有明海再生機構主催
有明海市民講座

平成27年5月27日（水）

第7回

有明海異変の解明2
シミュレーションモデルの構築

有明海再生機構　理事長

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。

この有明海モデルが正しいかどうかを確かめる

コンピューターシミュレーション

■有明海で起こっている事象（気象等外的条件、流れ、泥の移動、プランクトン発生、貧酸素、二枚貝の挙動など）の関係を調べる

現状分析・理解

各種調査結果を矛盾なく説明できるモデルを作る

■地形変更、気象変化、ベントスの増減等が貧酸素、二枚貝、海苔生産などにどのような影響を及ぼすか（感度解析）

予知・予測

有明海がなぜこうなったのかを検討する（過去）
考えている対策は有効であるかを検証する（未来）

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

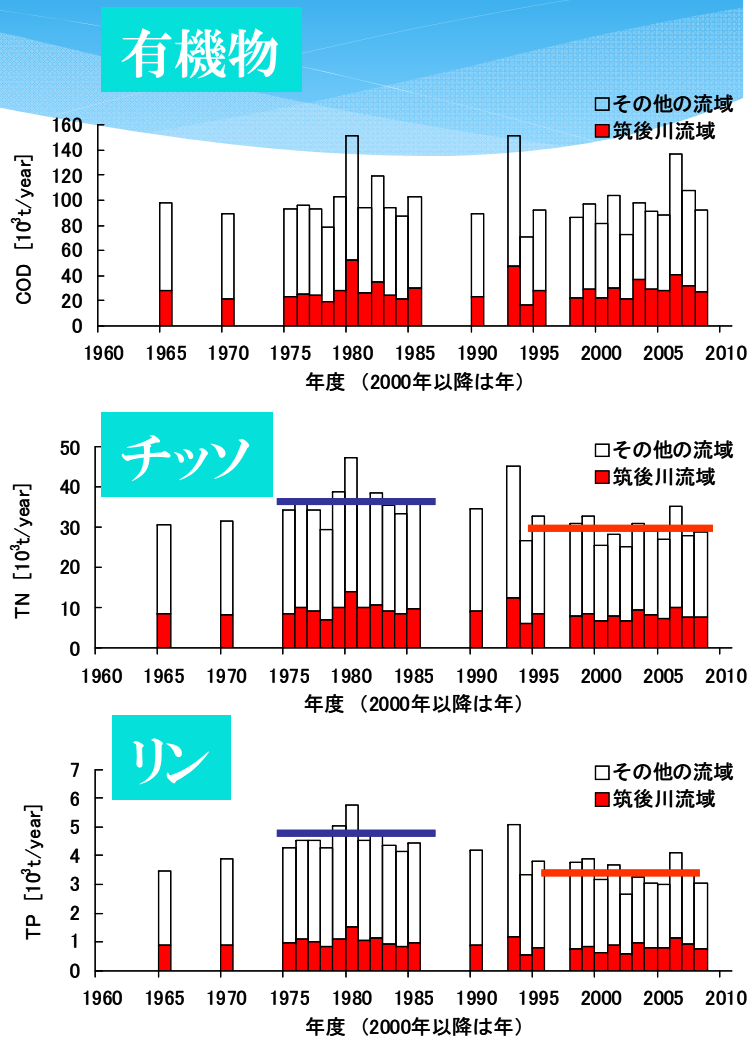
透明度の上昇

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

シミュレーションモデルの到達点

流動モデル

潮位・潮流速、塩分濃度、水温

九大モデル、佐大モデル
JSTモデル　鹿島モデル

観測塔での観測値とほぼ一致

時系列まで再現可能

低次生態系モデル

懸濁物輸送、プランクトン発生消失
水質　物質循環　底質　底生生物

JSTモデル　鹿島モデル

観測塔での溶存酸素(DO)観測値

時系列までは再現できていないが、傾向とオーダーは一致

生物生活史モデル

アサリ、サルボウ、スズキ等の
資源量(漁獲量)

