

S-13 : 持続可能な沿岸海域実現を目指した 沿岸海域管理手法の開発

テーマ1 : 閉鎖性海域・瀬戸内海 における栄養塩濃度管理法の開発



サブテーマ1: 栄養塩濃度管理法開発

広島大学: **西嶋 渉(代表)**、中井智司、奥田哲士(現龍谷大)、坂井陽一、富山 毅

サブテーマ2: 干潟・藻場の栄養物質循環・生物再生産に果たす機能の解明

香川大学: 多田邦尚、一見和彦、山口一岩

研究実施期間: 平成26年度～平成30年度(5年間)

累積予算額: 161,452千円

瀬戸内海の現状

1970年代

1980年代

1990年代

2000年代

現在

COD規制(1980)

栄養塩規制(2000)

水環境

赤潮の頻発

赤潮の減少

N・P達成率 > 90%

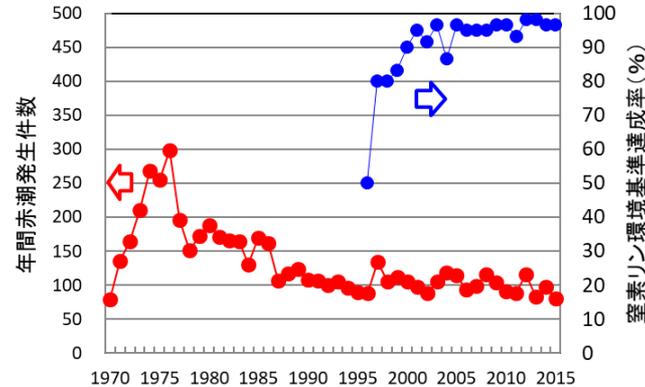
> 95%

瀬戸内海の赤潮発生状況(1972)

