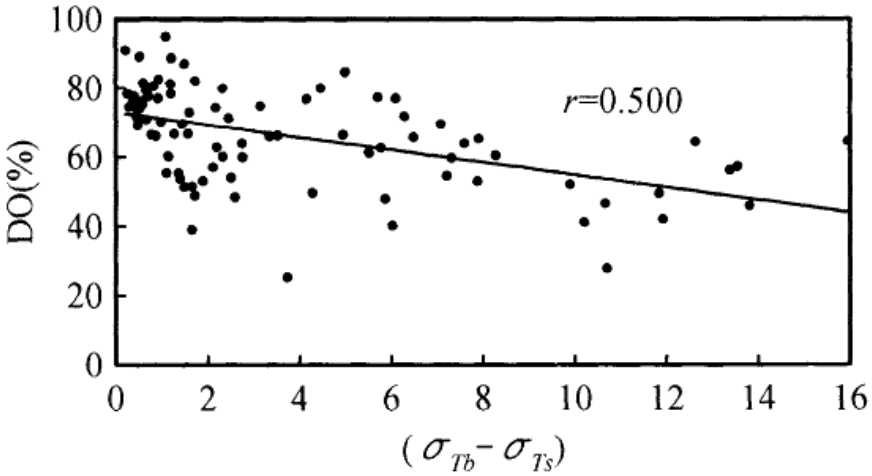


Fig.13 1972年～2000年夏季における底層のDOと$(\sigma_{Tb}-\sigma_{Ts})$の関係

Relation between DO near bottom and $(\sigma_{Tb}-\sigma_{Ts})$ in summer during 1972～2000

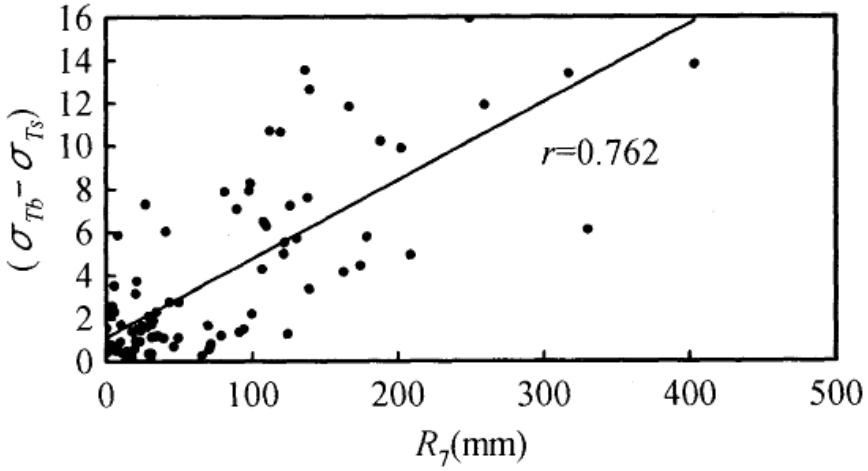


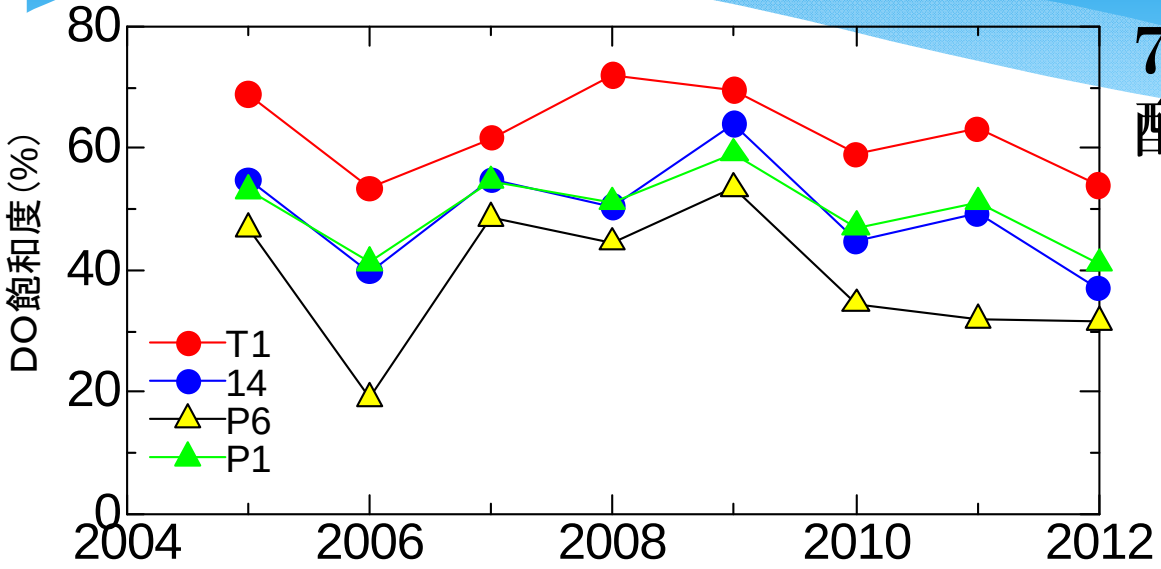
Fig.14 1972年～2000年夏季における$(\sigma_{Tb}-\sigma_{Ts})$と$R_7$の関係