JSTモデル

検証に用いるデータが十分に得られていない

モデルの精度を実測値で検証する

一番大事な作業

■計算結果と実現象のモニタリング結果に矛盾がないか

計算結果は、各地に設置された流速、濁度、溶存酸素濃度などの
モニタリング結果を精度よく説明できているか

現状を表現できていないものを未来予測
に使用してはならない

モデルを利用する

定量的

現状分析・理解

なぜこのような海になったか
物質はどう循環しているか
要因の影響の度合いは

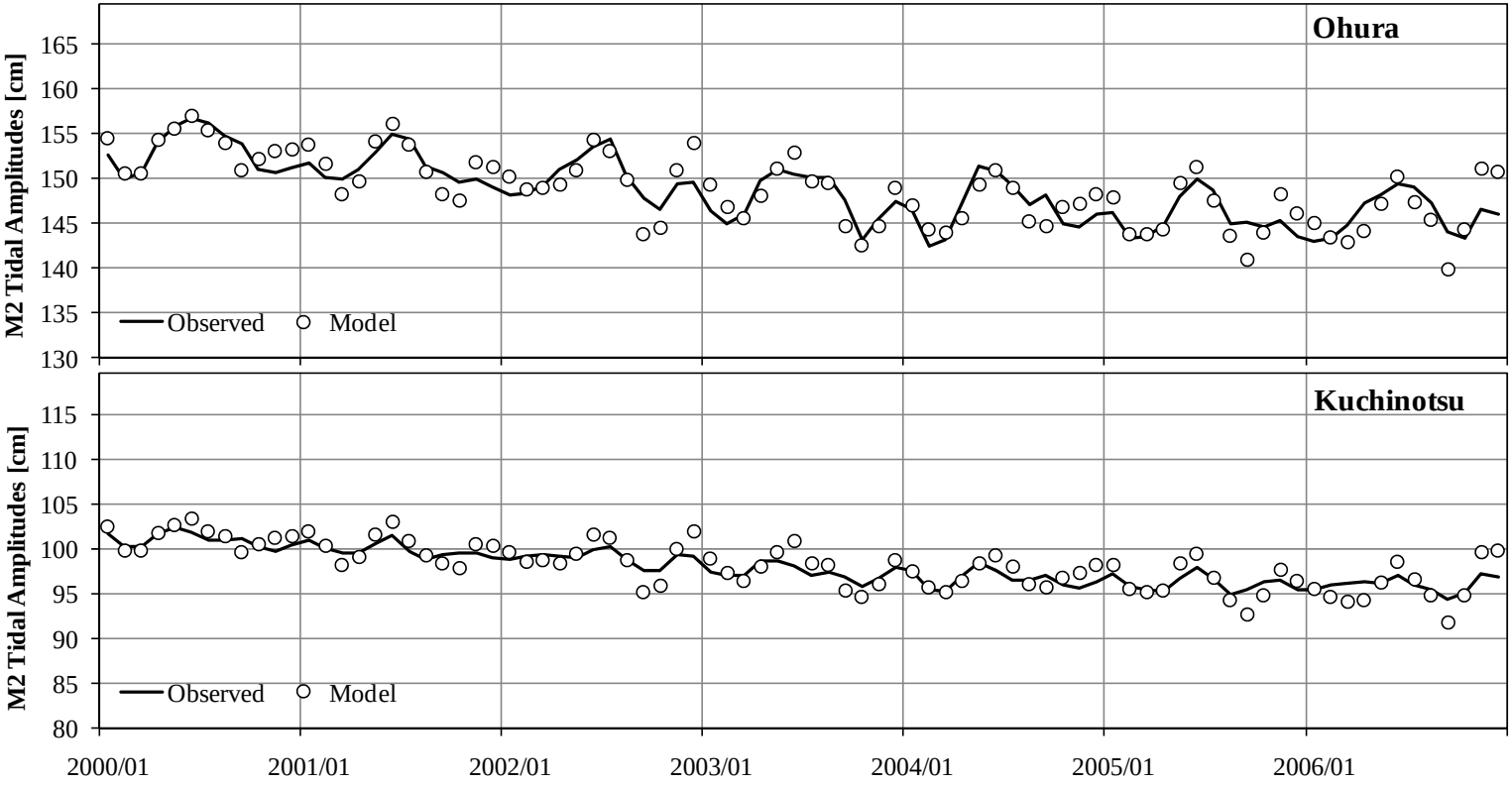
予知・予測

今後どのように変化するか
どのような対策を取ればいいか

楠田プロジェクトJSTモデルの構築・検証

■潮位の比較

M2分潮振幅



大浦／口之津間の増幅率（7年間平均）

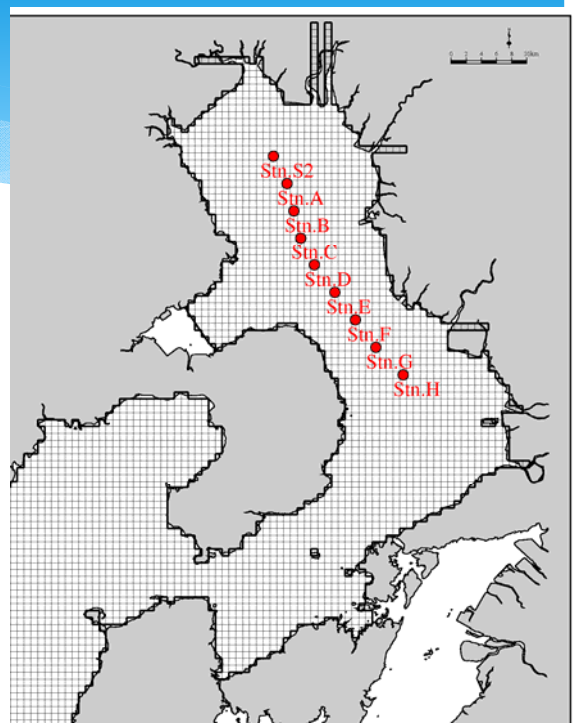
観測値	計算値
1.515	1.517

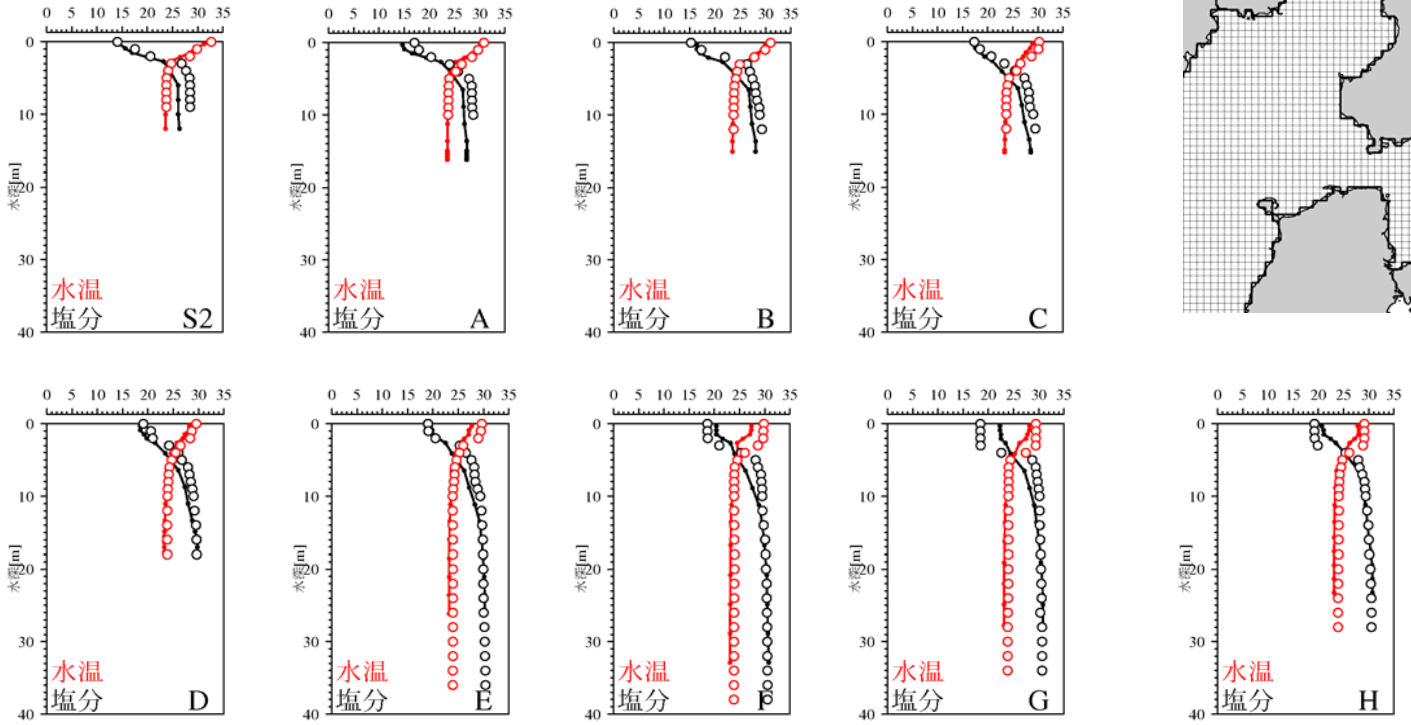
いであ株式会社

楠田プロジェクトJSTモデルの構築・検証

■水温・塩分（密度成層）の評価

熊本県立大学　堤教授の調査
結果より観測値を引用

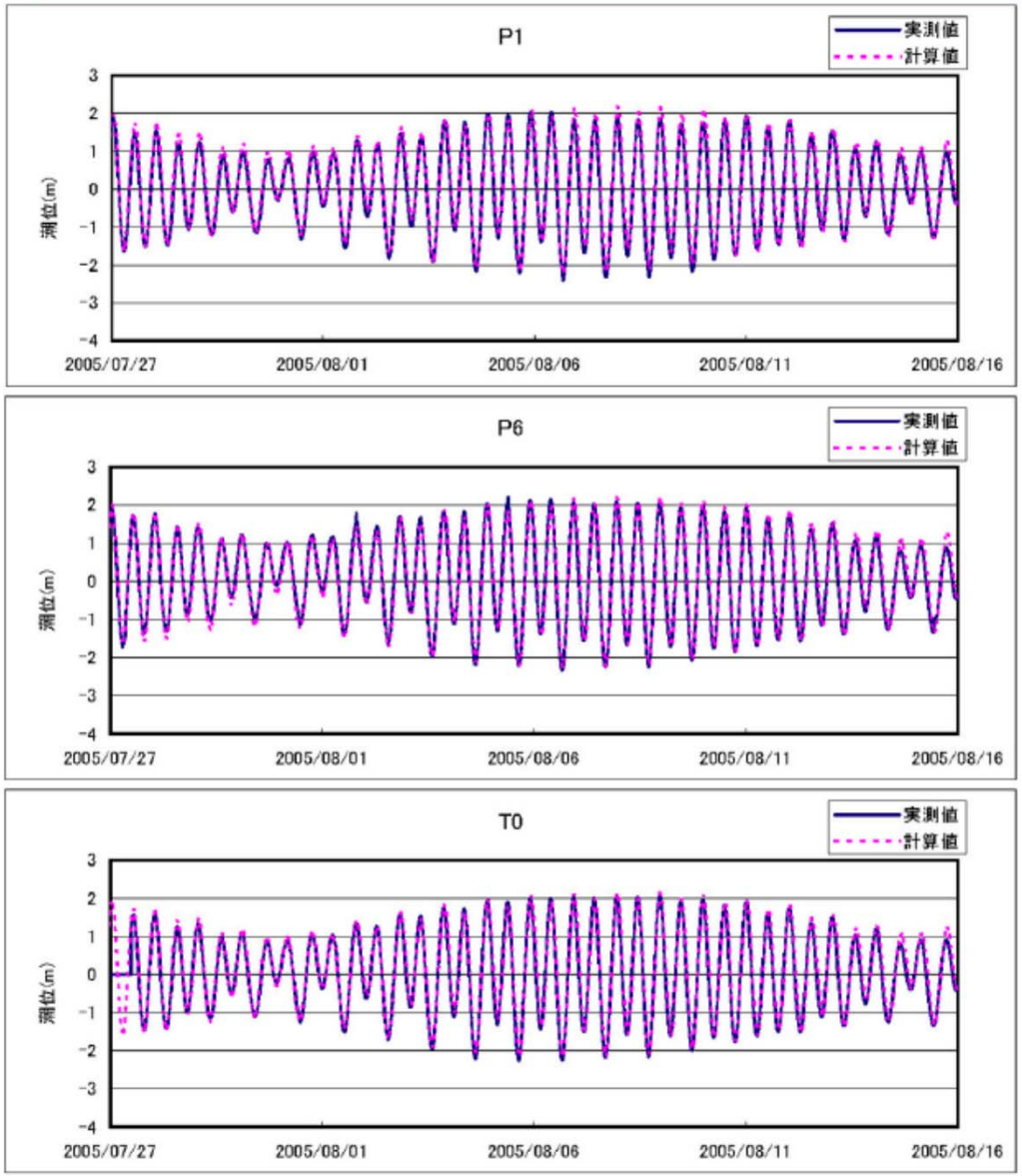




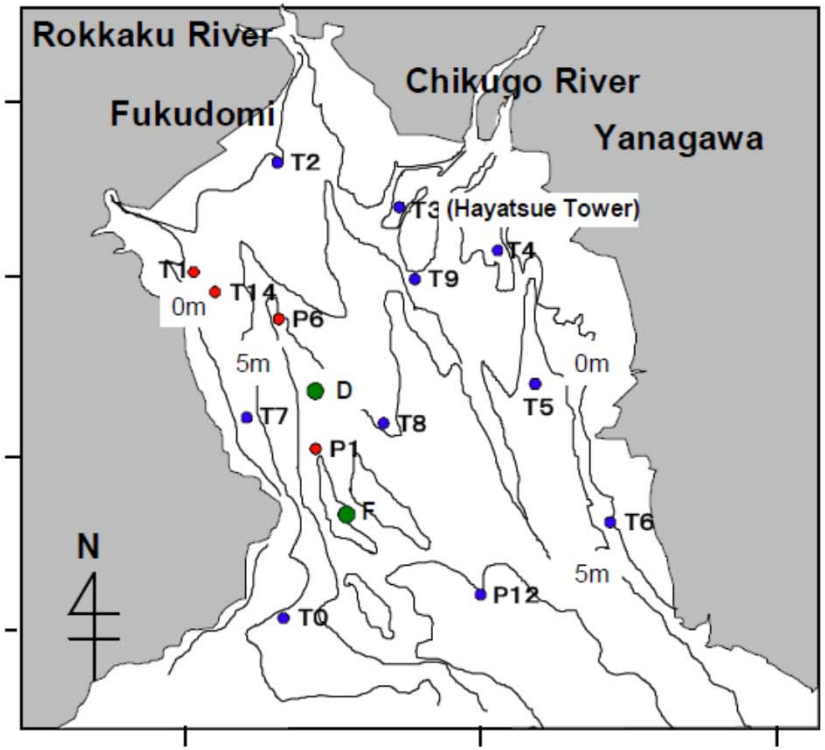
2006年8月4日　○：観測値、－：計算値

いであ株式会社

観測塔の連続観測結果との比較



潮位

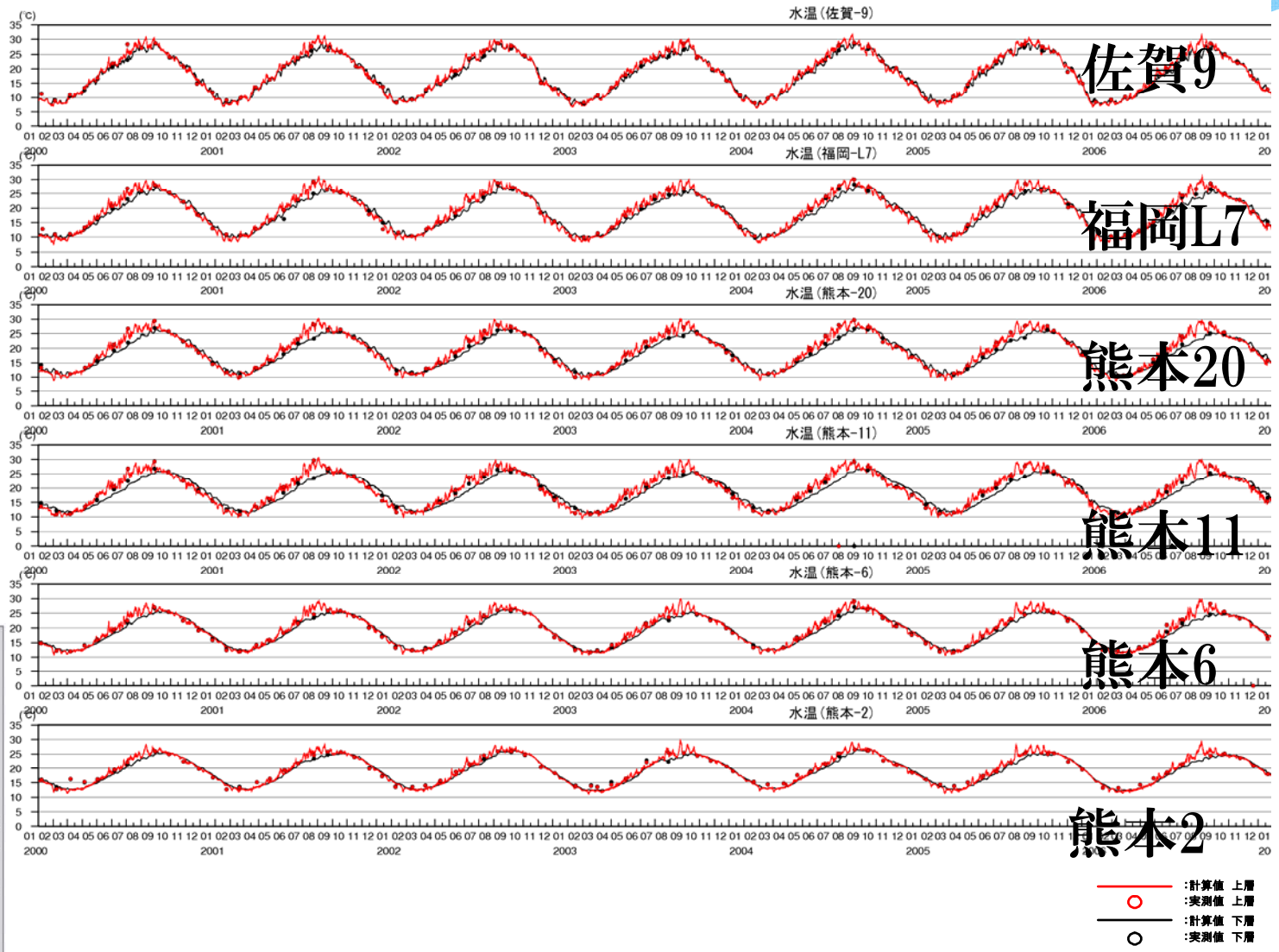


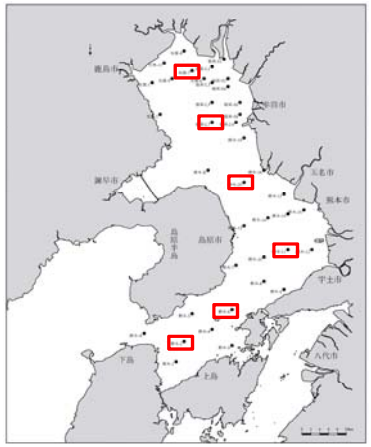
観測地点

鹿島モデルによる解析

楠田プロジェクトJSTモデルの構築・検証

■水温の評価 浅海定線調査から長期間（2000～2006年）の比較

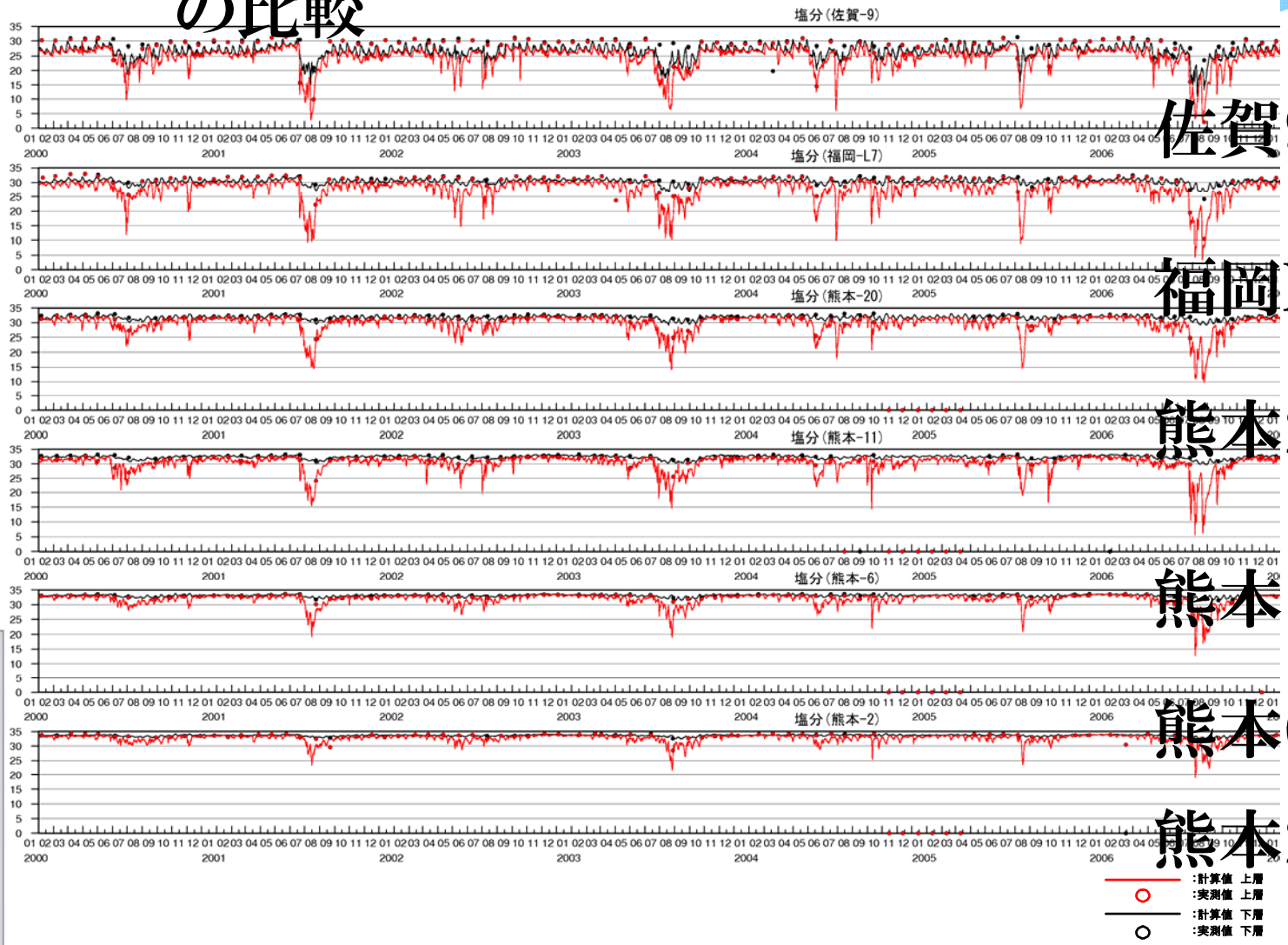


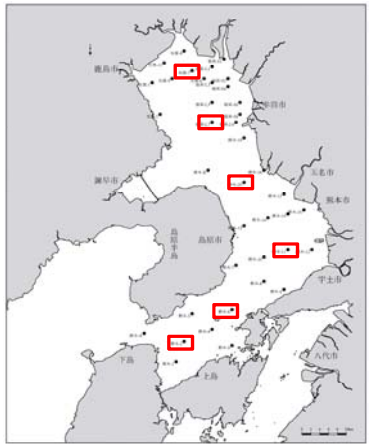