出典:昭和48年版環境白書



(備考) 瀬戸内海漁業開発協議会資料による。

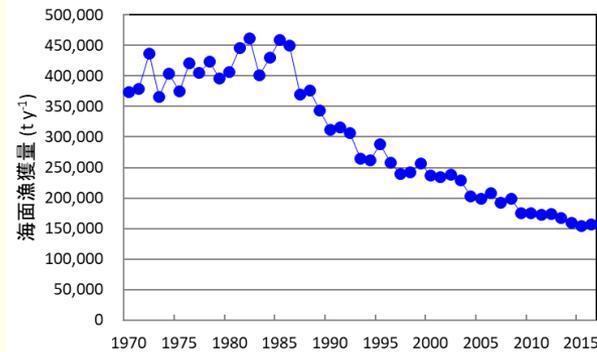


生物生産

漁獲量のピーク

漁獲量の減少

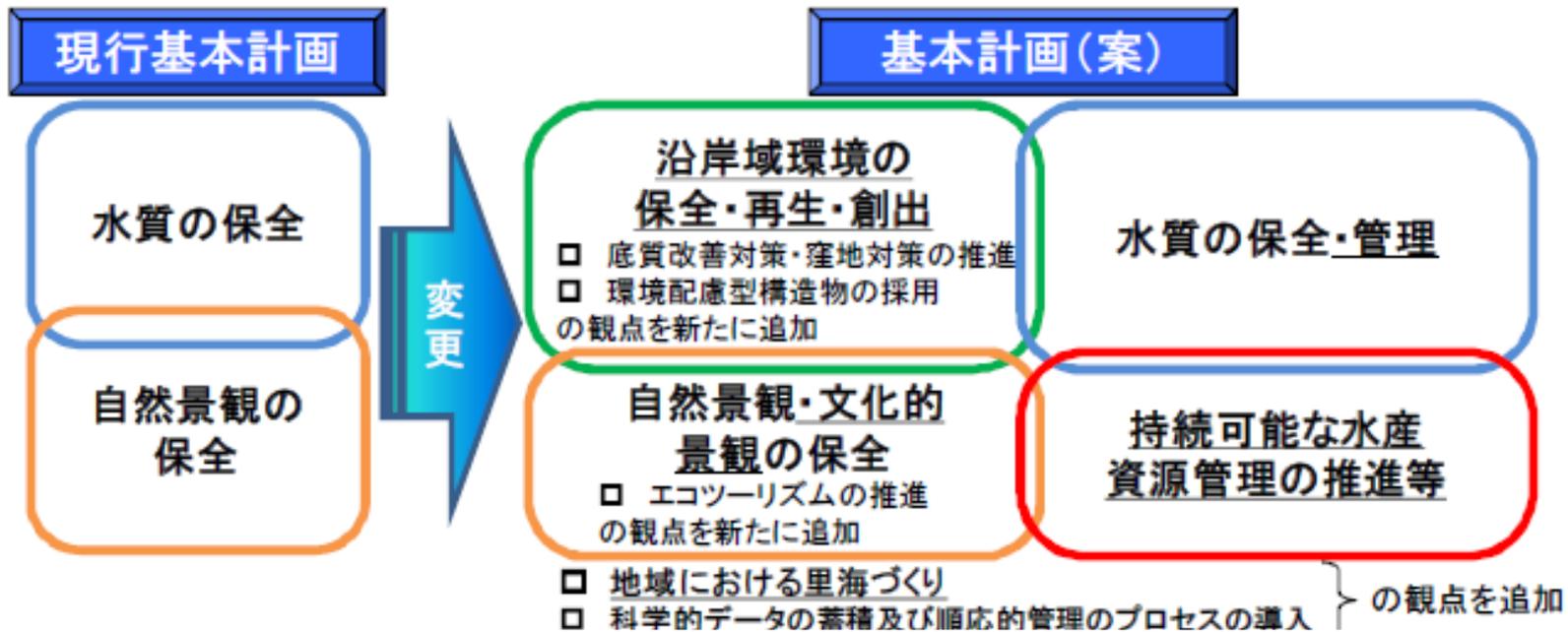
ワリの色落ち



栄養塩の削減と関係がある？

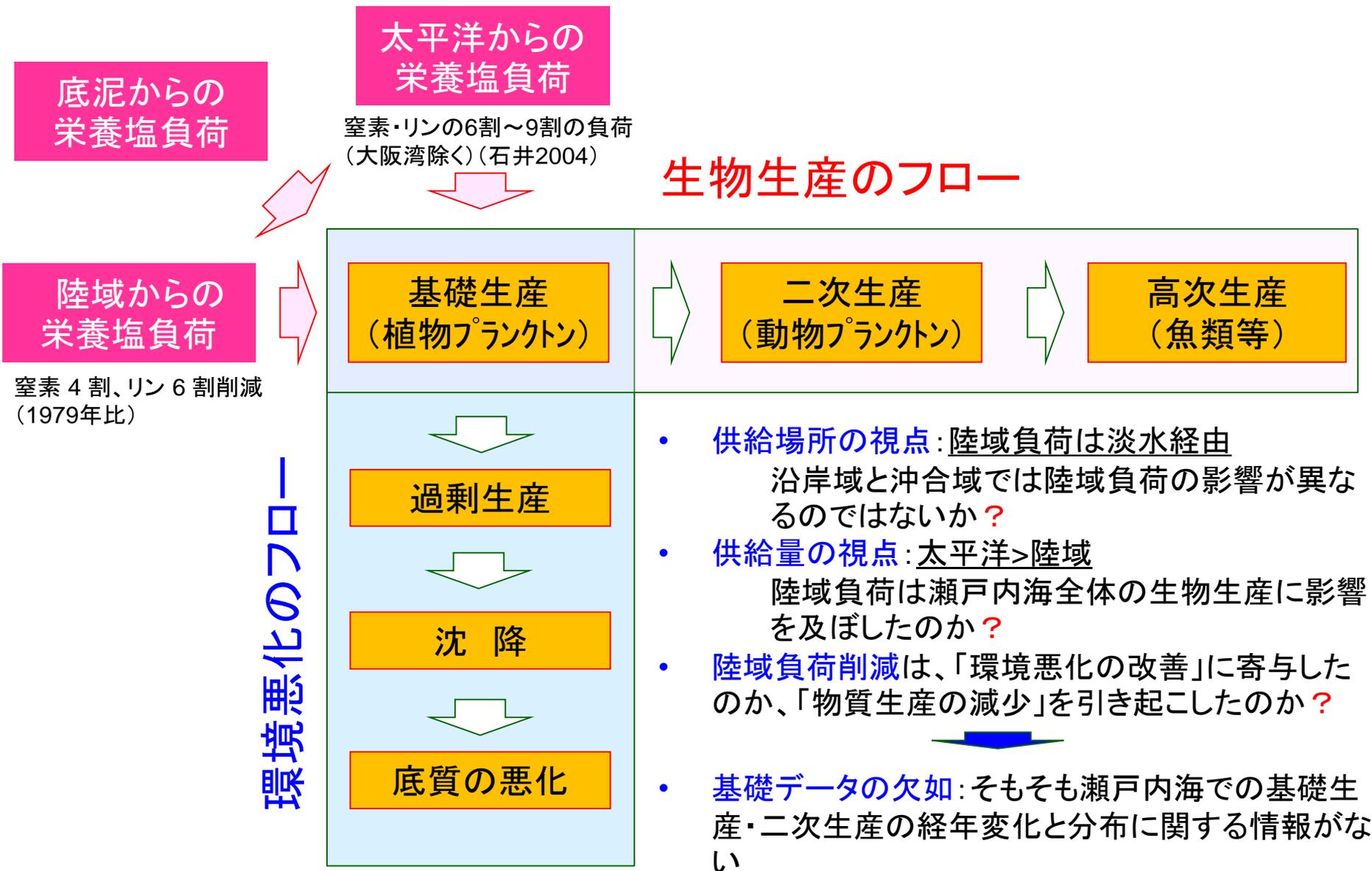
2015年 瀬戸内海特別措置法の改正

「豊かな瀬戸内海を目指す（環境保全と生物生産の両立）」



研究目的: 栄養塩管理と生物生息環境の保全・再生を通じて赤潮等の障害を起こさない健全な物質循環と高い生物生産性の実現を目標とした持続性の高い沿岸管理手法を開発することを目標とする。

栄養塩負荷と2つの物質フロー



基礎生産

栄養塩濃度が異なる海域（広島湾・安芸灘等）で季節別（水温の違い）の基礎生産を実測。

二次生産

植物プランクトン濃度が高い海域（大阪湾）の高水温期にChl.a濃度（植物プランクトンの代替指標）と二次生産を実測。

過去からのデータが瀬戸内海で広域に存在する広域総合調査（環境省）等水質モニタリングデータ（Chl.a、栄養塩、水温、透明度）から基礎生産・二次生産を推定する推定式を作成する。

瀬戸内海の基礎生産・二次生産の過去からの変化と広域的な分布を推定する。

実測値に基づく基礎生産の推定法の開発

Chl.a当たりの最大増殖速度

↓
 実測した基礎生産比較
 ↓
 差分は栄養塩制限
 ↓
 半飽和定数を決定

$$P_{max}^{PB} = \text{LN}(2) * 0.851 * 1.066^T / (\text{Chl.a}/C) / 24 \text{ mgC}/\text{mgChl}/\text{h}$$