Relation between $(\sigma_{Tb}-\sigma_{Ts})$ and R_7 in summer during 1972～2000

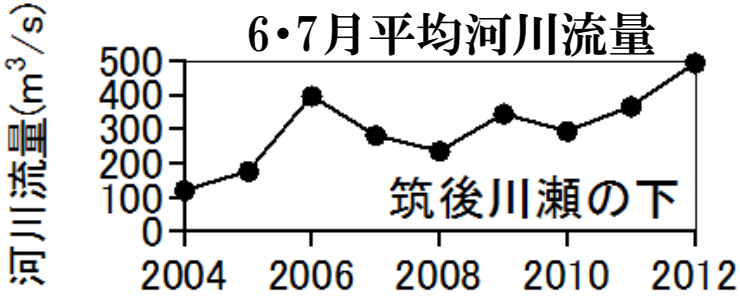
底層の酸素飽和度と成層強度(表底密度差)の関係

降水量と成層強度の関係

平均溶存酸素飽和度の経年変化（連続観測）

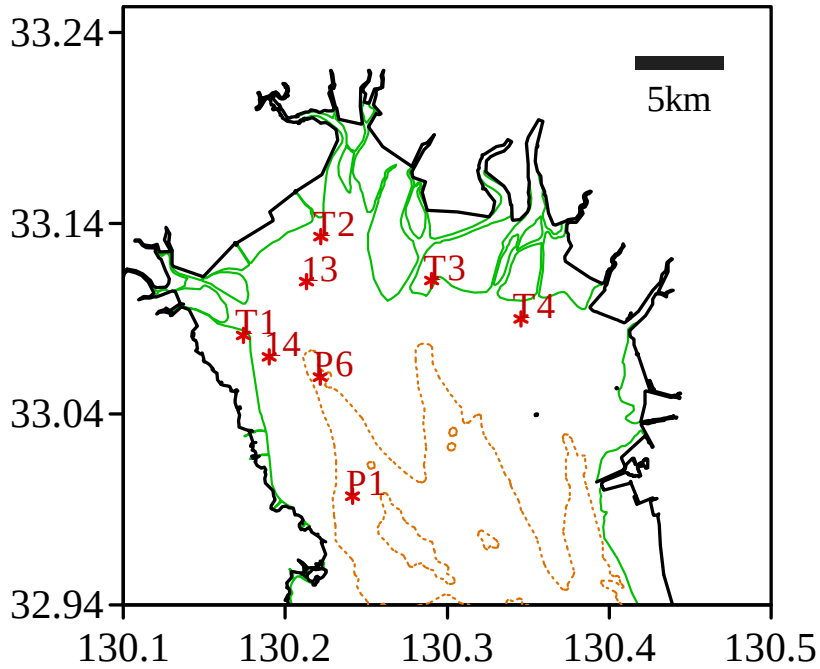


7～9月の底層溶存酸素濃度平均値



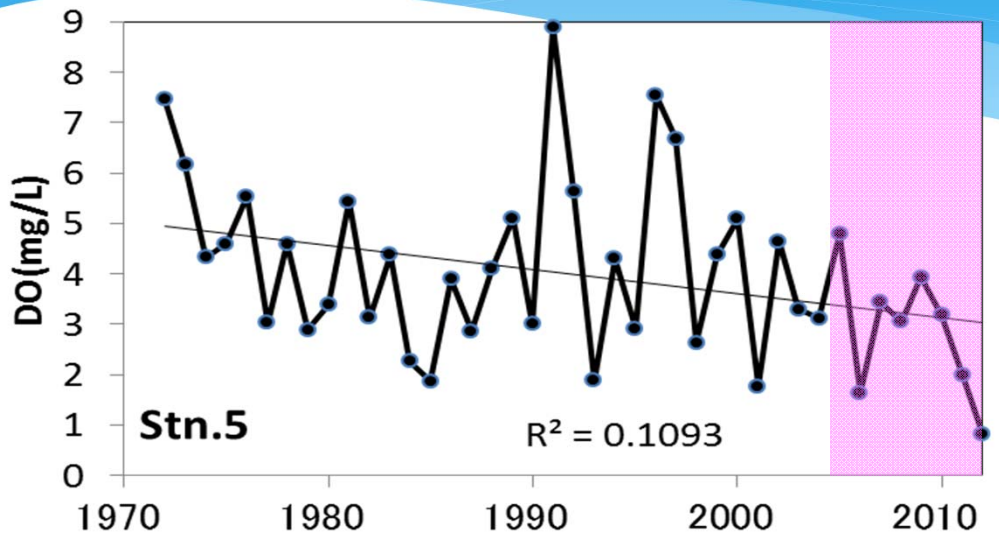
平均溶存酸素濃度はP6で低い。

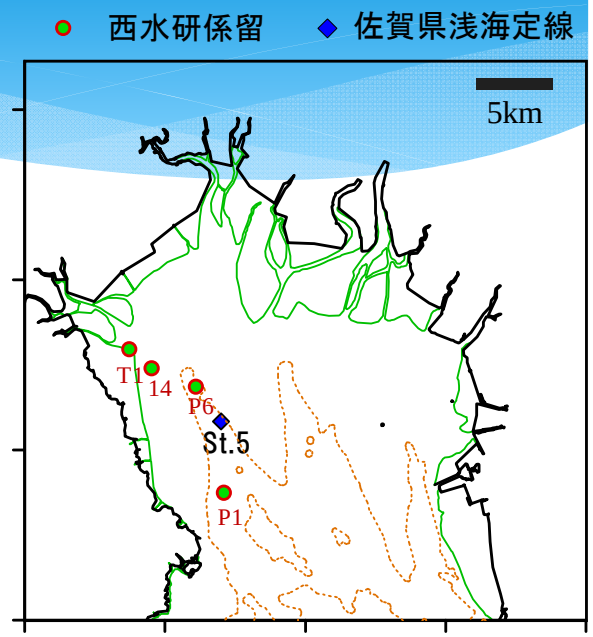
2006・2012年は特に平均飽和度が低い→淡水供給が多いと、成層が強まり、底層の溶存酸素濃度は低くなる。