いであ株式会社

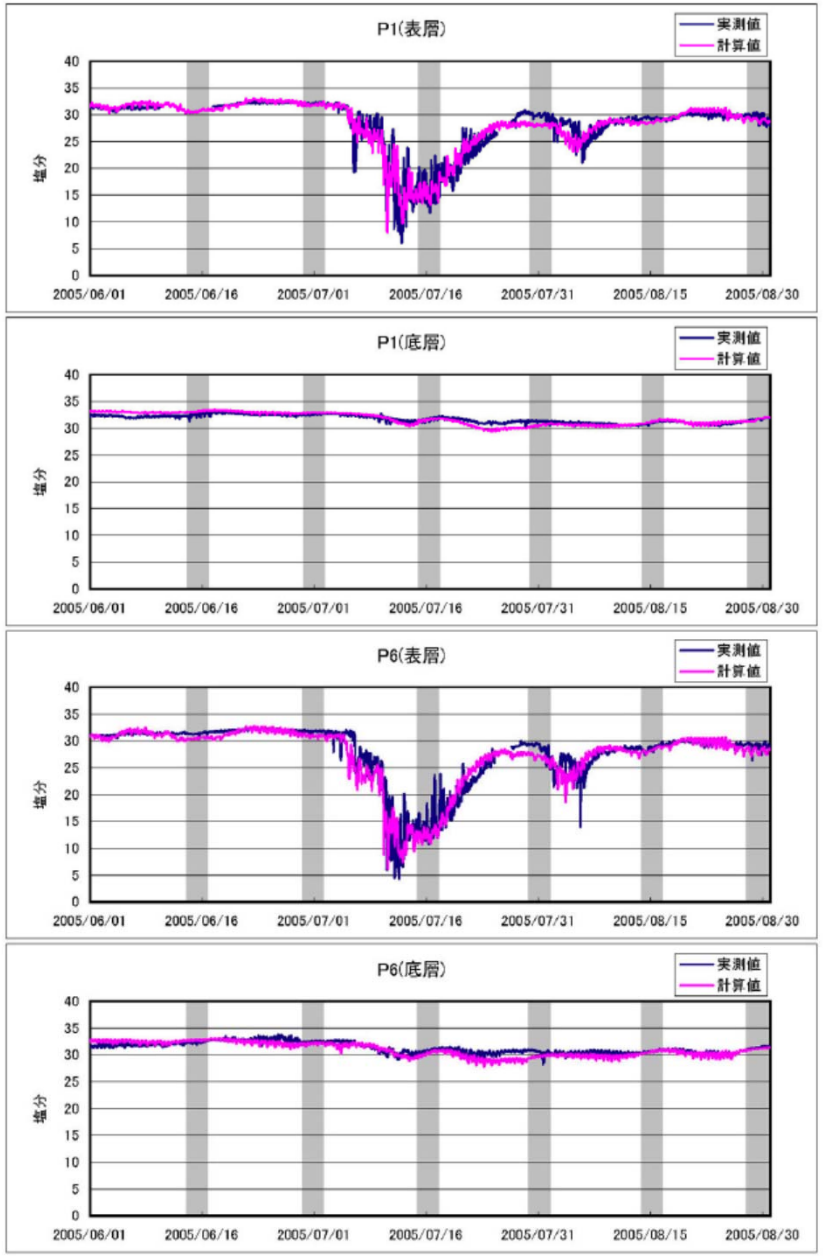
楠田プロジェクトJSTモデルの構築・検証

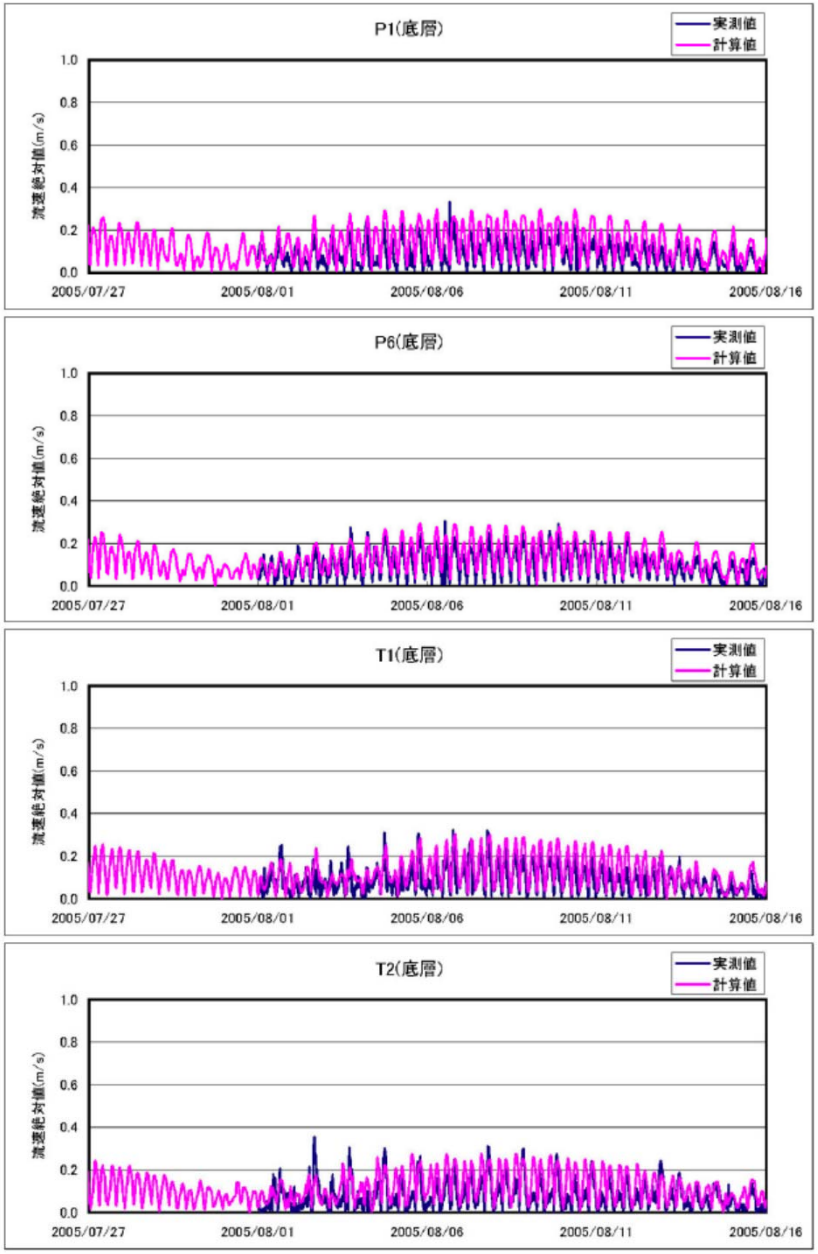
■塩分の評価浅海定線調査から長期間（2000～2006年）の比較





いであ株式会社





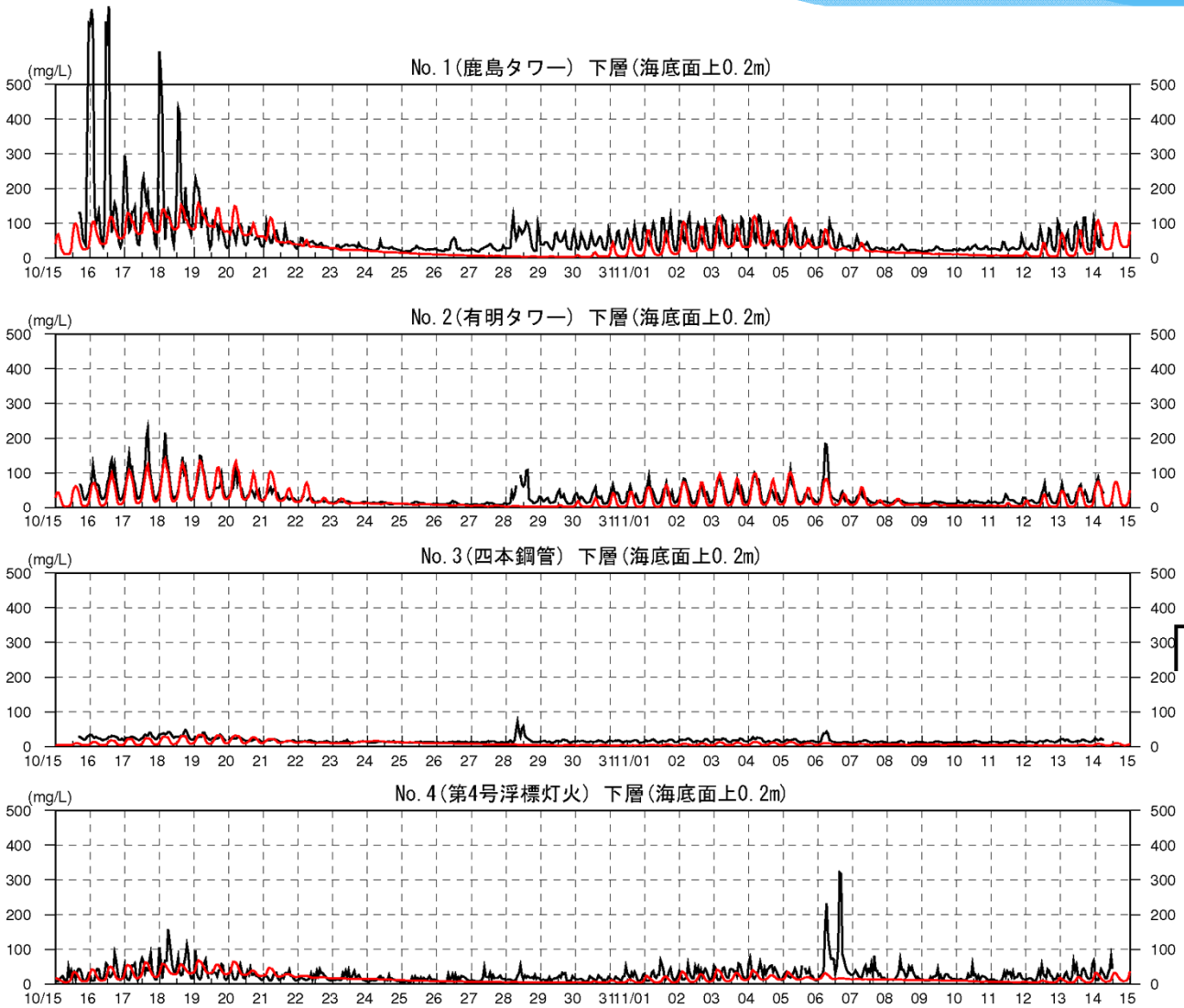
塩分濃度

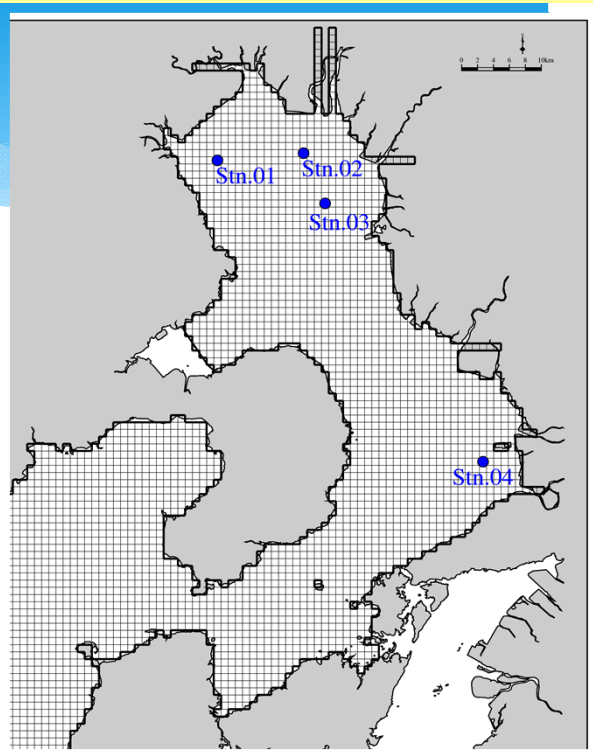
鹿島モデルによる解析

底層の流速

楠田プロジェクトJSTモデルの構築・検証

■SSの再現性（懸濁物輸送サブモデル）





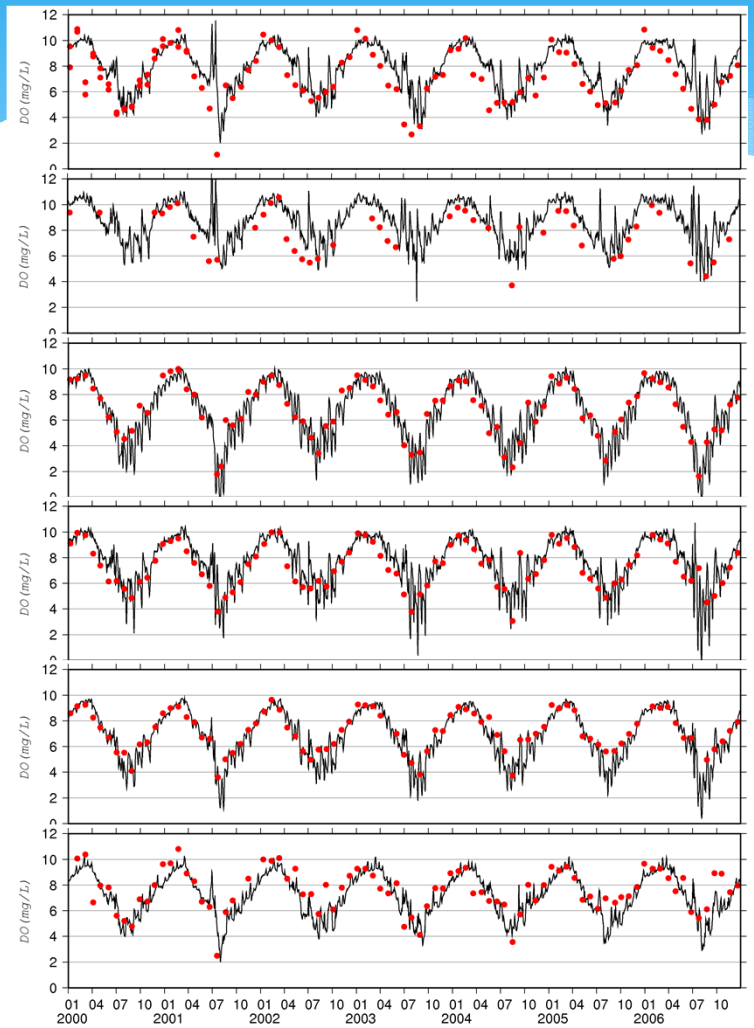
「平成14年度国土総合事業調整費　有明海海域環境調査　報告書」
より観測値を引用

赤線：計算値、黒線：実測値

いであ株式会社

楠田プロジェクトJSTモデルの構築・検証

■貧酸素化の再現性（水質・底質・底生生物予測サブモデル）



Stn.1

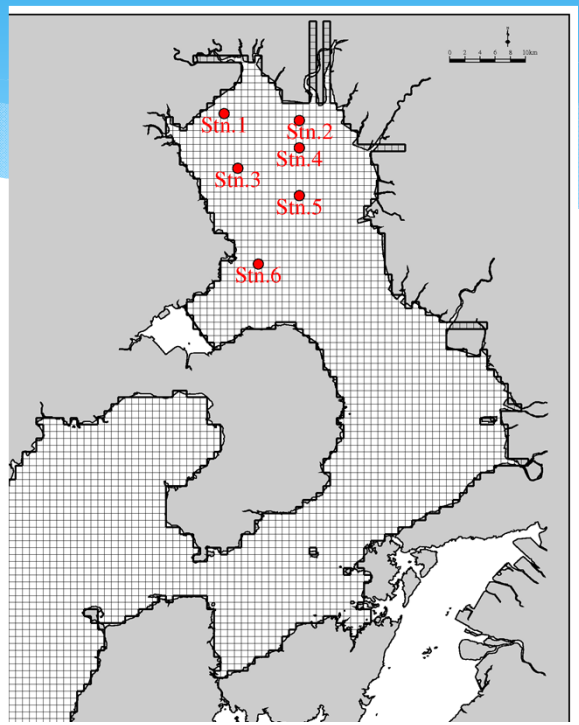
Stn.2

Stn.3

Stn.4

Stn.5

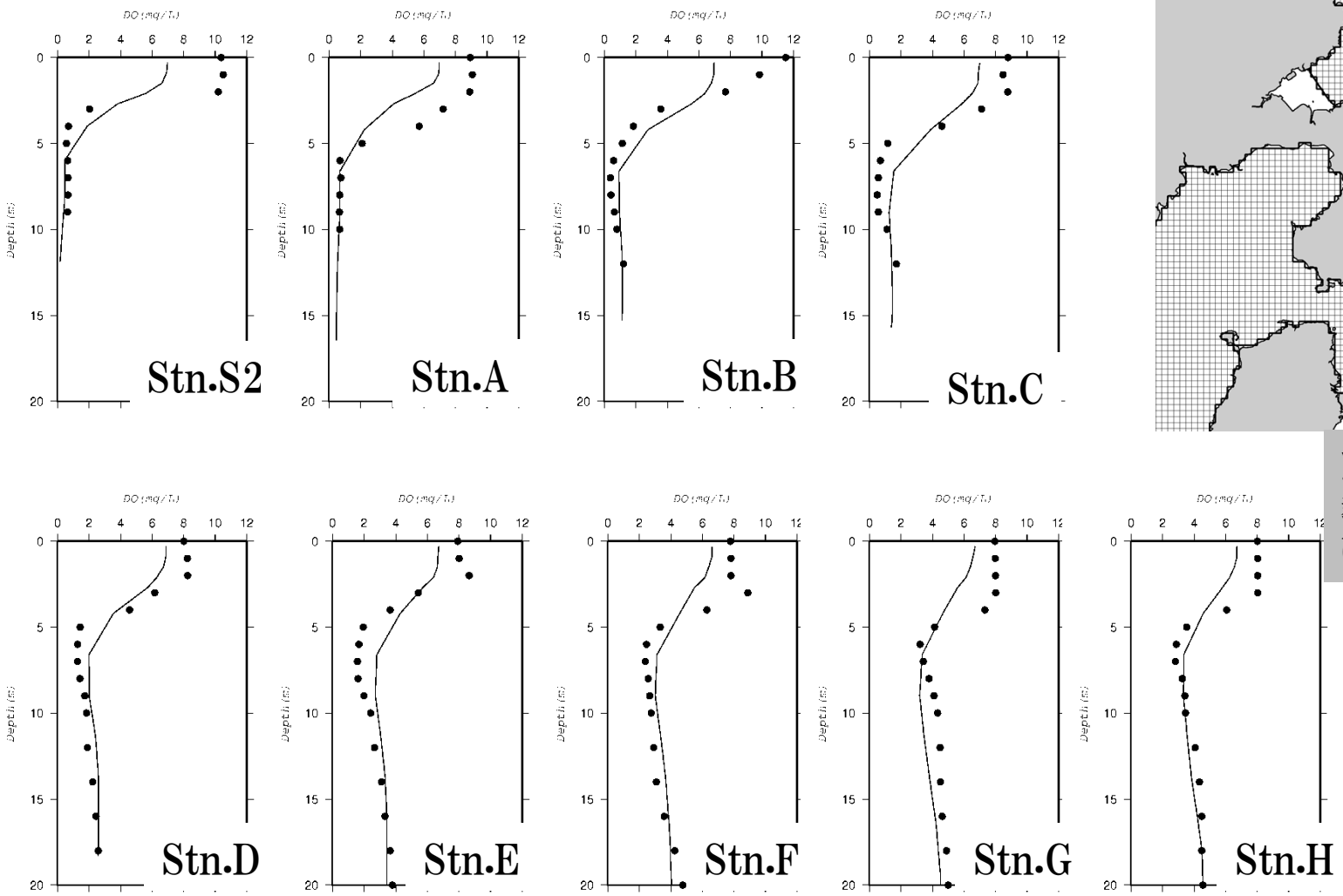
Stn.6

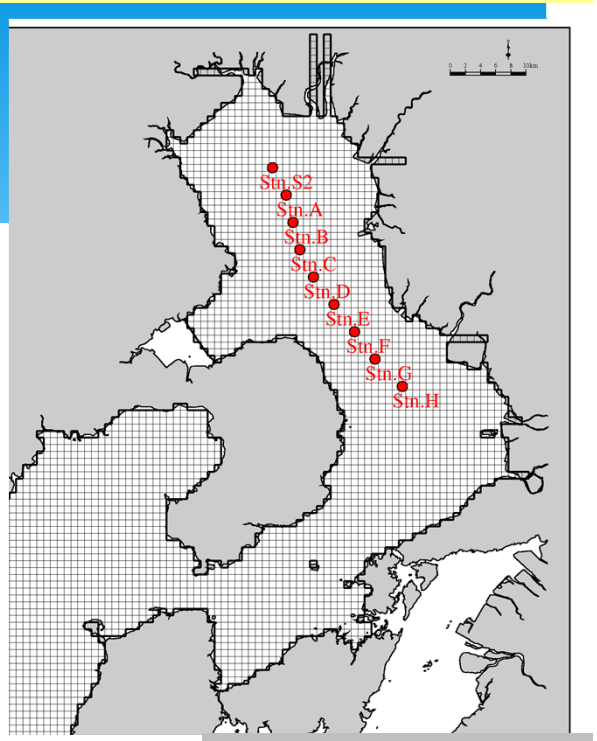


「浅海定線調査」
より観測値を引用

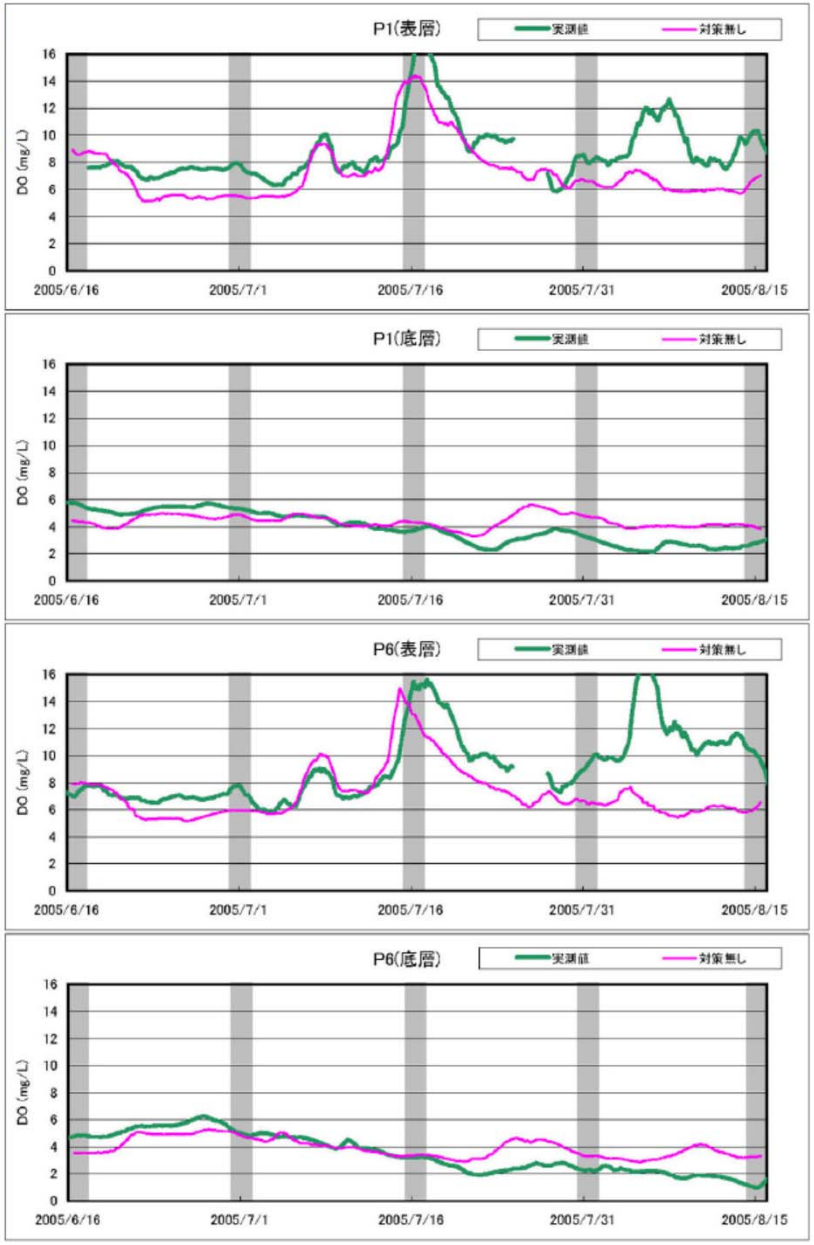
楠田プロジェクトJSTモデルの構築・検証

■貧酸素化の再現性



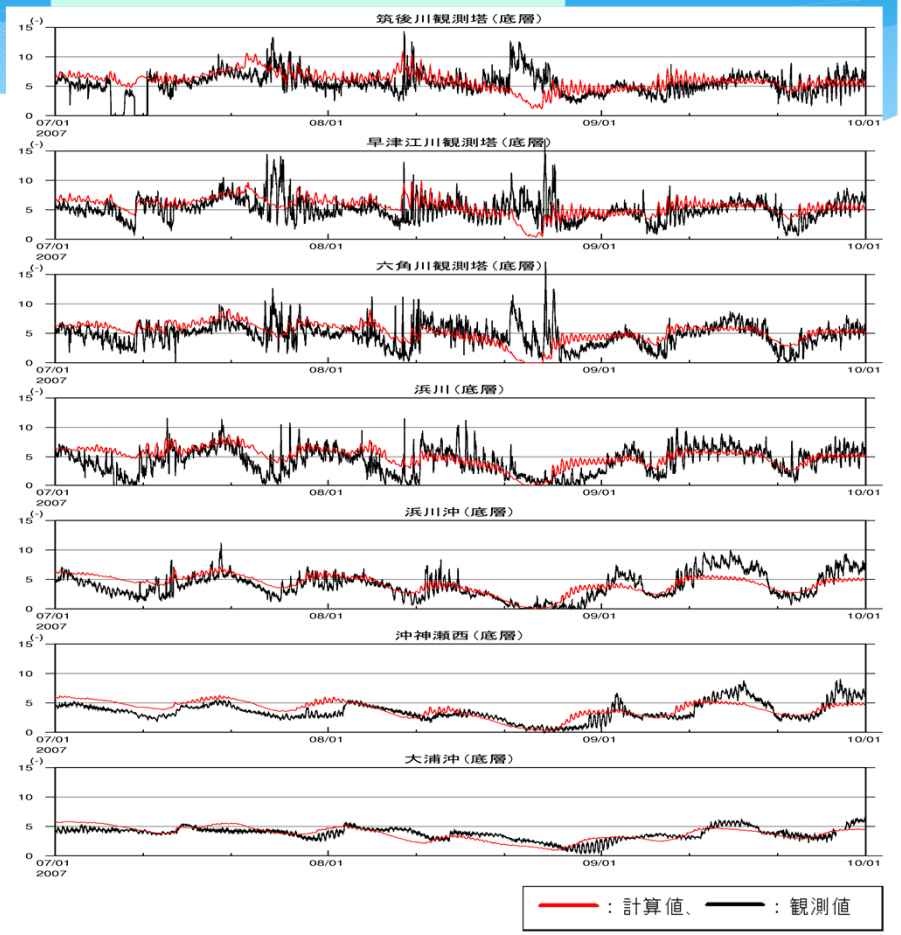


熊本県立大学　堤教授の調査結果より観測値を引用



溶存酸素濃度(DO) 鹿島モデルによる解析

2007年の連続データとの比較



※「貧酸素水塊漁業被害防止対策事業」(水産庁)並びに「有明海・八代海再生重点課題対策調査(環境省)による調査結果を提供していただいた

溶存酸素濃度(DO)