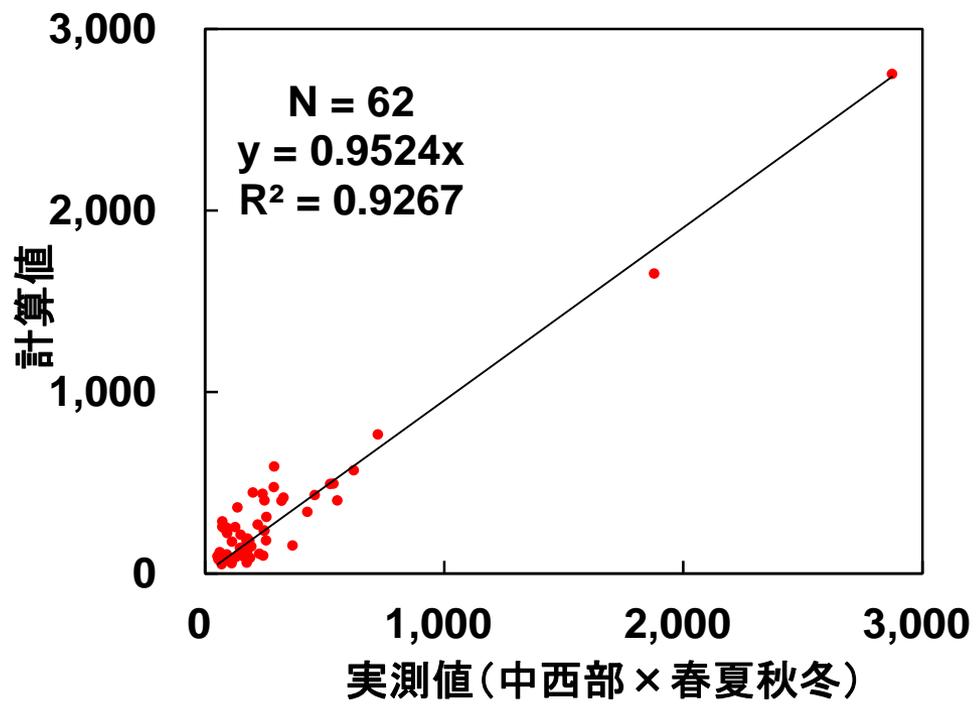
$$\mu_{max} = 0.851 \times 1.066^T \text{ (doublings/d) Eppley(1972)}$$

$$\text{Chl.a}/C = 0.003 + 0.0154 * \text{EXP}(0.05 * T) * \text{EXP}(-0.059 * I)$$

$$P^B = P_{max}^{PB} \times \text{DIN} / (\text{DIN} + K_N) \text{ or } P_{max}^{PB} \times \text{DIP} / (\text{DIP} + K_P)$$

$$K_N = 6.12 \times (1 - \text{EXP}(-0.27 \times \text{DIN}))$$

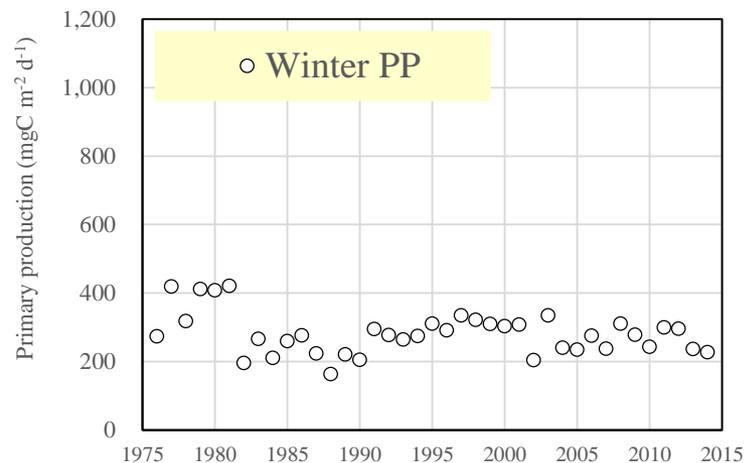
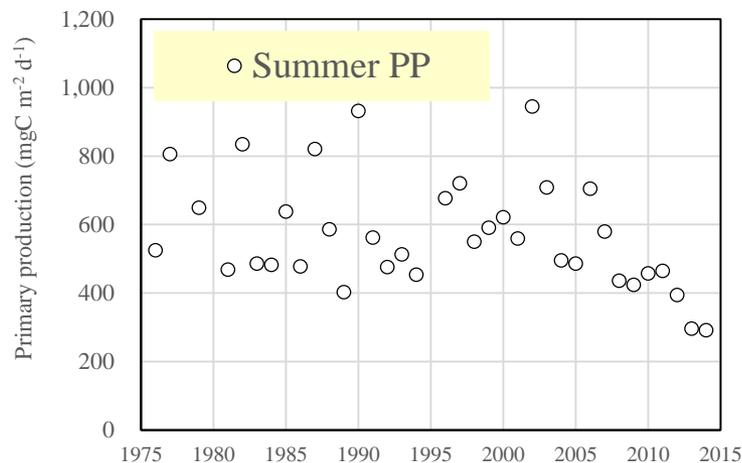
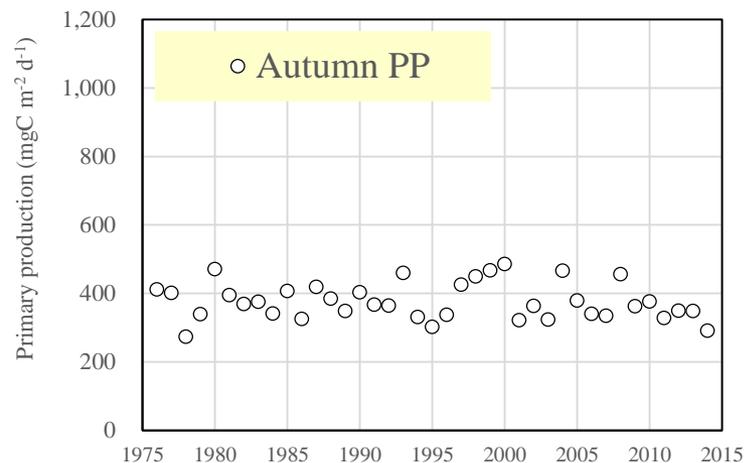
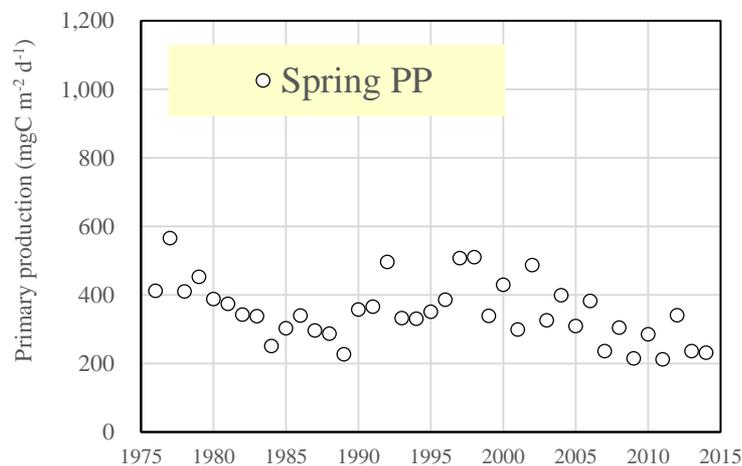
$$K_P = 1.04 \times (1 - \text{EXP}(-1.63 \times \text{DIP}))$$