浅海定線データ*と連続観測の比較

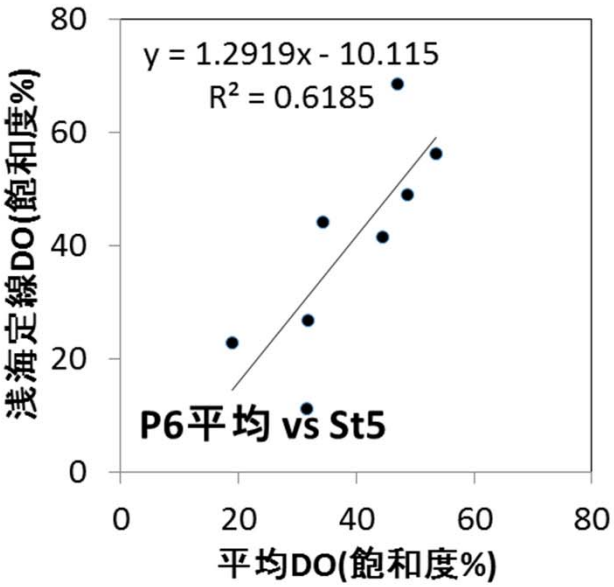
*1972年～
毎月1回大潮時観測

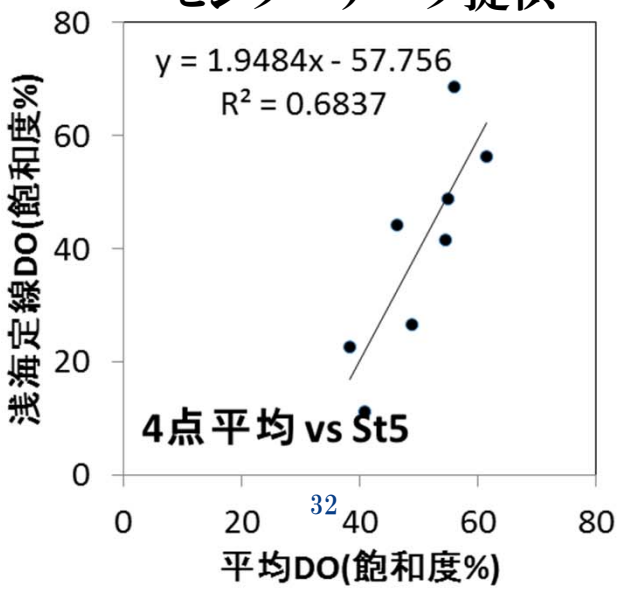




浅海定線底層DO（7月）との比較

佐賀県有明水産振興センターデータ提供





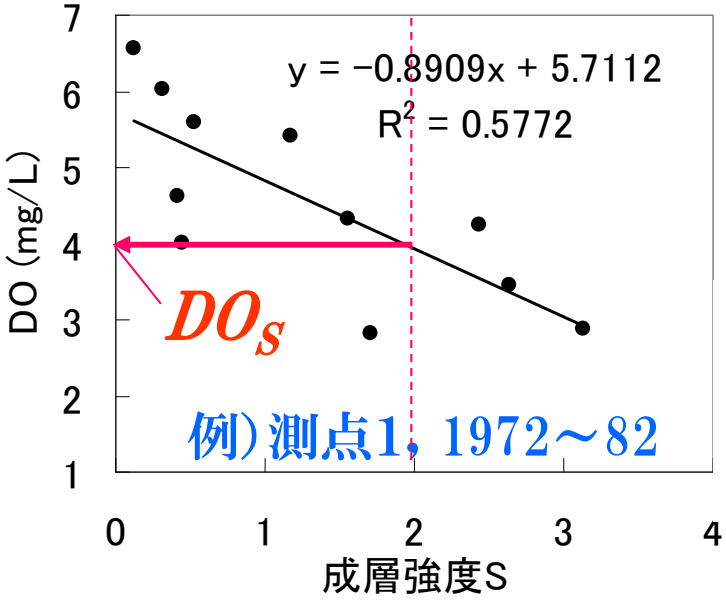