JSTモデルによる解析

長期観測記録(浅海定線調査)との比較

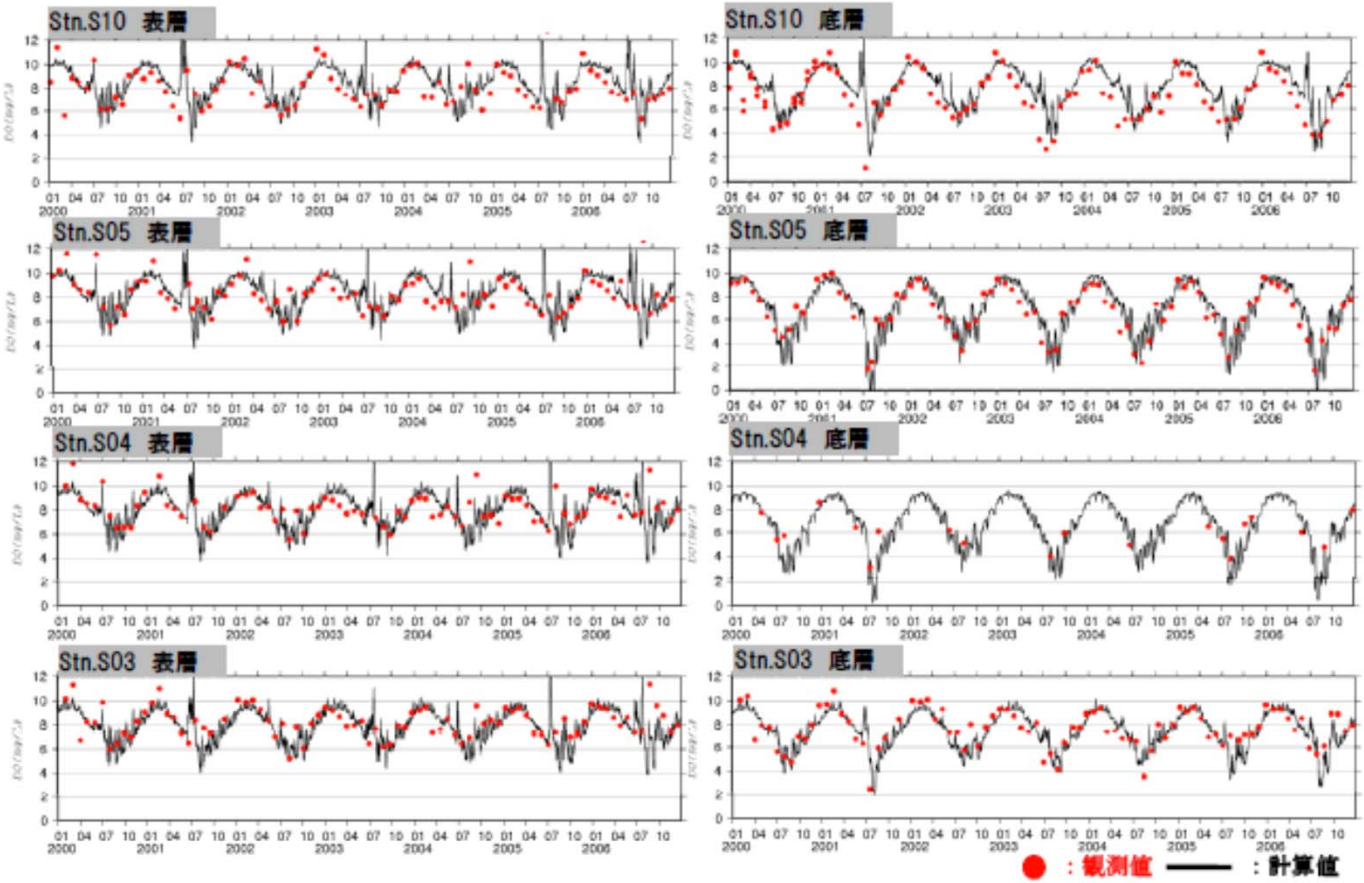
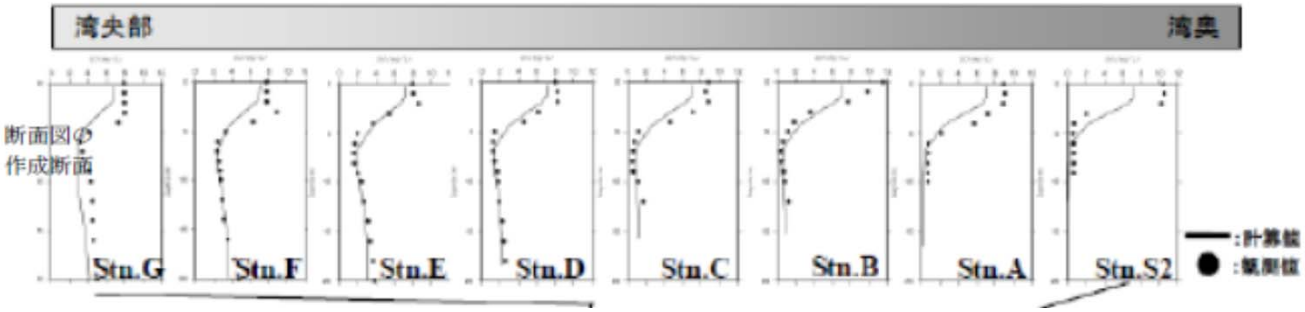


図-11　DO の観測値（浅海定線調査）と計算値の比較（2000～2006 年

JSTモデルによる解析



2000年から2006年おける貧酸素発生状況

JSTモデルによる解析

2001年、2006年
貧酸素水塊の容積大

夏場に大きな出水
強い成層構造

2003年

大きな出水

日照時間が少なく
気温が低い

大きな貧酸素水塊発生せず

貧酸素

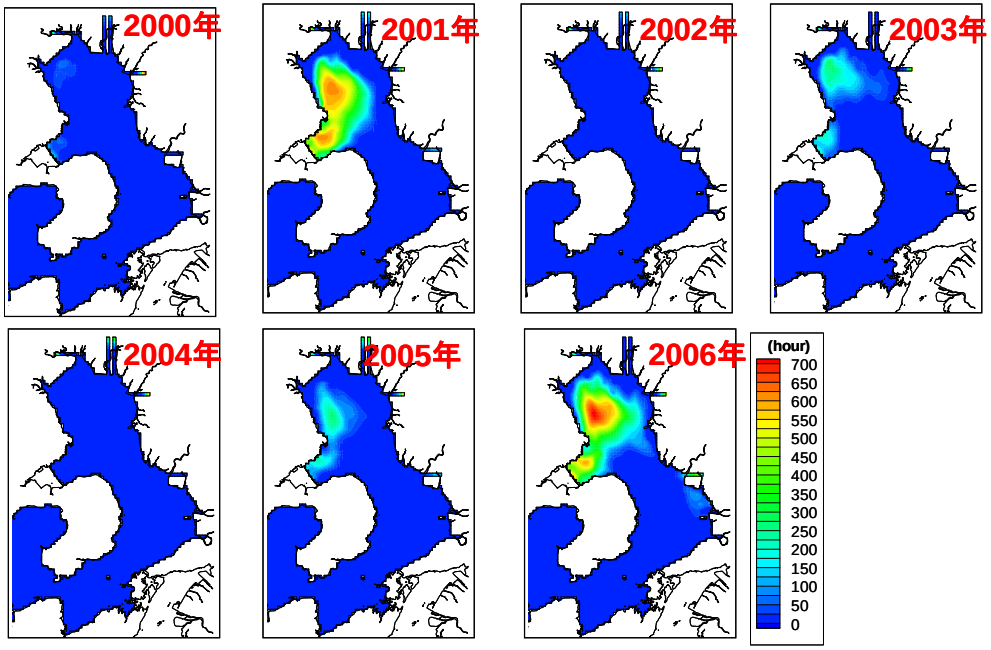
河川からの出水と日照時間に強く依存

観測結果と合致

シミュレーションモデルで再現可能

状況 ＼ 対象年		2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年
貧酸素水塊の容積(km^3×day)	2.0mg/L以下	0.1	**38.9**	0.0	3.1	0.0	4.4	**33.5**
	4.0mg/L以下	99.8	257.4	24.5	174.2	46.4	207.9	355.3
降水量（佐賀地方気象台） (mm)		959	1192	564	1022	900	663	1154
全河川流量 (10^3×m^3/s)		1697	2151	1037	2812	1666	1571	3418
全流入負荷量 (COD) (kg/s)		13336	22038	7536	21417	12039	16942	30923
気温（佐賀地方気象台） (℃)		25.8	26.0	26.0	25.4	26.5	26.6	26.1
日照時間（佐賀地方気象台） (h)		708	781	799	611	719	715	668
M_2振幅に関するF値の2000年比		1.00	0.988	0.976	0.965	0.956	0.950	0.948

- DO＜2.1mg/Lの継続時間（年間累積値）



■JSTモデルにより再現された貧酸素水塊の挙動

1. 同一のパラメータを用いた7年間の現況計算から、貧酸素水塊の発生規模が経年的に大きく異なることを表現した。近年では2006年が最も顕著であった。
2. 貧酸素水塊の発生が顕著な海域は湾奥西部の海域および諫早湾であった。
3. 小潮期に貧酸素水塊が発生し、大潮とともに解消する明瞭な周期性が表現された。
4. 湾奥部の貧酸素水塊の発生時期(7月中旬)には、最初に干潟縁辺部で貧酸素水塊が発生し、その後徐々に湾奥部の中央まで広がっていく。また解消する時期には干潟縁辺部から先に解消している様子が再現された。
5. 中層に貧酸素水塊がみられる現象も表現された。

シミュレーションモデルの到達点

流動モデル

潮位・潮流速、塩分濃度、水温

九大モデル、佐大モデル
JSTモデル　鹿島モデル

観測塔での観測値とほぼ一致

時系列まで再現可能

低次生態系モデル

懸濁物輸送、プランクトン発生消失
水質　物質循環　底質　底生生物

JSTモデル　鹿島モデル

観測塔での溶存酸素(DO)観測値

時系列までは再現できていないが、傾向とオーダーは一致

生物生活史モデル

アサリ、サルボウ、スズキ等の
資源量(漁獲量)

JSTモデル

検証に用いるデータが十分に得られていない

有明海モデルを用いて貧酸素の原因を探る

潮流が遅くなって異変が起こったか？

潮位差（干満差）小さくなると→流速が遅くなる

潮位差は同じでも障害物ができると局所的に流速は変化する

諫早湾締切

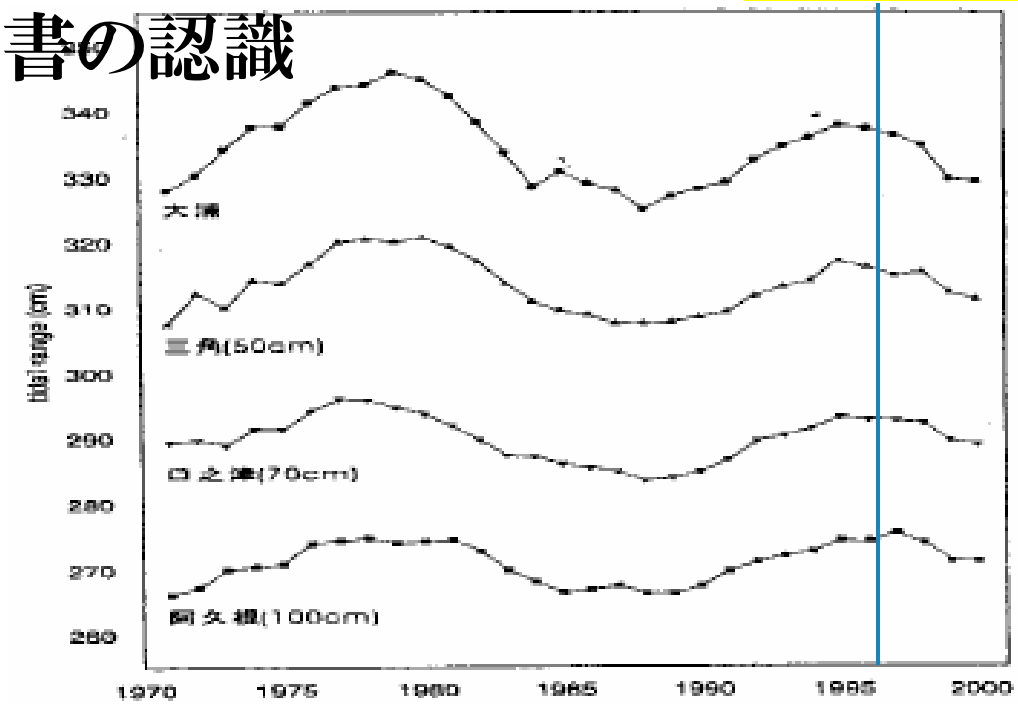
●環境省評価委員会報告書の認識

■湾奥ほど潮位差の年平均値とその変動幅の経年変化が大きい

■M2 分潮のf と振幅自体の変動でほぼ説明できる

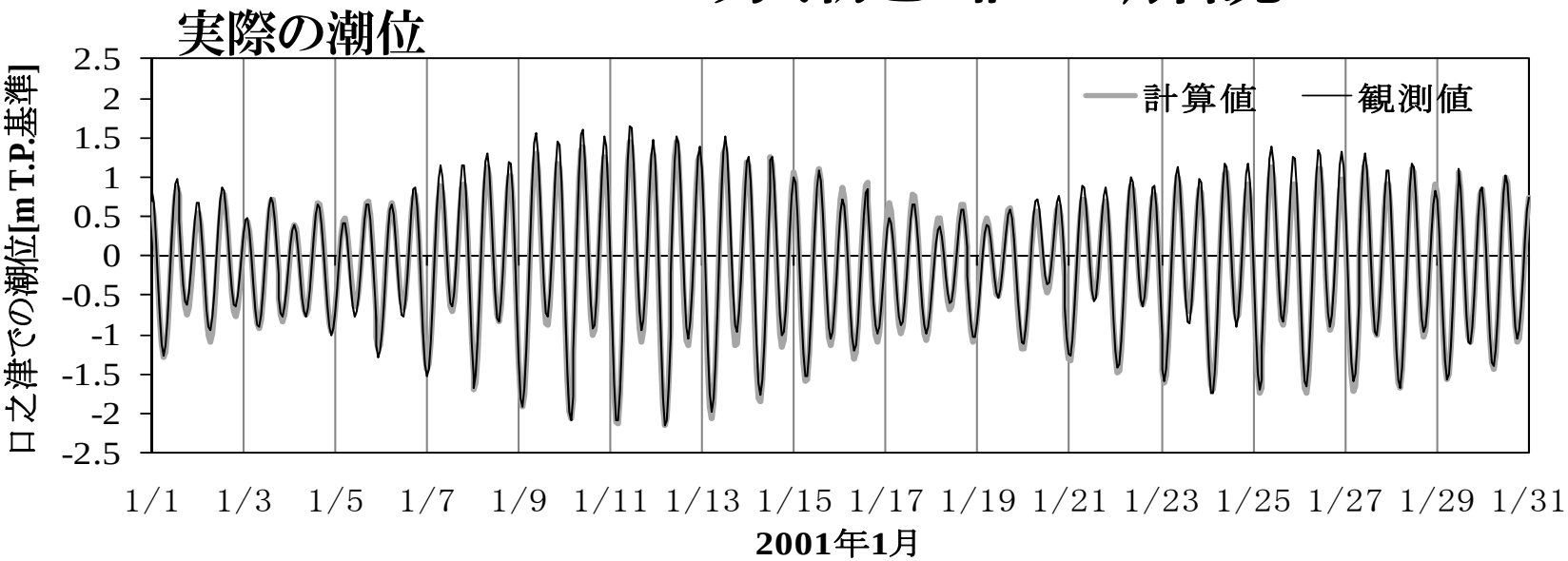
■潮位差減少への諫早湾の潮受堤防の影響

両論併記



各観測点の年平均潮位差

M2分潮とf値の解説



口之津検潮所での潮位振幅

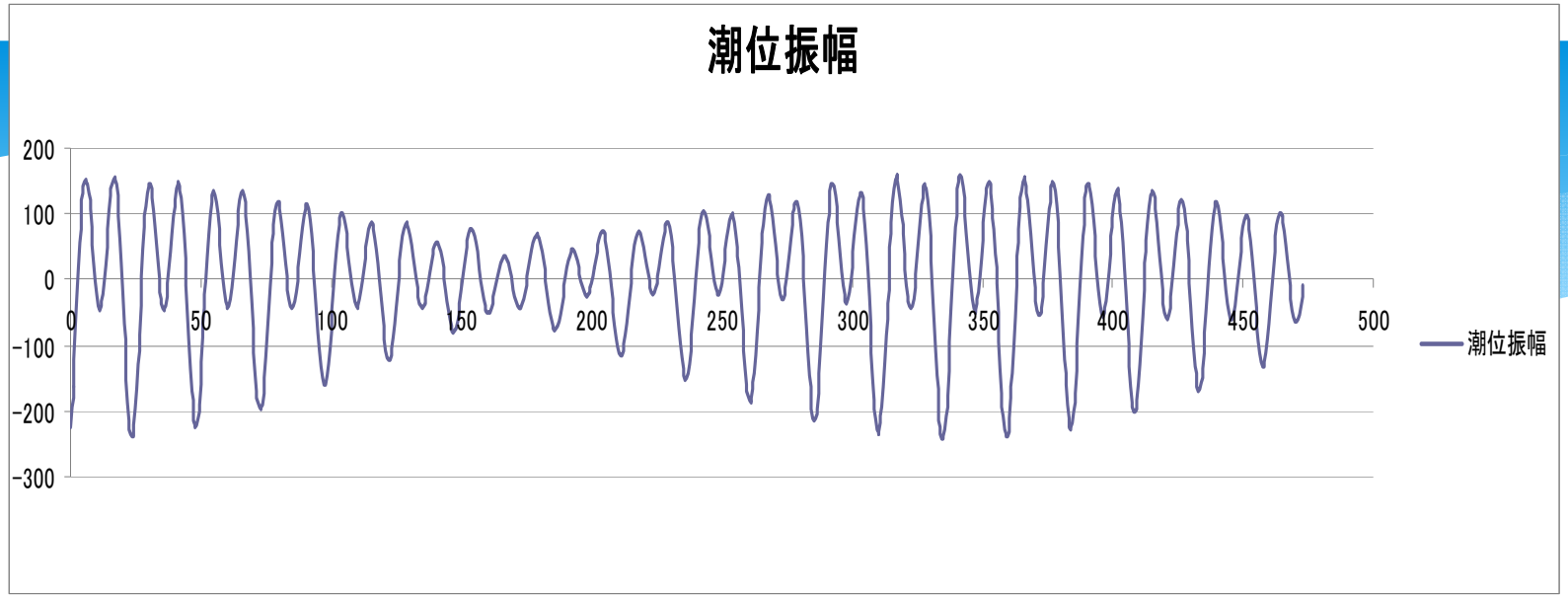
分潮に分解

$$\eta = \sum_{i=1}^{38} a_i \cos\left(\frac{2\pi}{T_i} t + b_i\right)$$

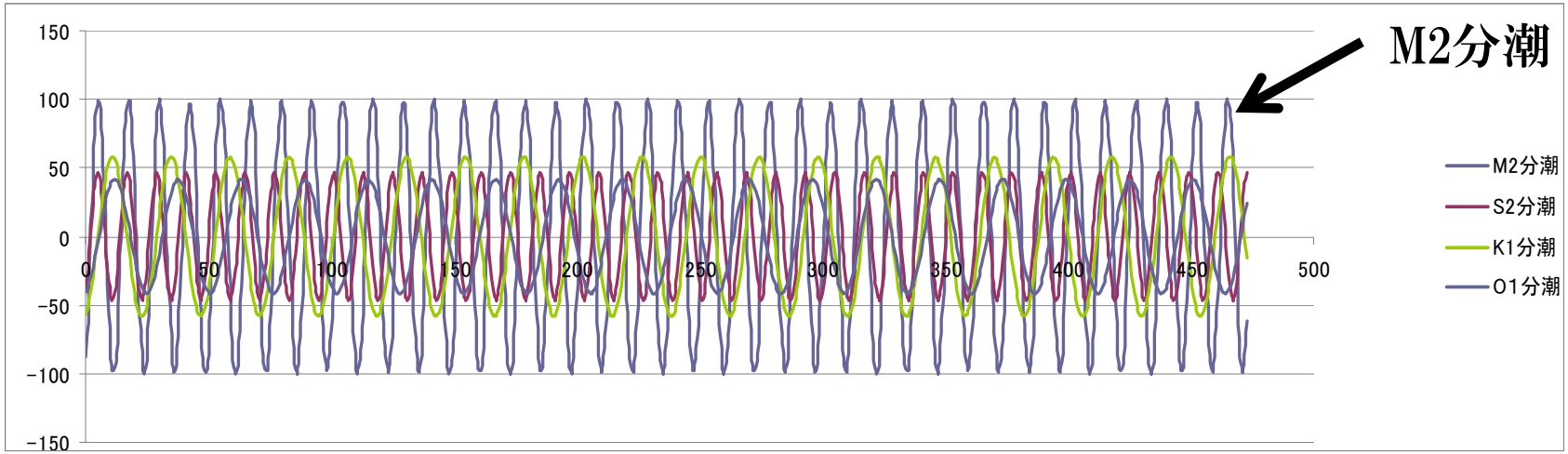
主要4分潮

	分潮周期(h)	角速度(rad/h)	相対的な振幅(M2=100)	名前
M2	12.4206012	0.505868	100.0	主太陰半日周潮
S2	12.0000000	0.523599	46.7	主太陽半日周潮
K1	23.9344697	0.262516	58.4	日月合成日周潮
O1	25.8193417	0.243352	41.5	主太陰日周期