実測生産	計算生産	
秋全体		誤差
240.39	247.83	1.03
冬全体		
150.92	127.15	0.84
春全体		
265.23	223.62	0.84
夏全体		
491.77	606.08	1.23
287	301	1.05

季節別 基礎生産の推移

8/29



注: 1976~1980年はデータが少なく参考程度

春から夏: 2000年ぐらいから低下傾向
(栄養塩類が欠乏している海域がある)

秋から冬: ほとんど変化はない
(栄養塩類は欠乏していない)

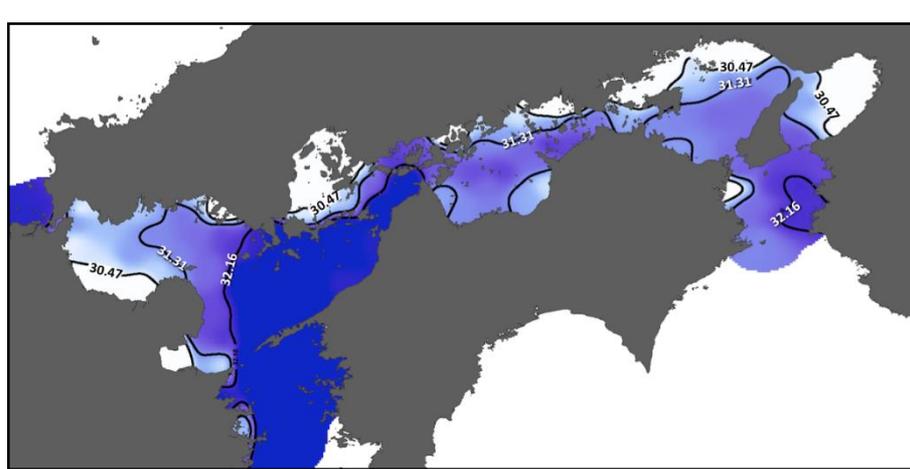
どの海域の基礎生産が減少しているのか？

9/29

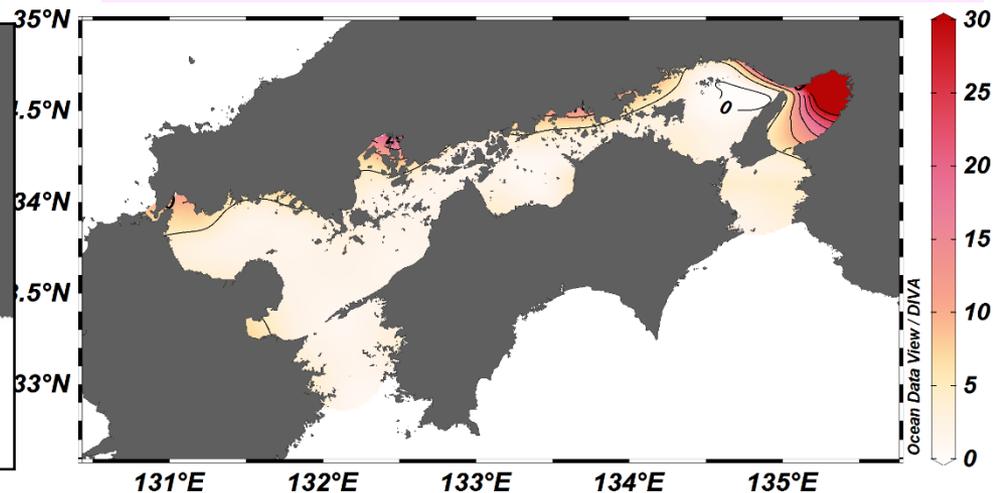
供給場所の視点：陸域負荷は淡水經由

沿岸域と沖合域では陸域負荷の影響が異なるのではないか？

広域相互調査＋浅海定線調査 270 sites



夏季塩分の分布



1981-1990 夏季Chl.a濃度

Chl.a	専有面積割合	塩分
< 2 µg l ⁻¹	32.0%	32.3±0.7
2- 5 µg l ⁻¹	45.1%	32.0±0.9
5-10 µg l ⁻¹	13.7%	31.5±1.2
10-20 µg l ⁻¹	4.0%	31.4±1.2
> 20 µg l ⁻¹	5.3%	28.7±2.8