浅海定線データは大潮時のデータのために，浅海域は鉛直混合しており比較できない．

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，その年の夏の平均溶存酸素濃度を反映している可能性．

浅海定線調査データの解析2

成層強度の影響を除いた底層DO変動



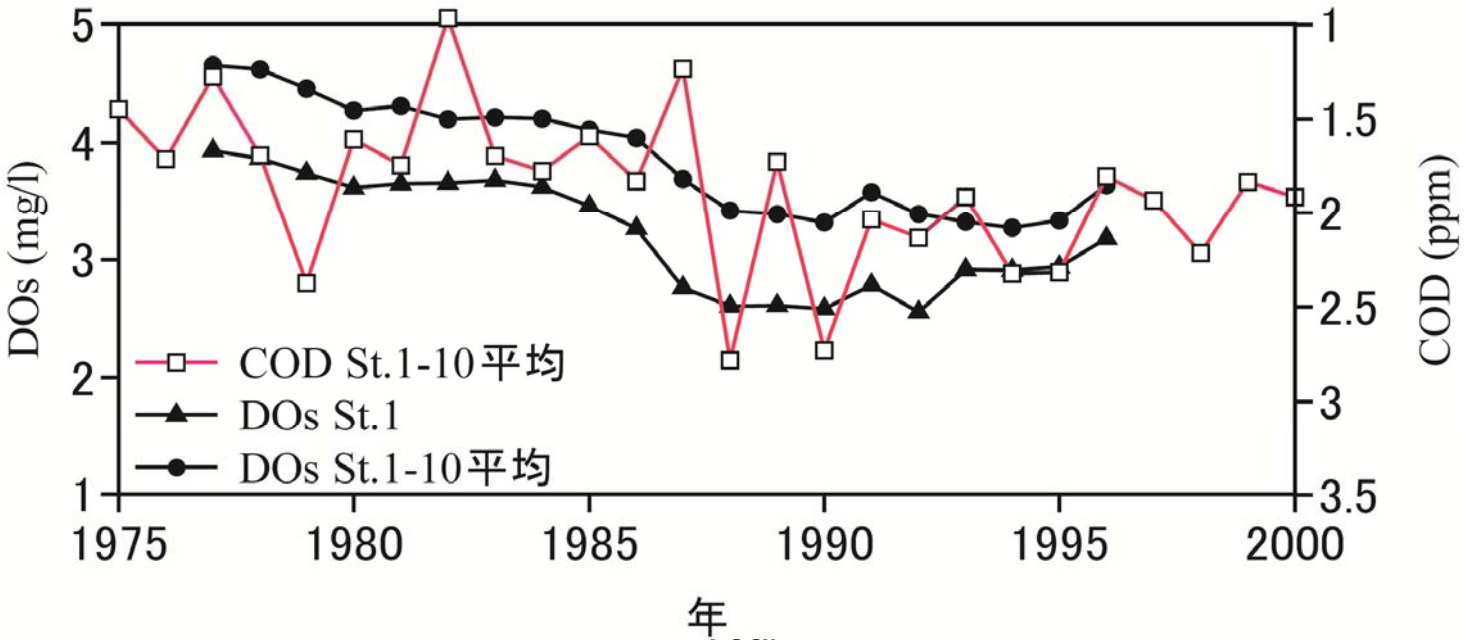
成層強度の影響を除外すると，過去30年間で有明海奥部の7月の底層DOは低下傾向にある．