中野(1940)



和を取る

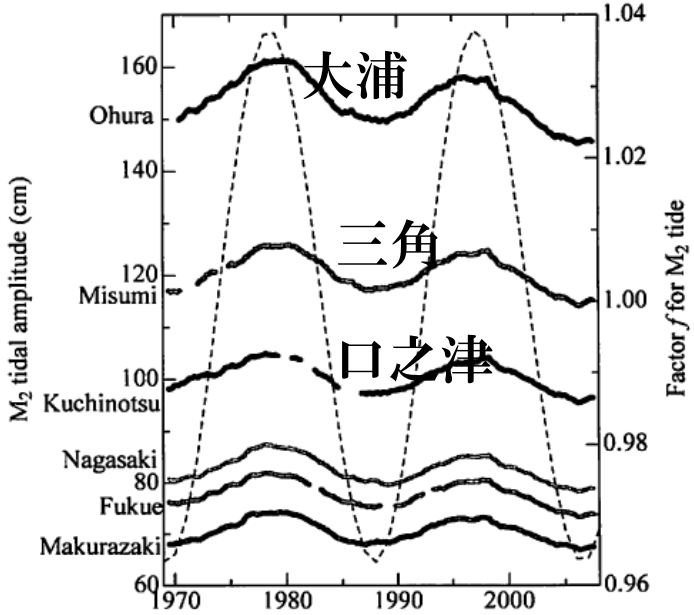


主要M2分潮による潮位・流速を検討する

fの振幅(18.6年周期)

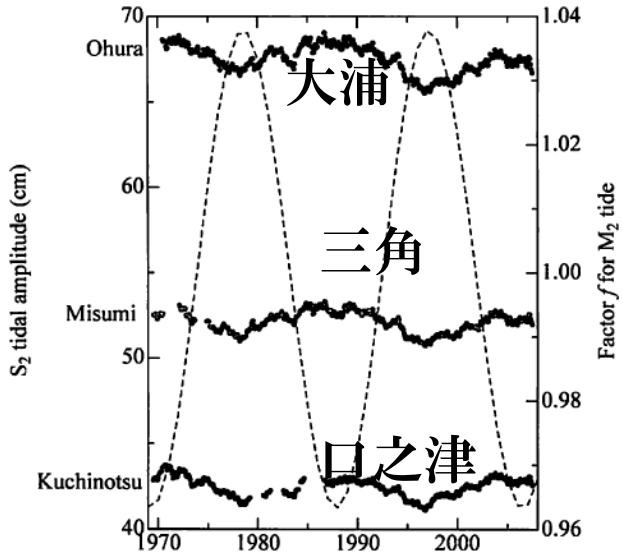
月の交点が18.6年周期で移動すること
による潮位差の変動

M2(主太陰半日周期)K1(日月合成日周期)
O1(主太陰日周期)はその影響を受ける



S2(主太陽半日周期)は地形の影響
を除けば受けないはず

実際は僅かながらM2潮と逆位相の
変動を示している

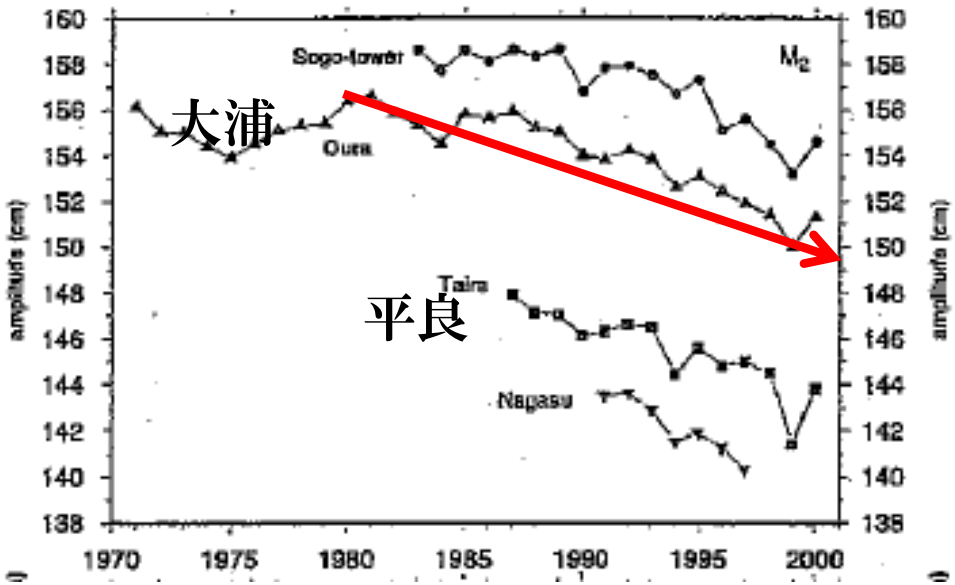


Godin &Gutierrez(1986) 北アメリカ大陸東海岸Fundy湾
M2潮の変動の影響を受けてS2潮がM2潮と逆位相で変動
この原因を海底摩擦などの非線形効果であるとした

月の交点:地球の公転面(黄道面)と月の軌道面との交点
交点の移動:交点は歳差により移動する。その周期が18.5996年

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**

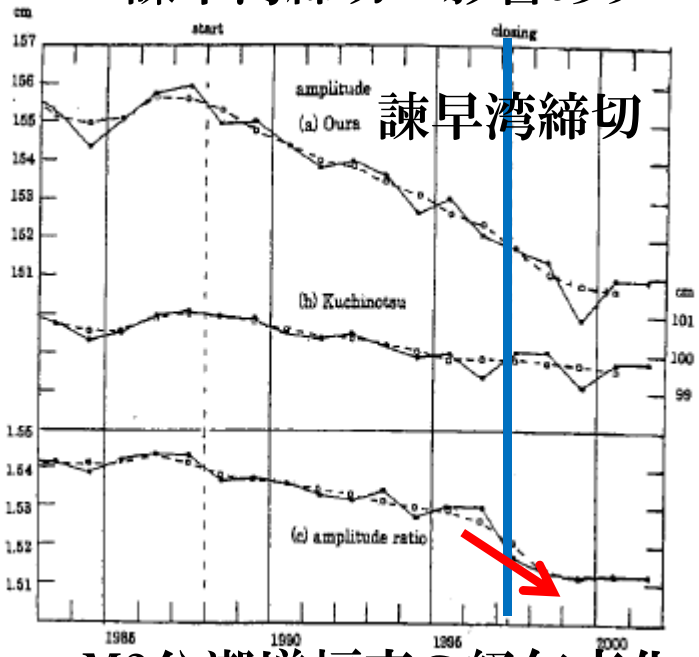
大浦の振幅 / 口之津の振幅 ＝増幅率

諫早湾締切の影響あり

大浦

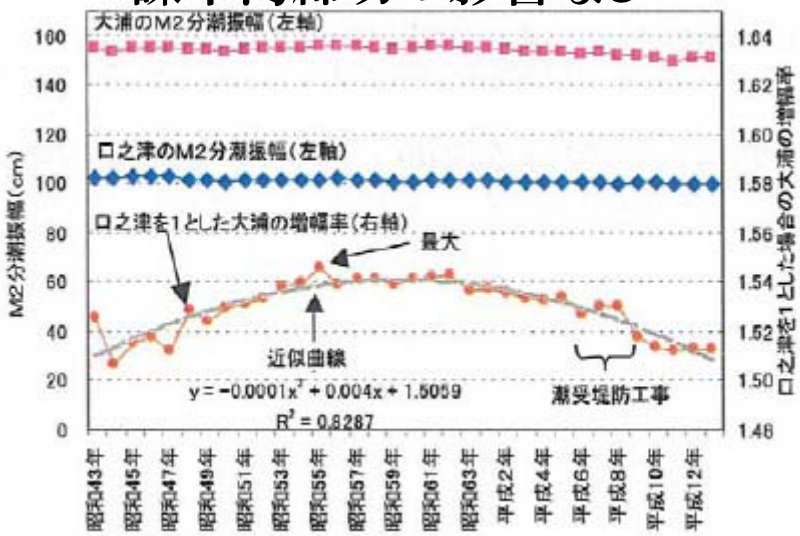
口之津

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

潮流速

諫早湾

観測結果

湾奥は明確に減少
湾口　若干減少
湾外　ばらつきが大きく傾向が明確でない

島原半島沿岸部　1993年と2003の比較
21%～27%減少

シミュレーション結果

流速変化は諫早湾内

有明海全体で最大潮流速度の変化は非常に小さい(0.0～0.1m/s の減速)

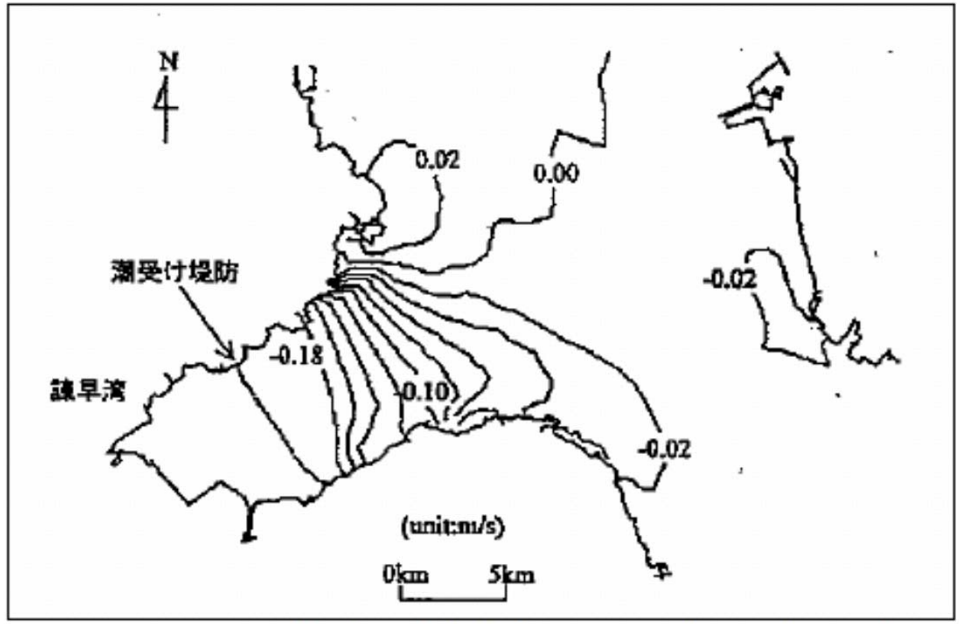


図 3.5.14　下げ潮時の流速強度に関する締切り前後の差

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

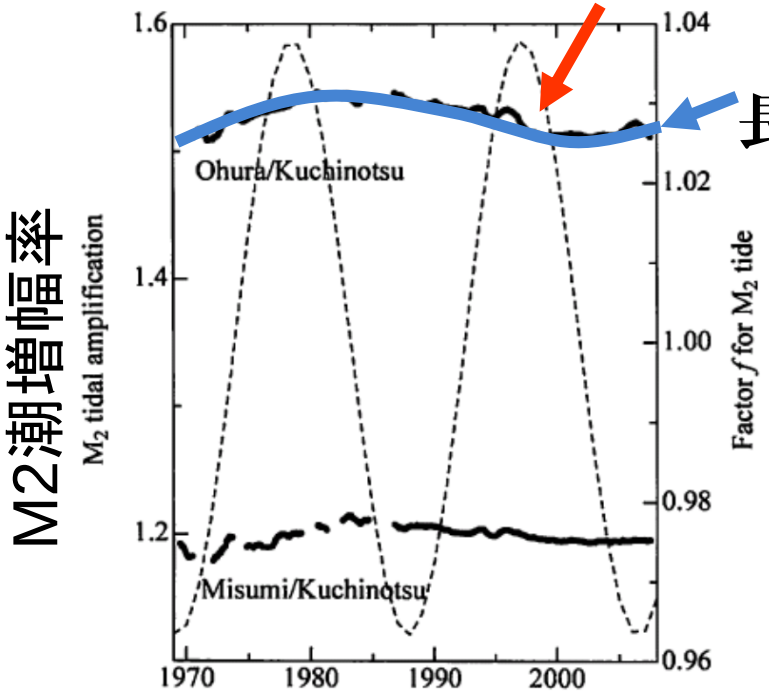


Fig. 2.8 口之津に対する大浦と三角の M_2 潮増幅率の時間変動

湾口口の津に対する大浦　三角

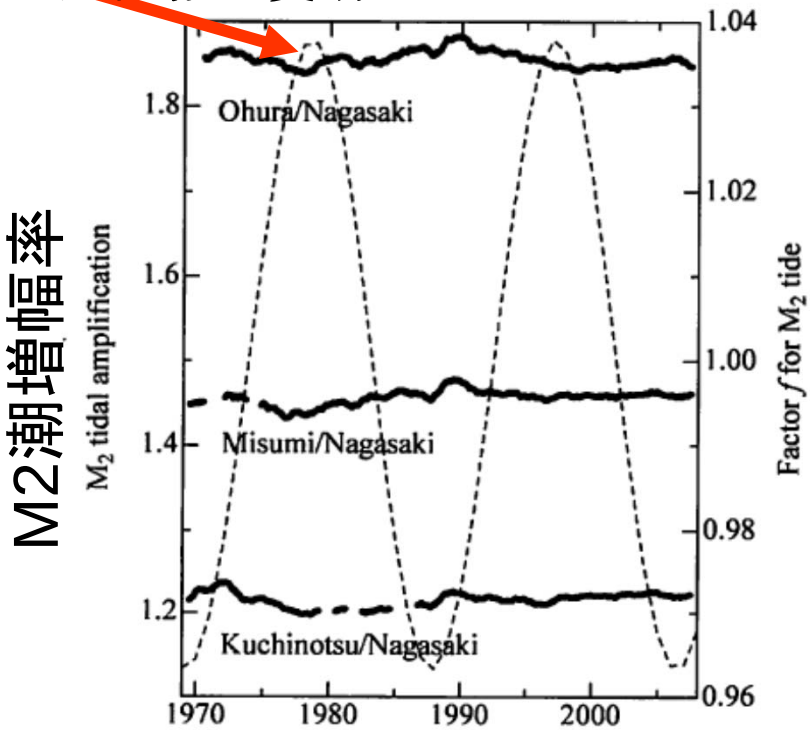


Fig. 2.9 長崎に対する有明海内の M_2 潮増幅率の時間変動

外海長崎に対する大浦　三角

半日周期潮汐の長期(80年)変化

三角験潮所(1931年観測開始)

厳原験潮所(1941年観測開始)