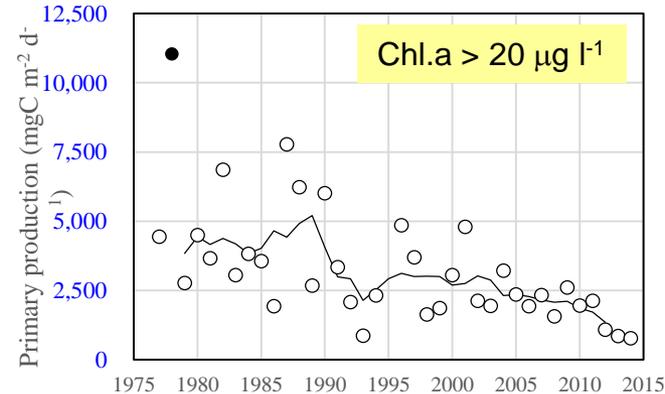
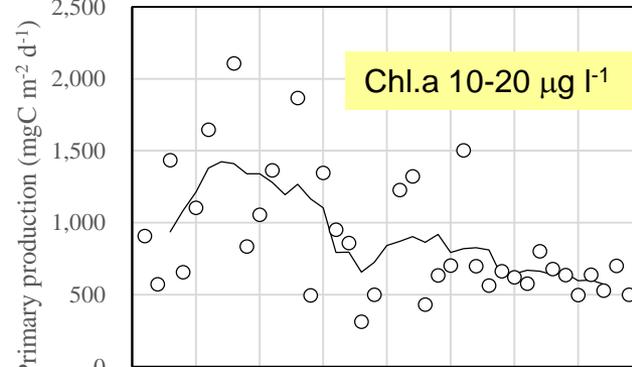
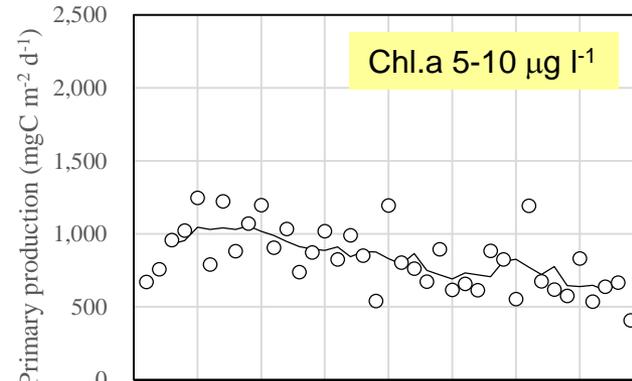
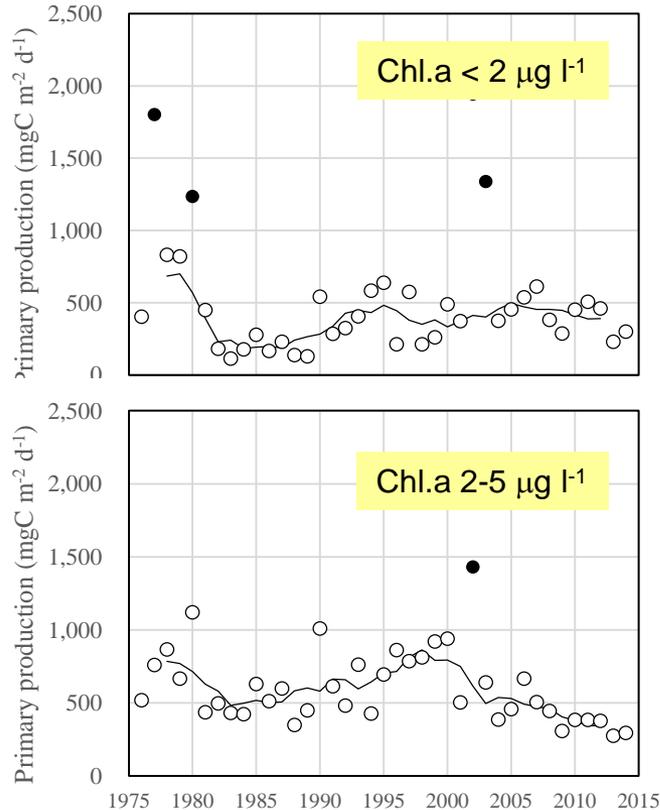
夏季基礎生産の変化

Chl.a in 1981-1990

< 2 $\mu\text{g l}^{-1}$
 2- 5 $\mu\text{g l}^{-1}$
 5-10 $\mu\text{g l}^{-1}$
 10-20 $\mu\text{g l}^{-1}$
 > 20 $\mu\text{g l}^{-1}$

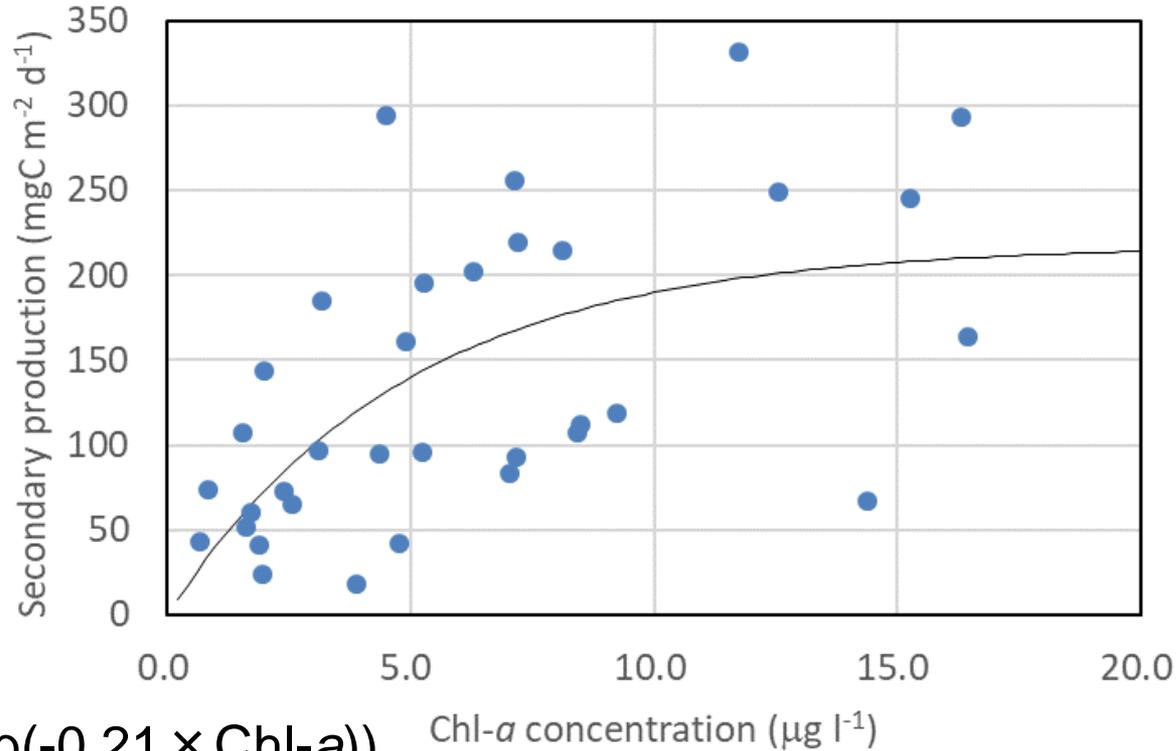
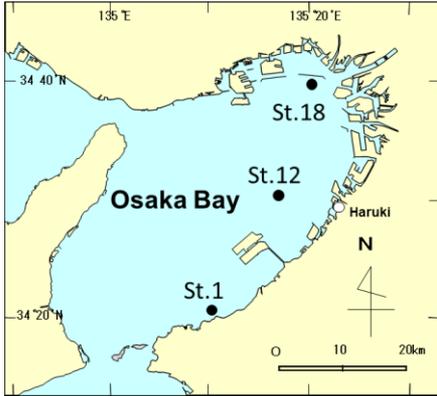
専有面積