成層強度に関係なくDO低下

⇩

酸素消費速度の上昇を示唆

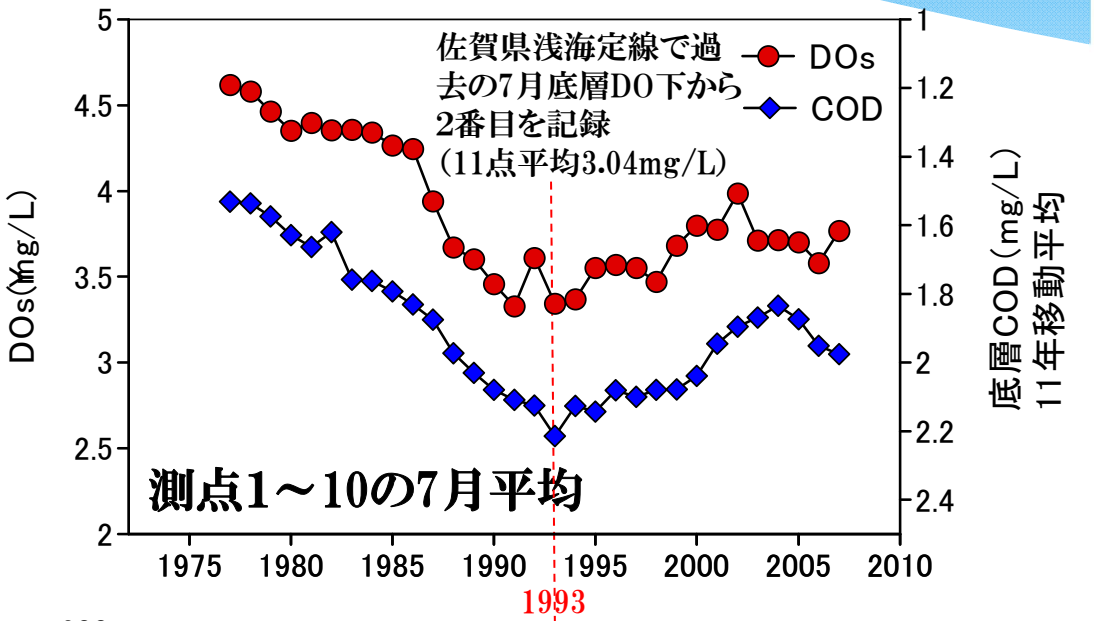
過去30年で底層の有機懸濁物質増加？

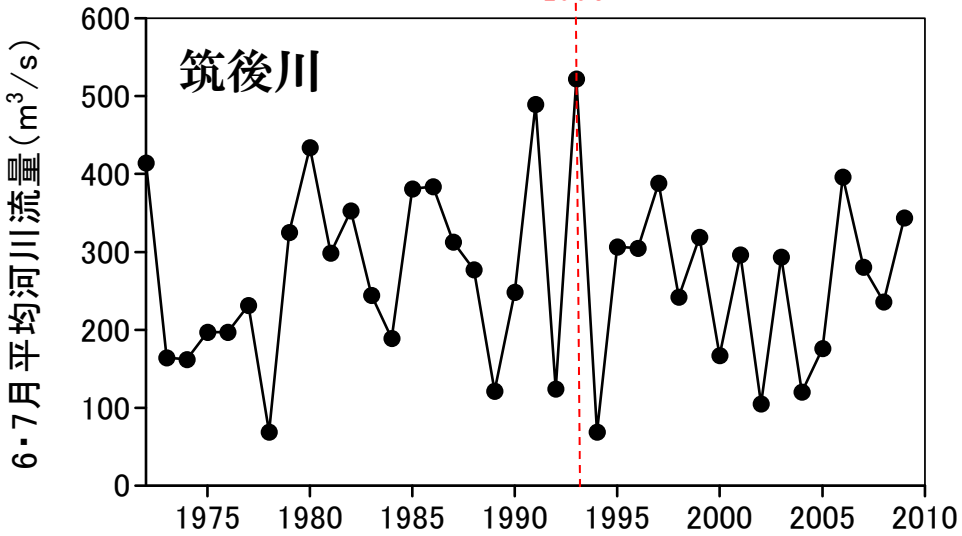


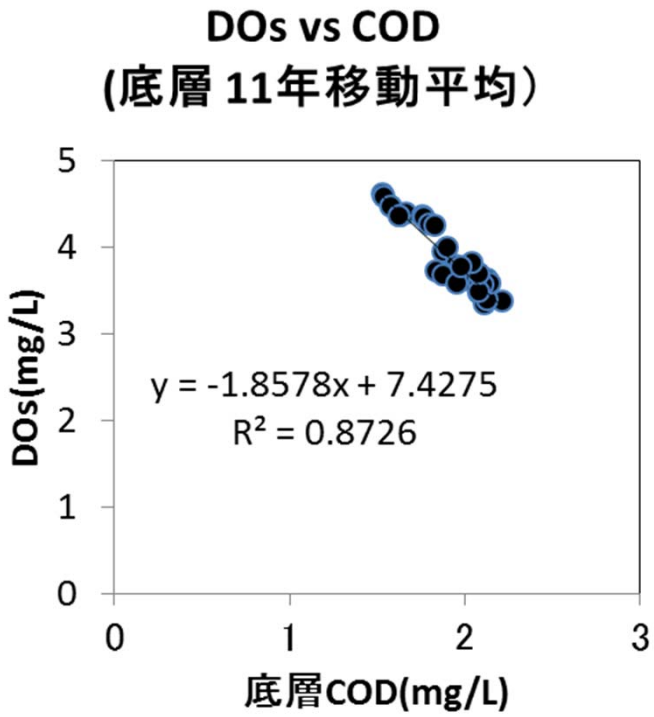
（速水ら，2006；速水，2007）

浅海定線調査データの解析3