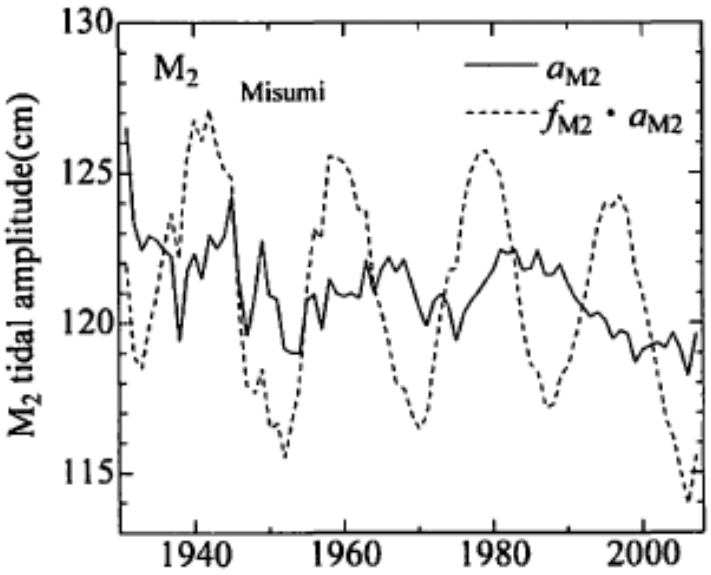


Fig. 3.6　三角における M_2 潮の潮汐振幅の時間変動

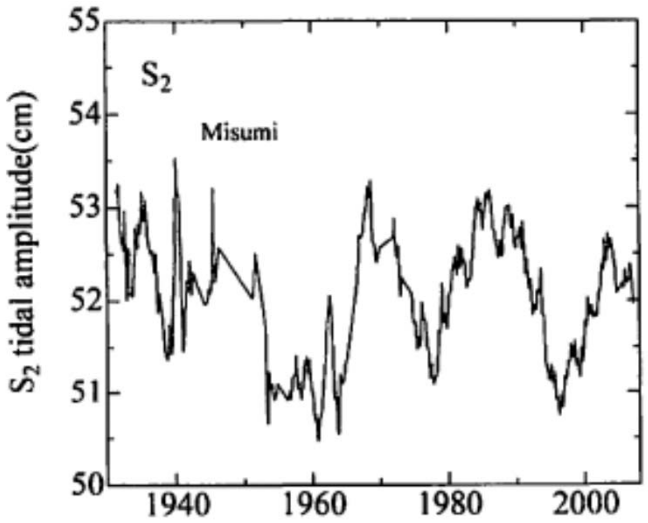


Fig. 3.7　三角における S_2 潮の潮汐振幅の時間変動

外海（厳原）でも
外国（ハリファックス）でも

M2分潮振幅は長期的に
減少している

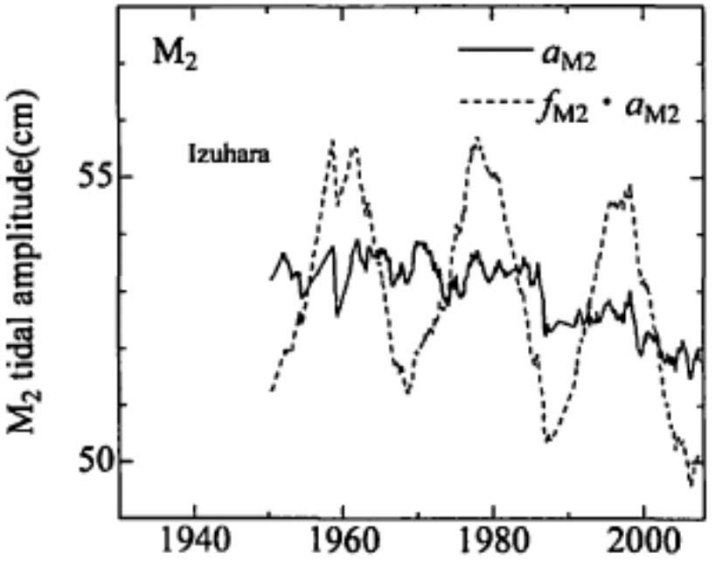


Fig. 3.8　厳原における M_2 潮の潮汐振幅の時間変動

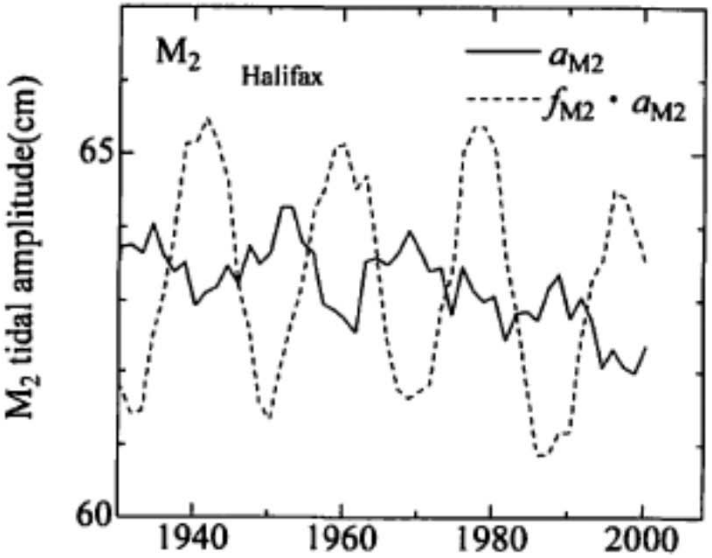


Fig. 3.10　ハリファクスにおける M_2 潮の潮汐振幅（Ray（2006）より引用）

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

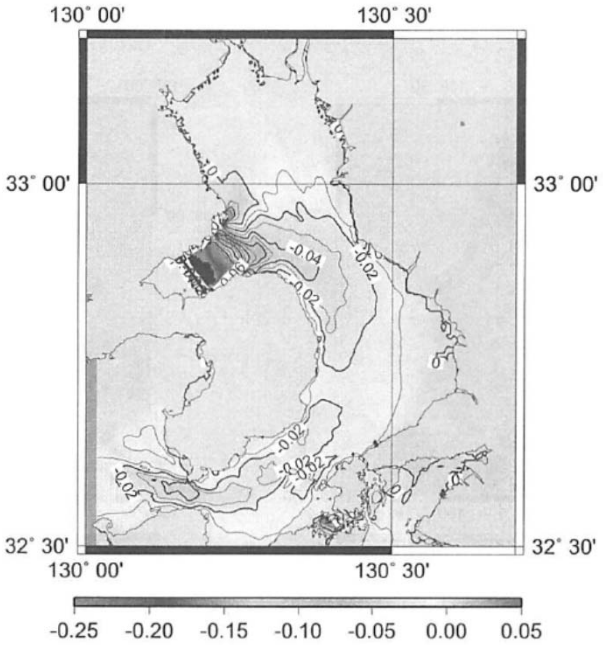


Fig. 5.19　1980 年代から 2000 年代の M_2 潮潮流振幅の変化量（m/s）

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

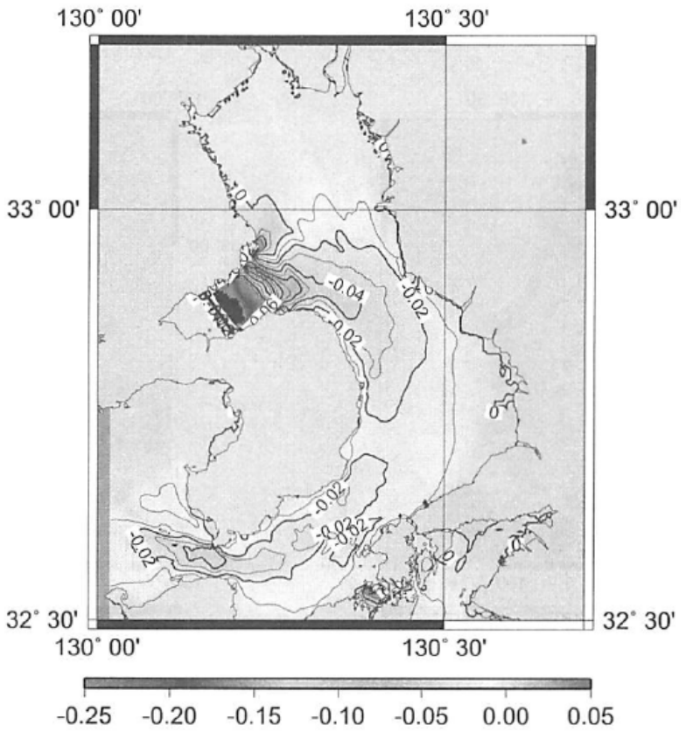
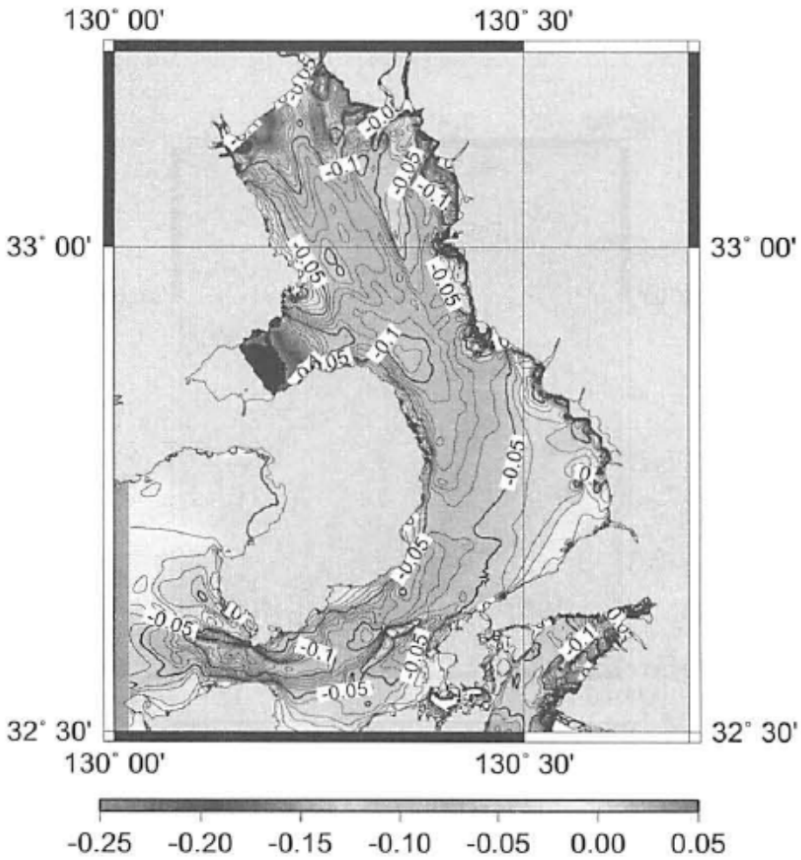


Fig. 5.19　1980 年代から 2000 年代の M_2 潮潮流振幅の変化量（m/s）

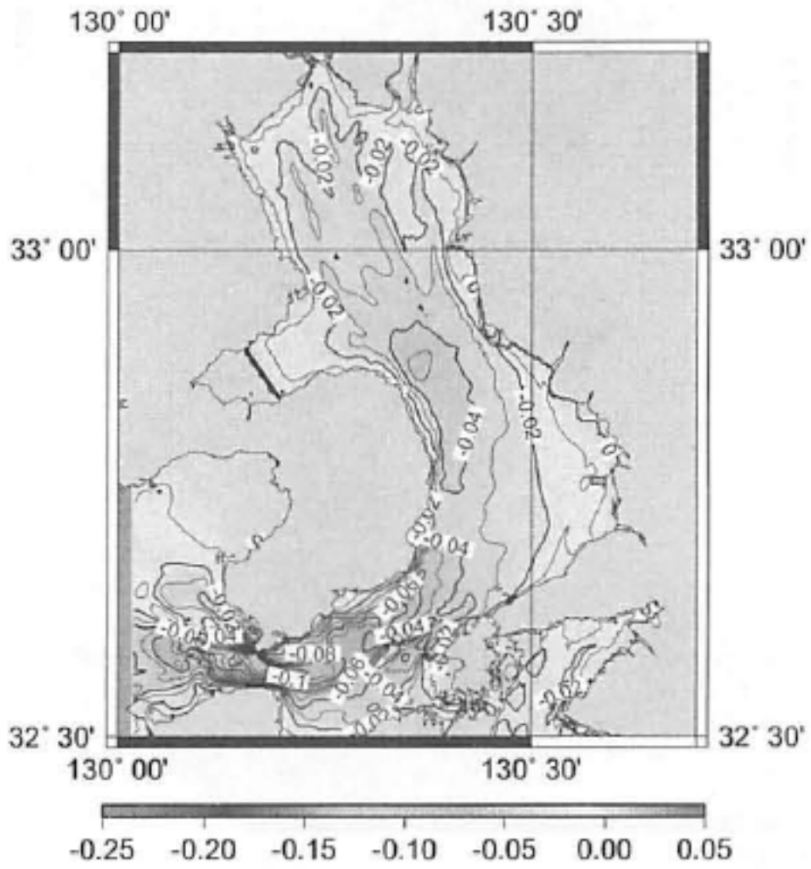
1980→2000　M2潮潮流振幅の変化量



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）

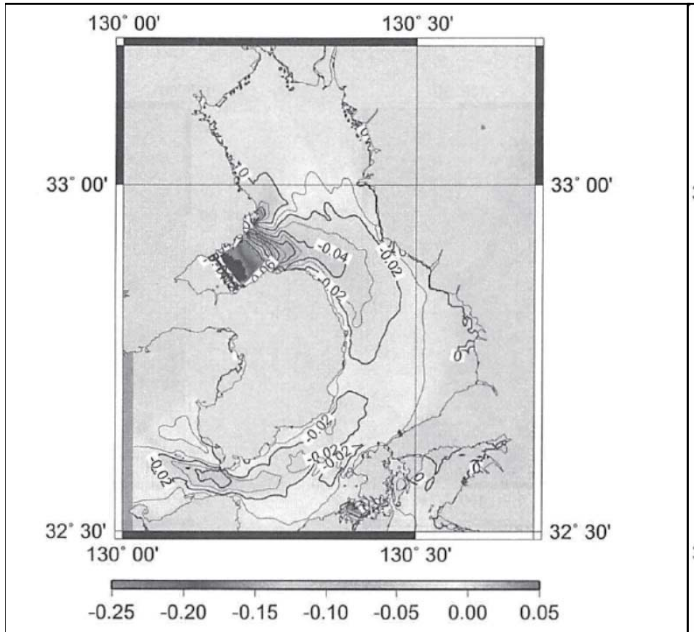
事実の確認

流速の変化

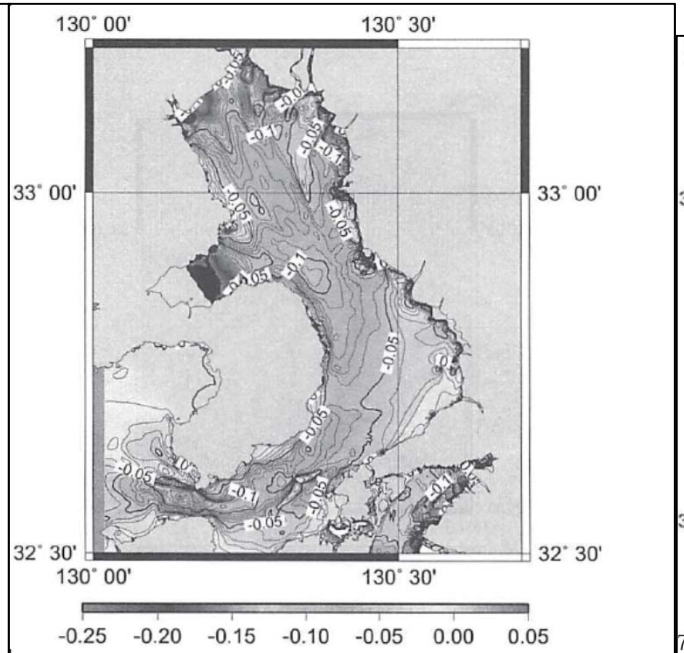
①諫早湾締切によるM2分潮潮流速変化は、諫早湾と大浦・島原半島沖に限られている。（18.6年周期の最大値周辺で計算しているので、この差は締切による影響だけだと考えて良い）（5cm/s～10cm/s程度）

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）

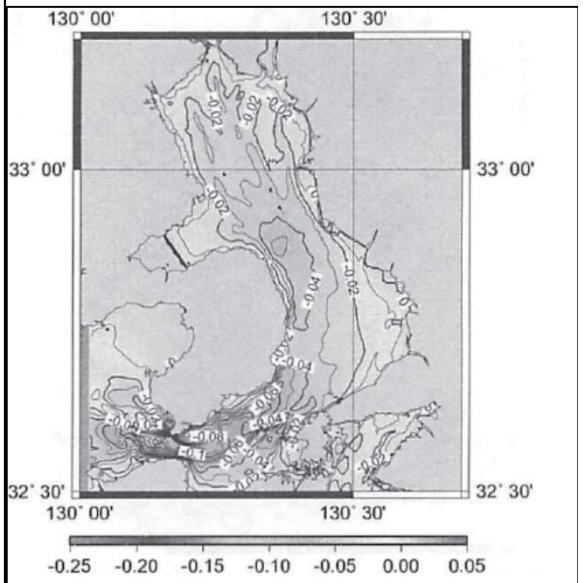
③18.6年周期による潮流速の差は、有明海湾奥部で最大2cm/s程度である



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)

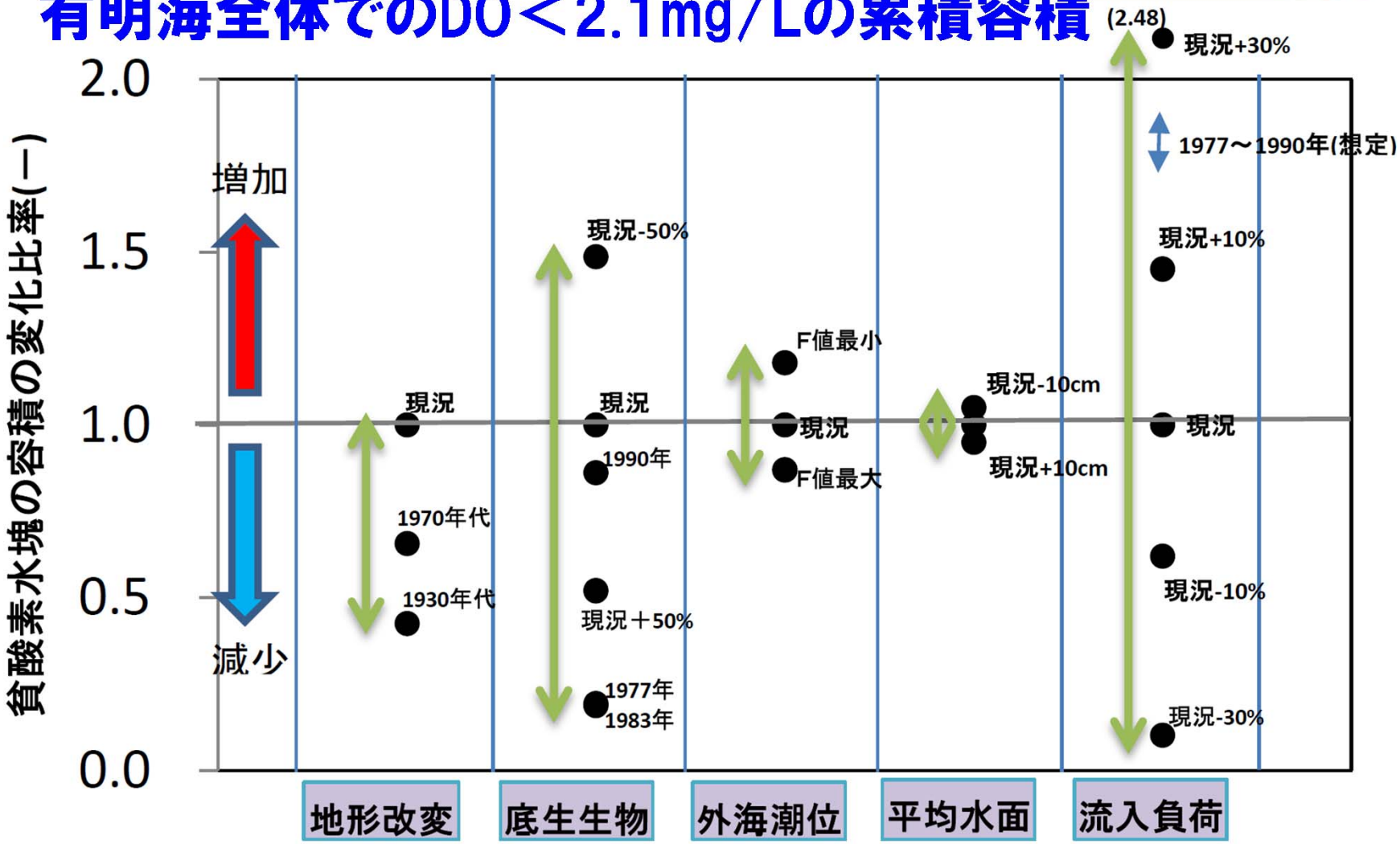


74　f 値の極大値から極小値の M_2 潮潮流振幅の変化量 (m/s)