32.0%
 45.1%
 13.7%
 4.0%
 5.3%



Chl.a 濃度とカイアシ類二次生産の関係

使用データ: 2014-2017年7月~10月に大阪湾で月ごとに実施した調査
二次生産の推定は Uye (1997)に基づく



$$G = G_{\max} \times (1 - \exp(-0.21 \times \text{Chl-a}))$$

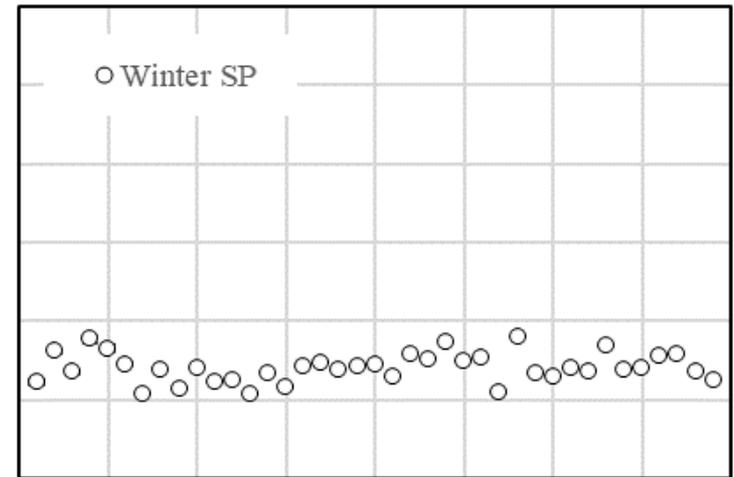
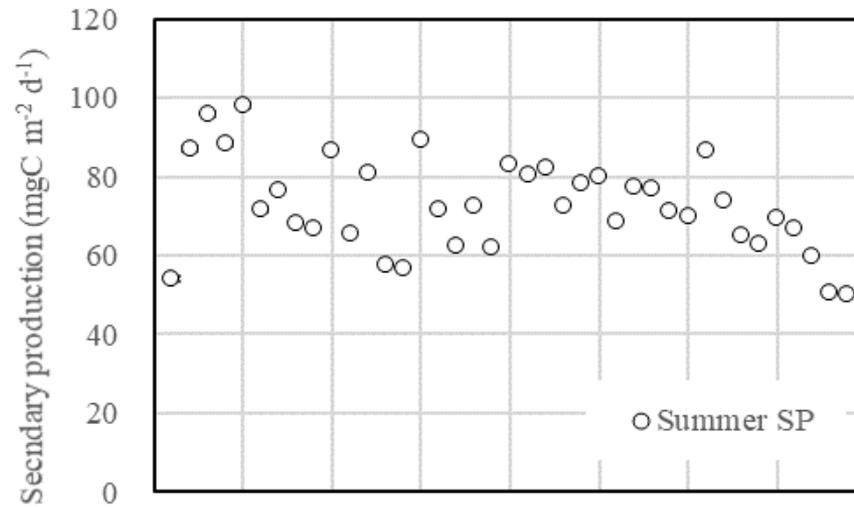
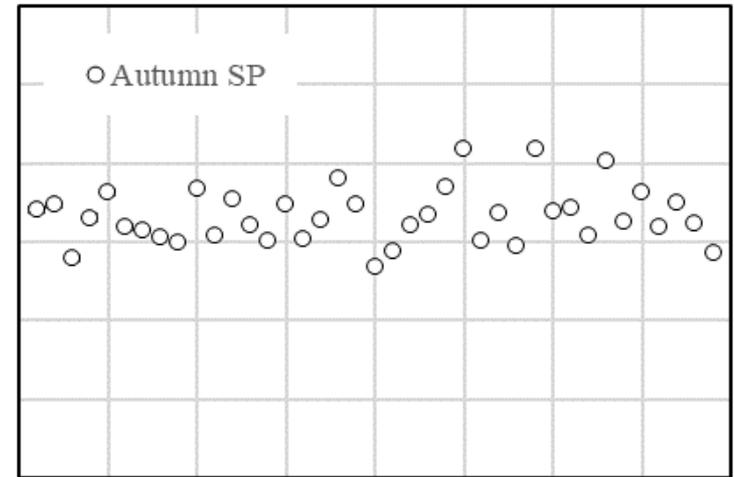
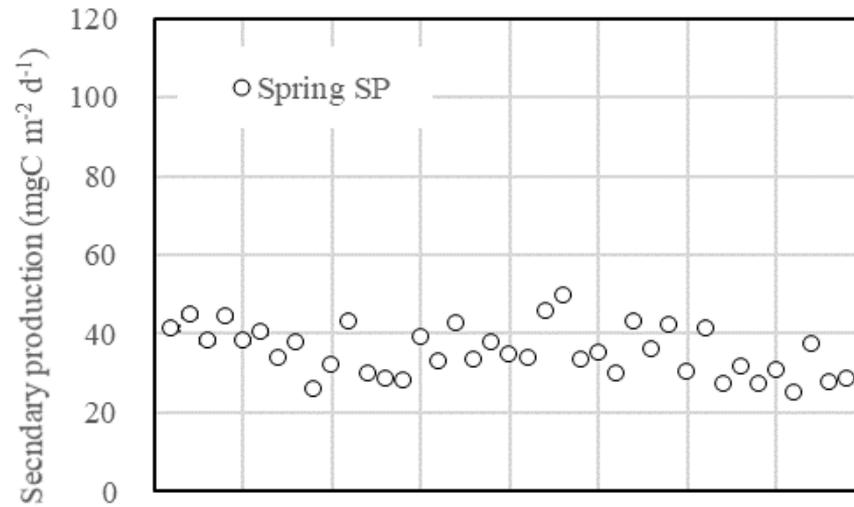
$$G_{\max} = 44.9 \times \exp(0.062T)$$