（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





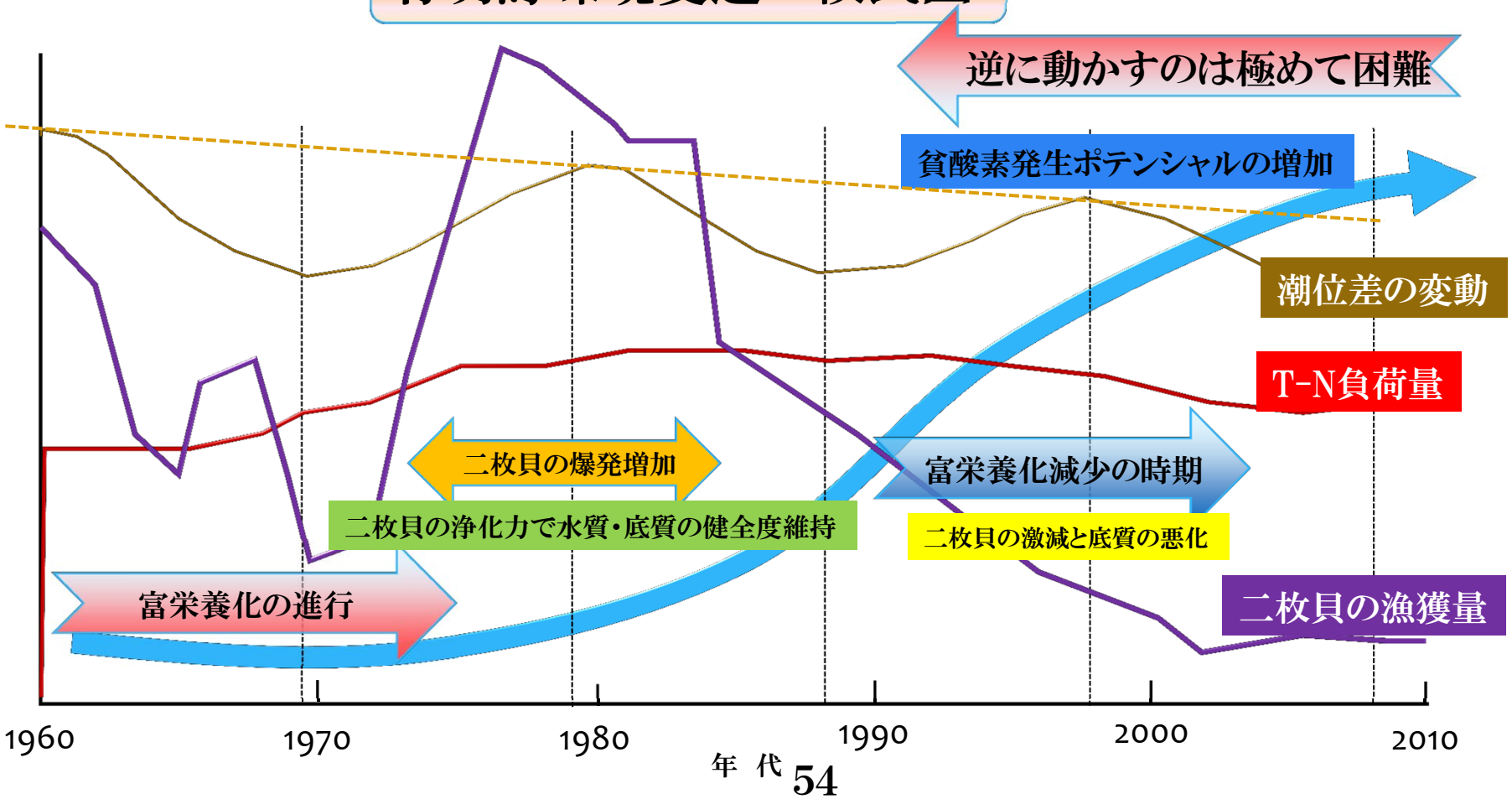


1990年代以降は横ばいからやや回復．ただし，1970年代～80年代前半に比べるとDOsは低い．
やや回復しても河川流量が多いと深刻な貧酸素発生．

有明海はどのように変化したと考えられるか

1960年代から進行したが富栄養化で、餌となるプランクトン類が増加し、底質も健全であったので、1975年～1985年の10年間は二枚貝の爆発的に増加した。二枚貝類がプランクトン類を捕食し、漁業資源としてそれを系外に取出したため、急激な底質悪化は発生しなかった。
二枚貝の減少期に入ると底質は急激に悪化し、貧酸素が起こりやすい海域へと変化した。
現在は、捕食者がいないためプランクトン類が大量に発生し、貧酸素を加速し、二枚貝をさらに減少させるといった「負のスパイラル」の状態にある。

有明海環境変遷の模式図



54

ご清聴ありがとうございました