個別要因の影響度

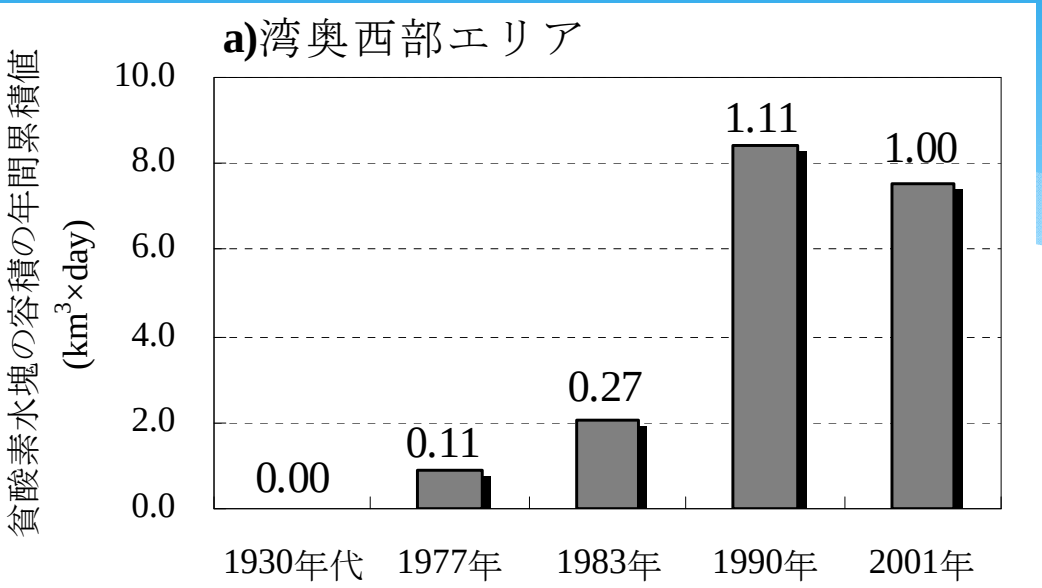
JSTモデルによる解析

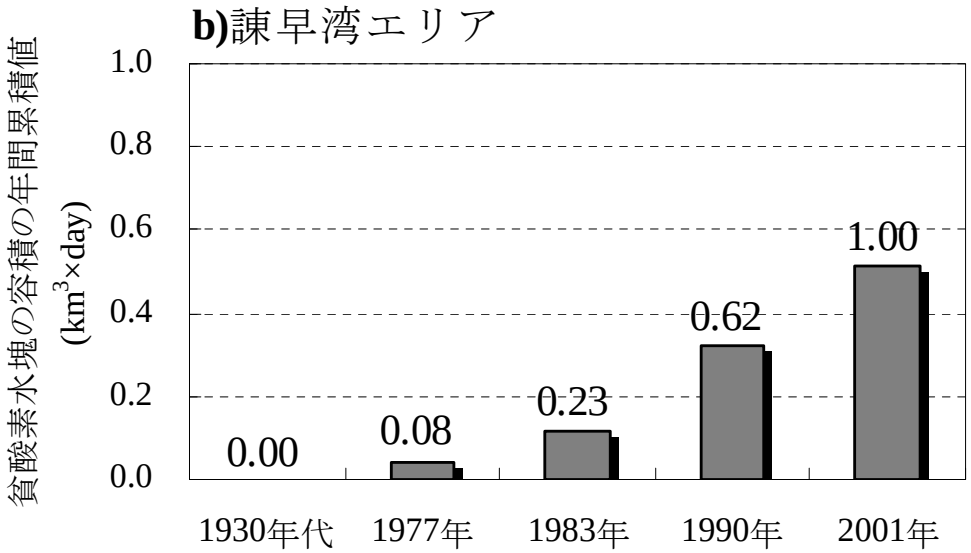
有明海全体でのDO＜2.1mg/Lの累積容積

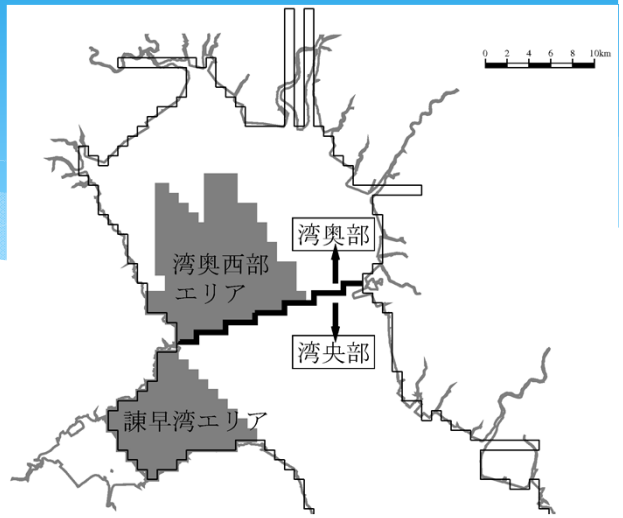


③ 長期的な環境変化による貧酸素水塊の数値実験

■貧酸素水塊の発生規模

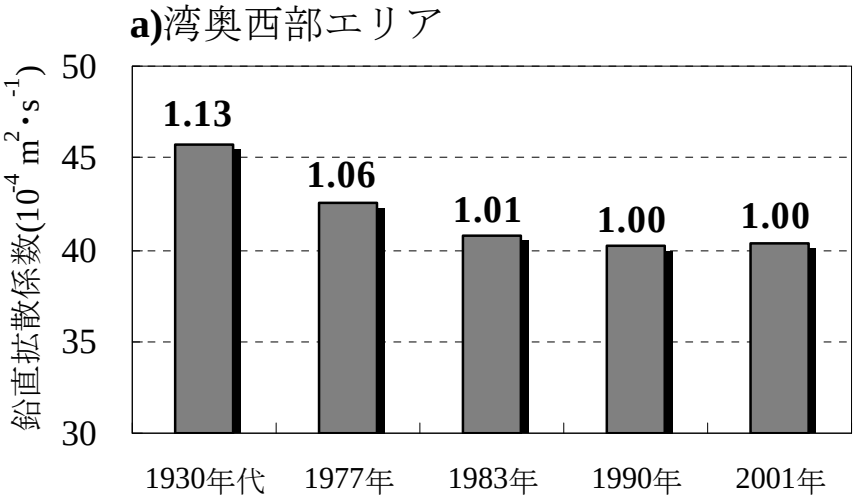


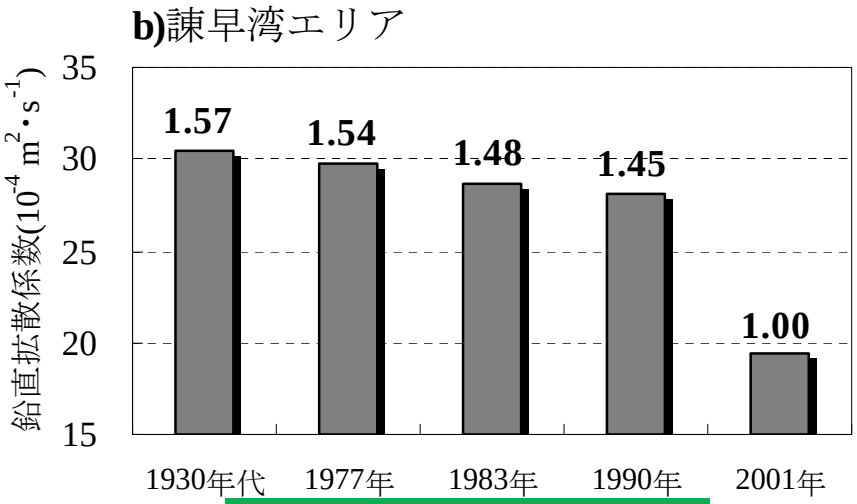




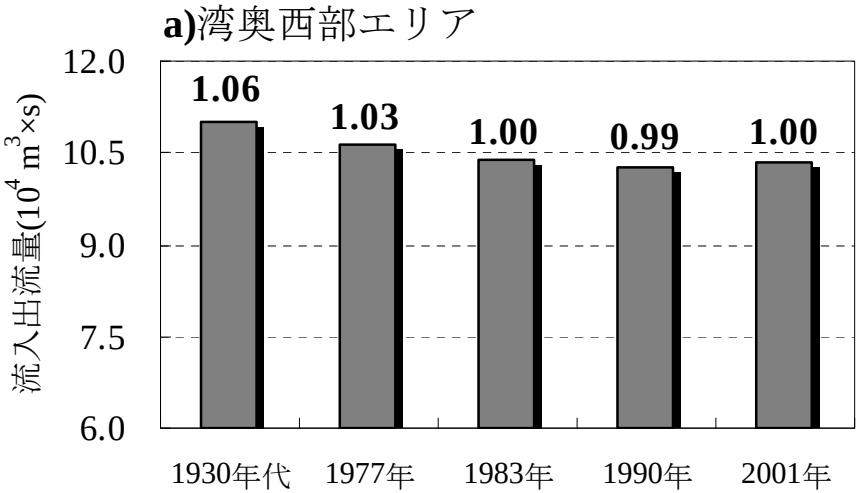
③　長期的な環境変化による貧酸素水塊の数値実験

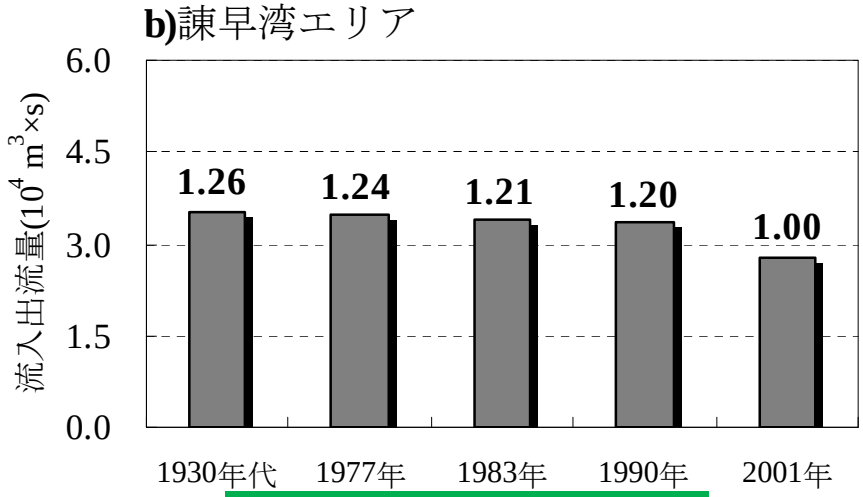
■物理環境の変化





鉛直拡散係数



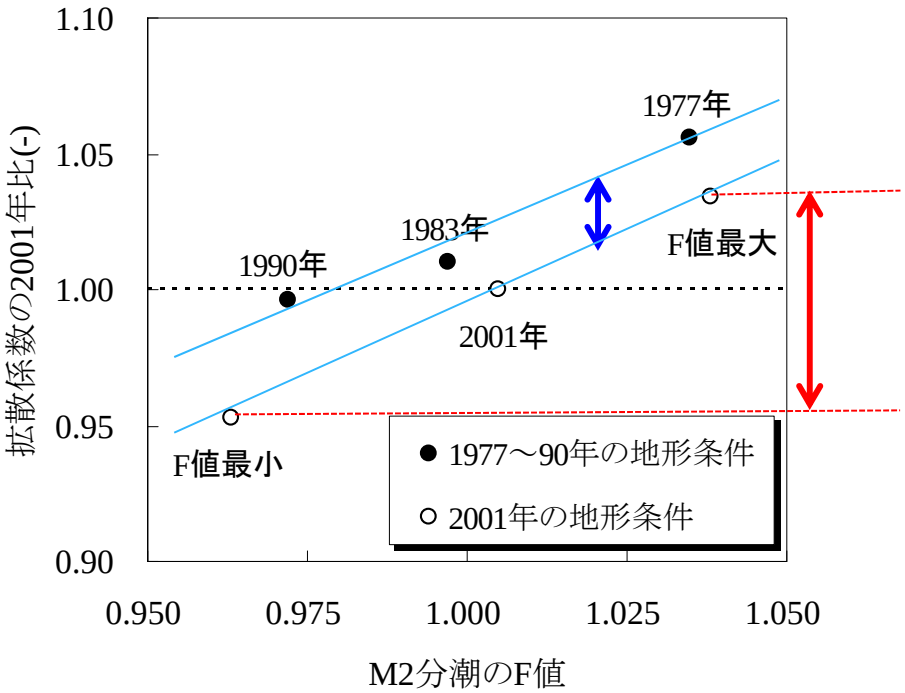


流入出流量

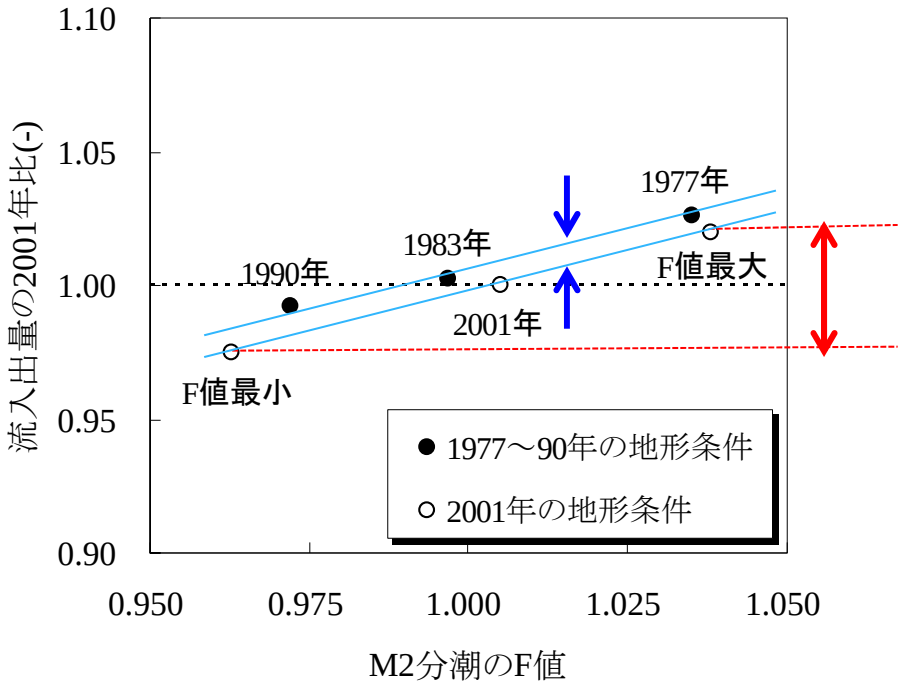
③　長期的な環境変化による貧酸素水塊の数値実験

■物理環境の変化の要因

湾奥西部エリア



鉛直拡散係数



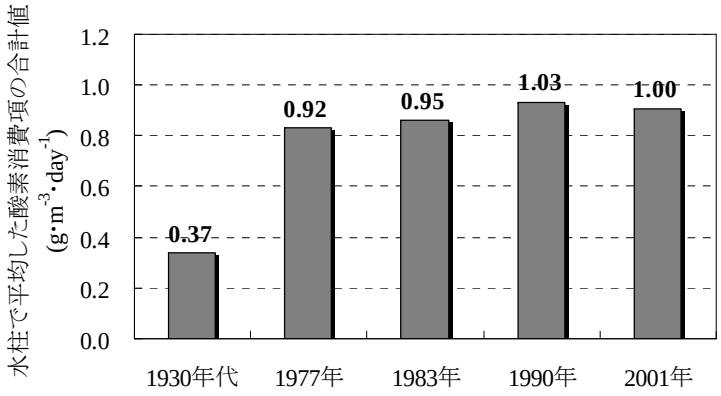
流入出流量

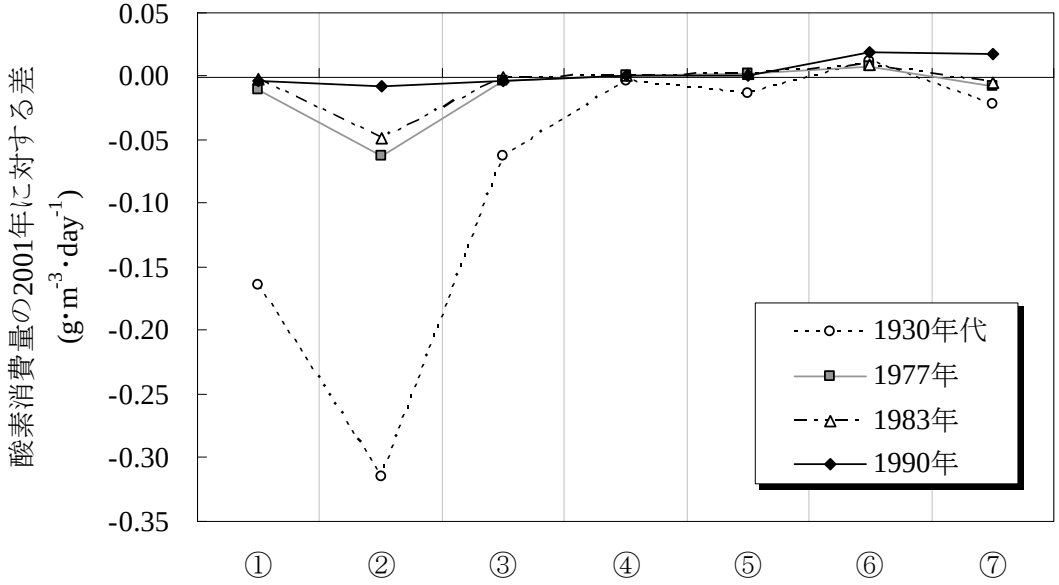
湾奥西部エリアでは、地形条件の影響（⇔）を変更した影響よりも、F値の影響（⇔）による変化幅の方が大きい傾向。