G: Secondary production (mgC m⁻² d⁻¹)

注: 二次生産はカイアシ類のみで評価。カイアシ類は主要な動物プランクトンであるが、絶対値は若干の過小評価

餌となる植物プランクトン濃度 (Chl.a) と比例的に増加するのは Chl.a が約 5 μg/l まで、約 5 μg/l までは緩やかに増加するがそれ以上 Chl.a が高くてても二次生産は増加しない。
→ 高濃度 Chl.a 領域での基礎生産の減少は、二次生産をほとんど減少させない。

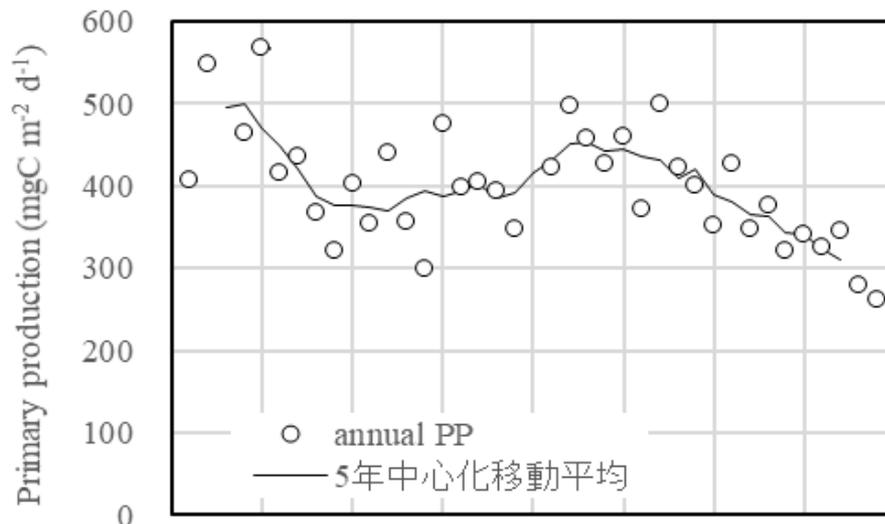
季節別 二次生産速度の推移



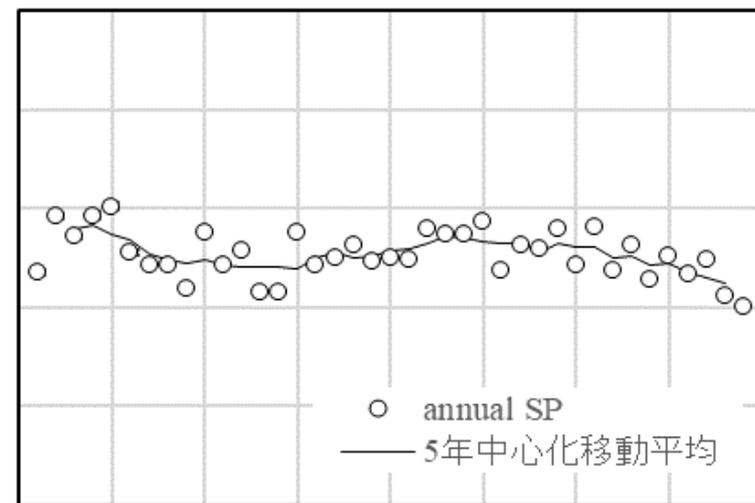
1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015

1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015

基礎生産



二次生産



1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015

転送効率=二次生産/基礎生産

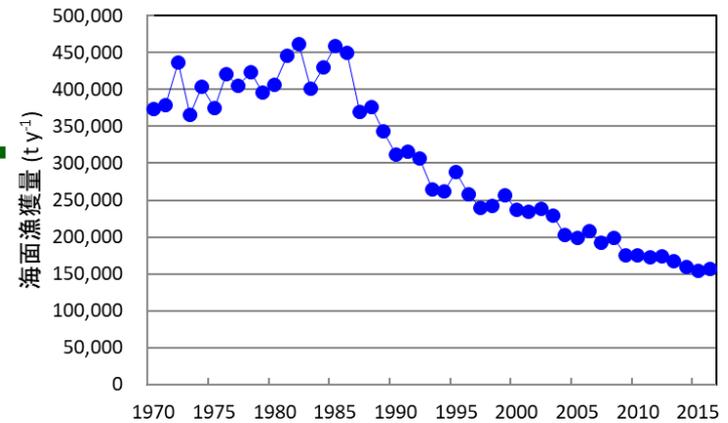


- 2000年ごろをピークに基礎生産の低下が顕著に表れている
- 二次生産の変動は大きくないが、近年は若干の低下傾向にあるとみることできる
- 転送効率が上昇していることから、ここまでの基礎生産の減少は二次生産につながらない過剰な基礎生産分であると考えられる