③　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）





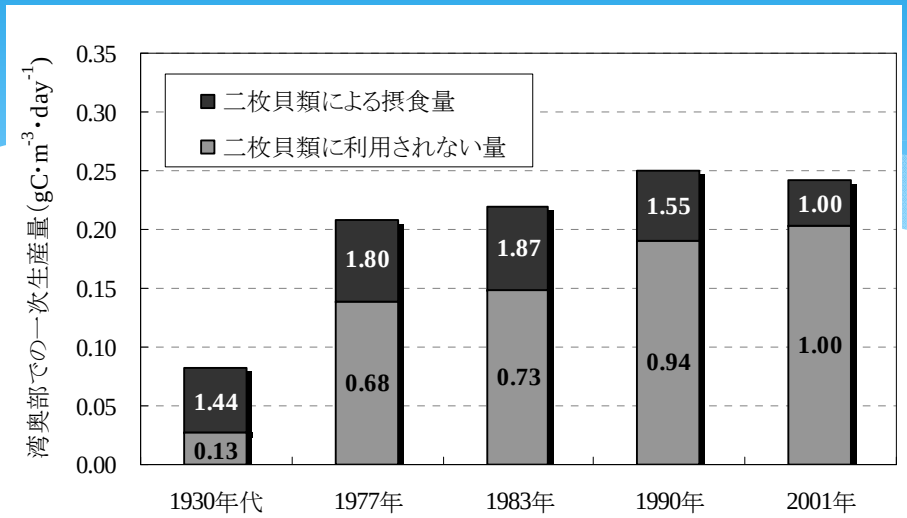
POMの分解や、プランクトンの呼吸などの一次生産に関連した酸素消費の変化が大きい。

全酸素消費量の内訳

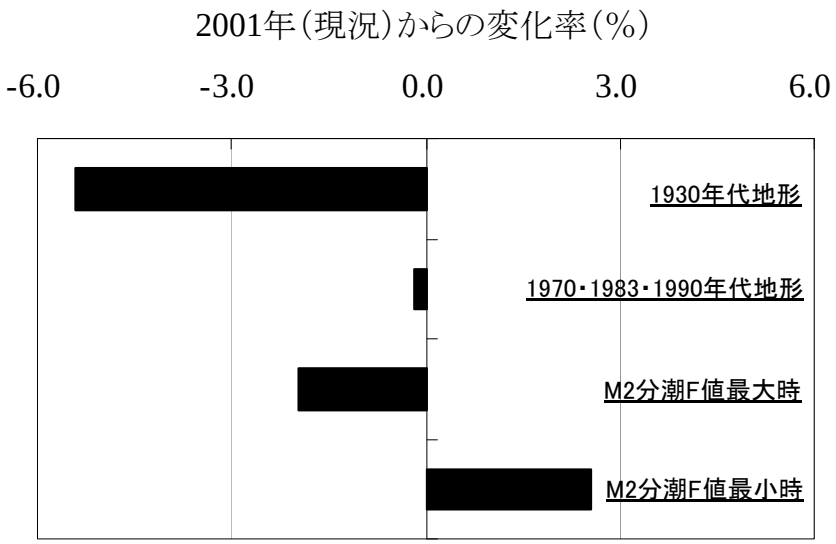
①プランクトンの呼吸
②POMの分解
③DOMの分解
④硝化
⑤底泥による直接的な消費
⑥底生生物の呼吸
⑦ODUの参加

③ 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



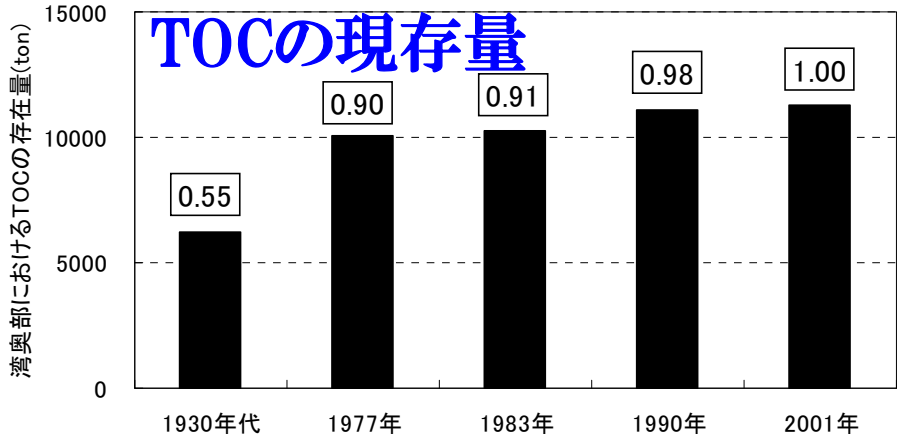
二枚貝類の生息量に依存して、摂食されずに酸化分解へ移行する有機物量が年代ごとに大きく変化しており、1930年代では、現況の13%となっている。



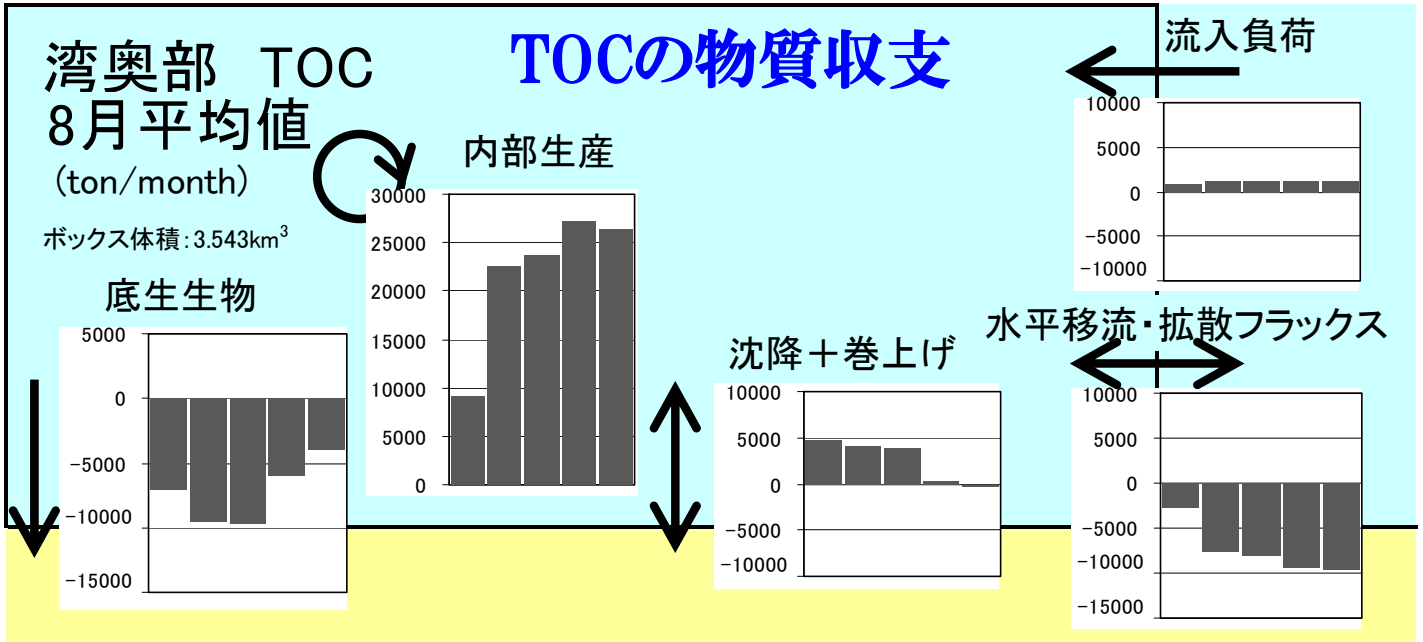
湾奥部での酸化分解へ移行する有機物量は、1930年代の地形条件では5%程度減少している。
一方、外海潮汐の影響でも2～3%程度の変化が見られた。

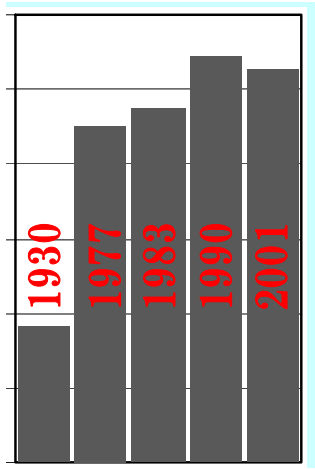
③ 長期的な環境変化による貧酸素水塊の数値実験

■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。

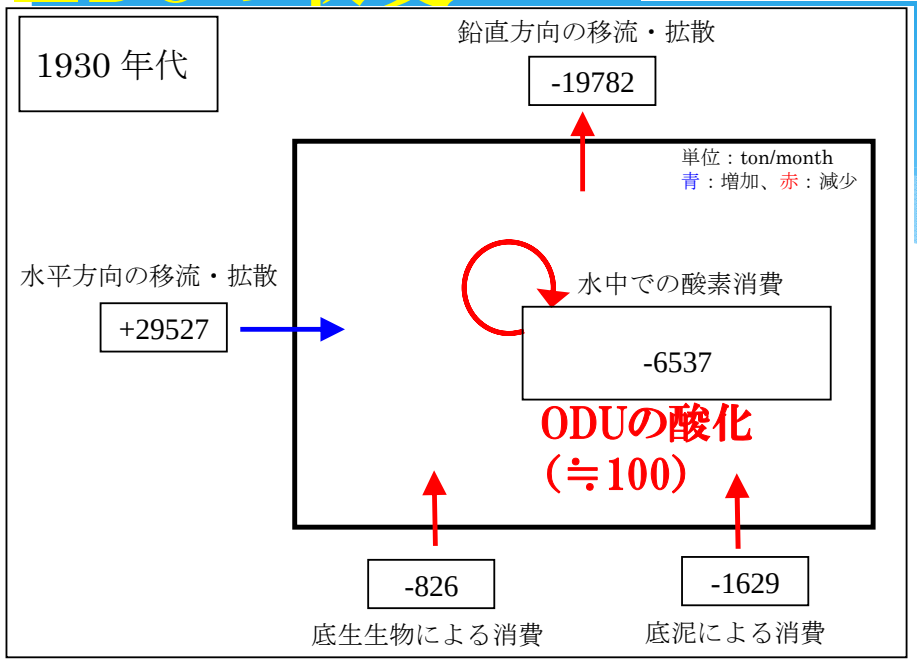


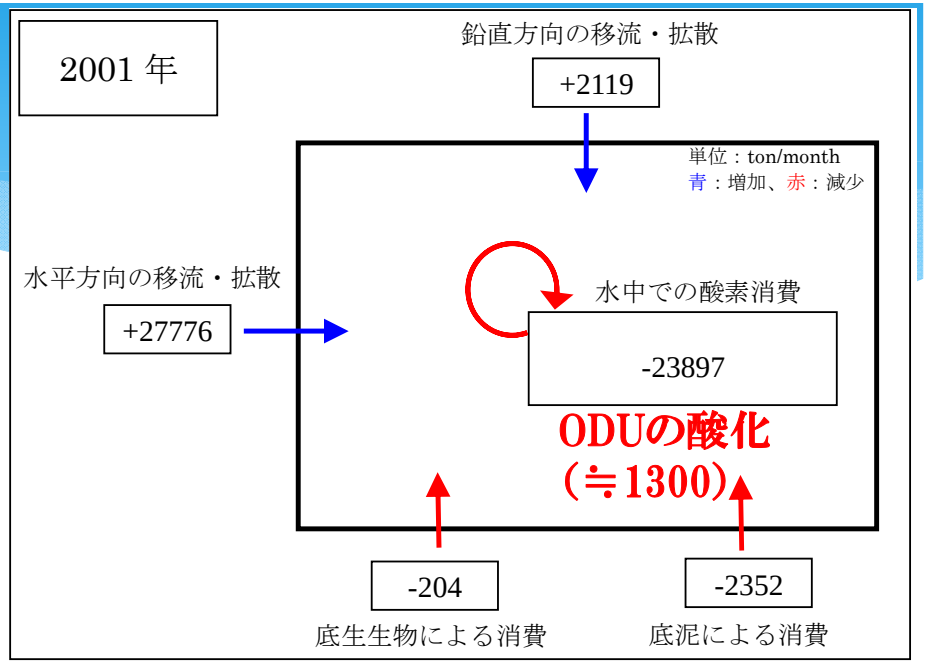


③ 長期的な環境変化による貧酸素水塊の数値実験

■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の参加も含めると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。

③　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）

- 環境－生態系の相関
  （観測・シミュレーション）

里海の思想

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

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）

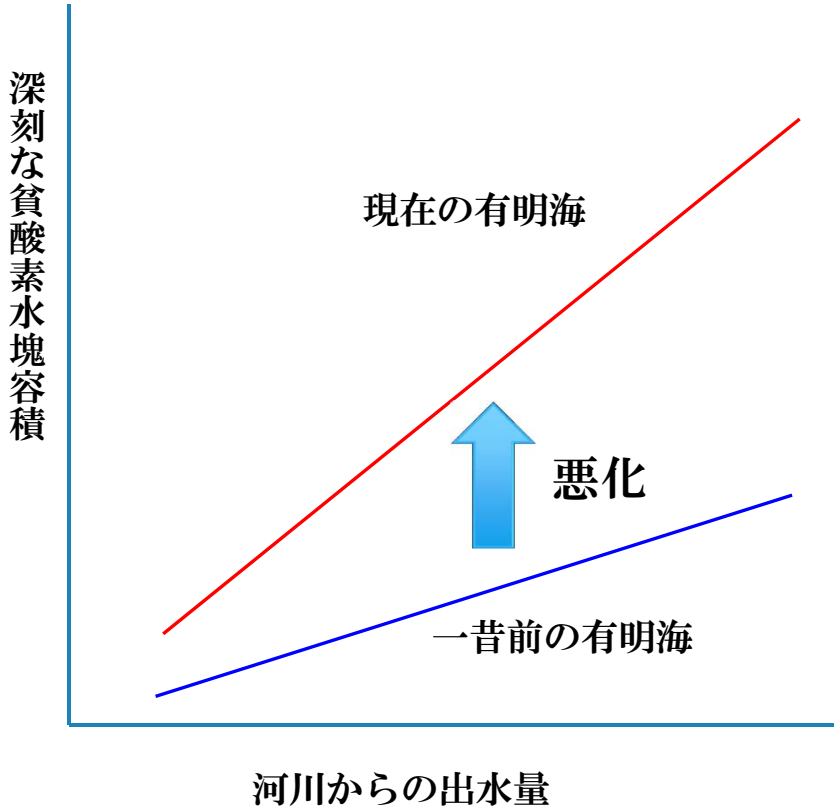
②小潮時に高塩分海水が底層に浸入して密度躍層が派生し、貧酸素水塊が発生する（大潮時には大部分解消する）

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

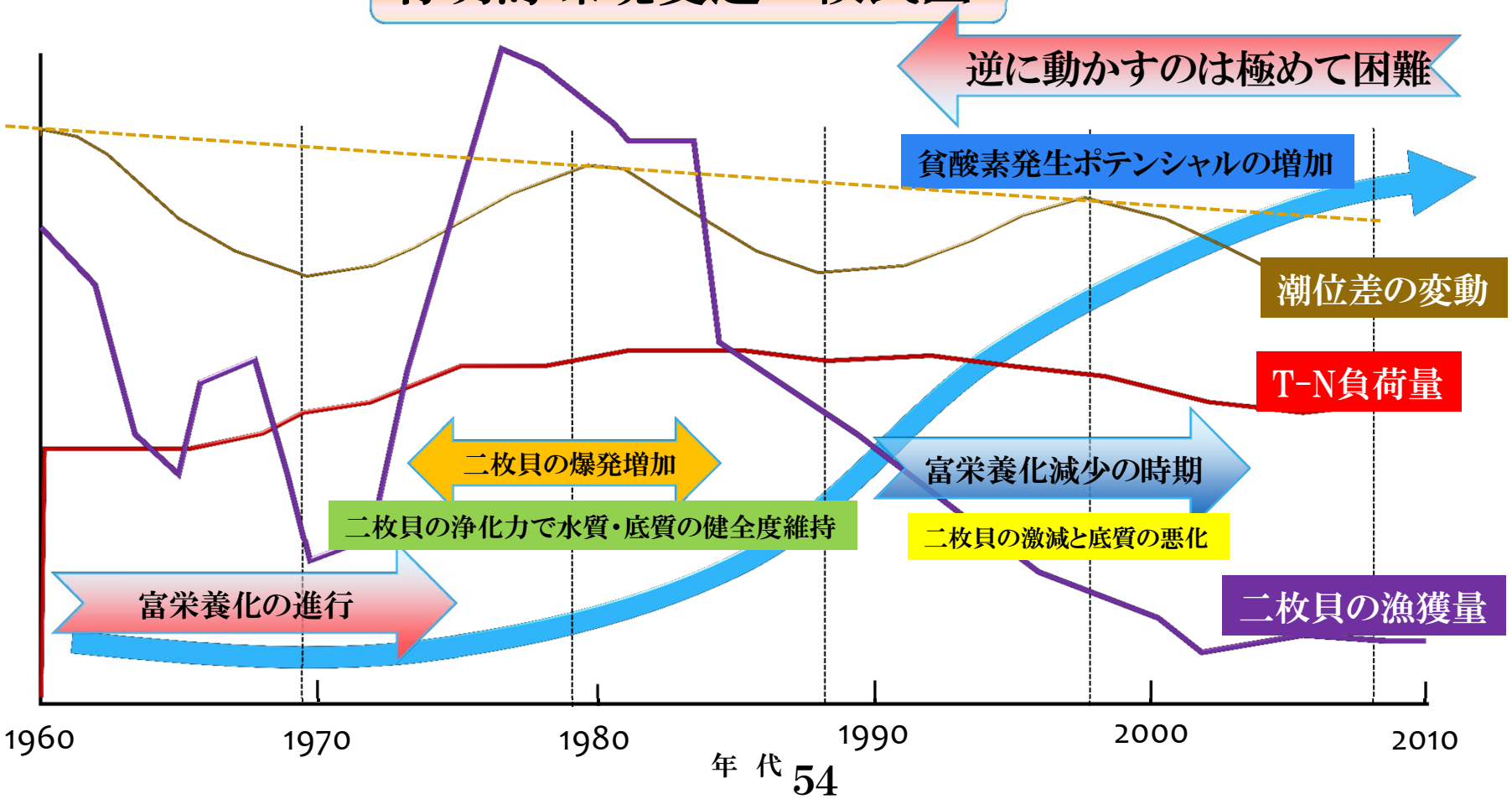


有明海海況のイメージ

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