低次生産の変化は漁獲量の減少を説明できるか？

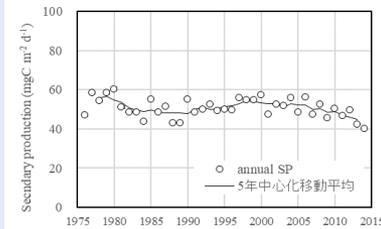
14/29

魚 食 魚

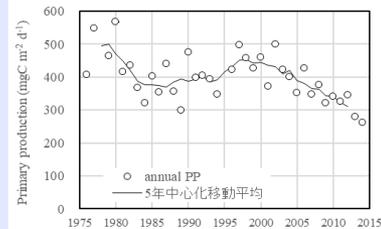


プランクトン食魚

イカナゴ、カタクチイワシ



動物プランクトン



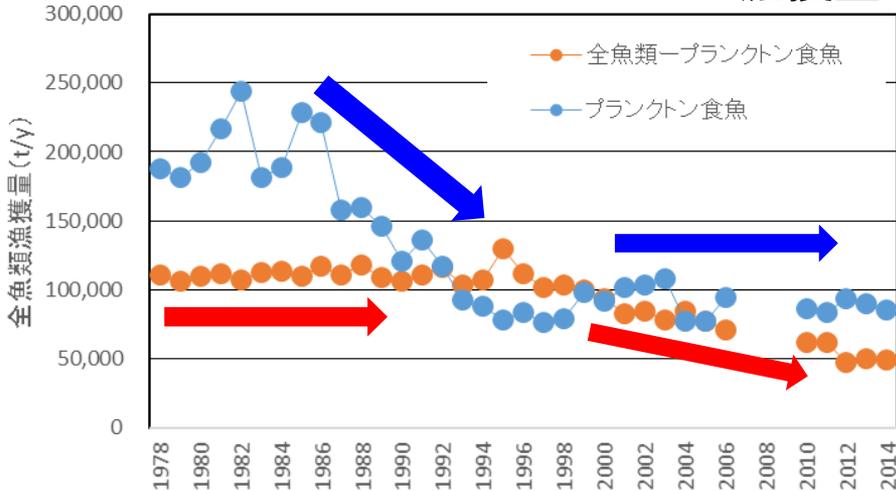
植物プランクトン

生物生産の視点

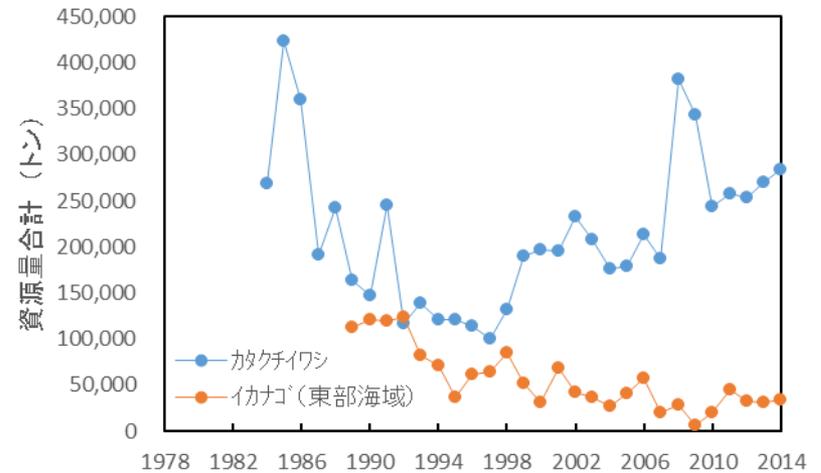
栄 養 塩

プランクトン食魚の動態

漁獲量



資源量



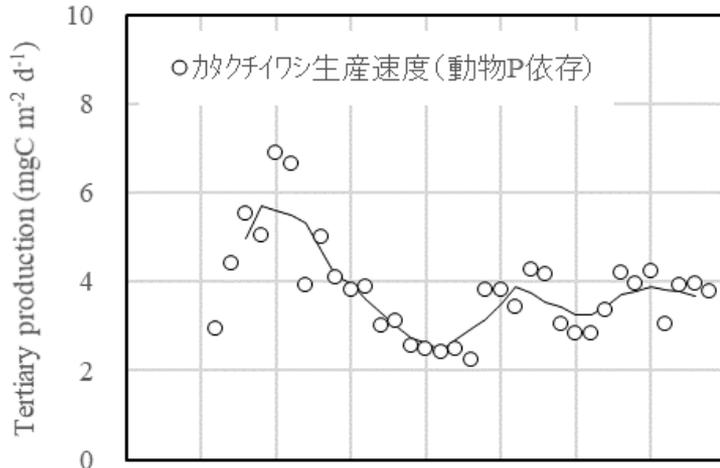
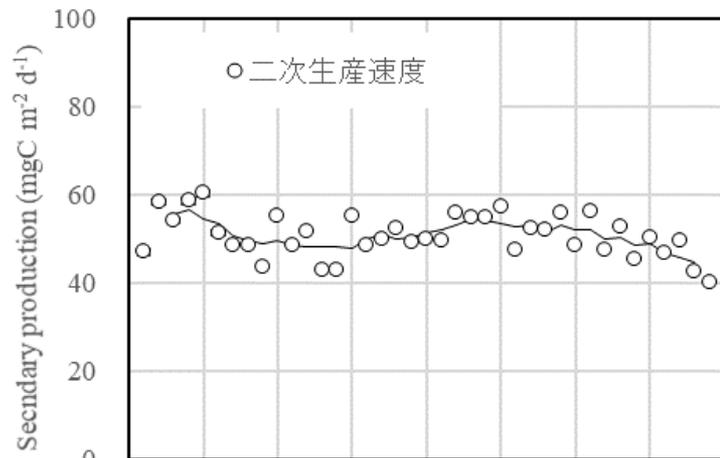
瀬戸内海の主要なプランクトン食魚はカタチイワシ

カタチイワシの資源量はプランクトン食魚全体の89%(2010-2014)

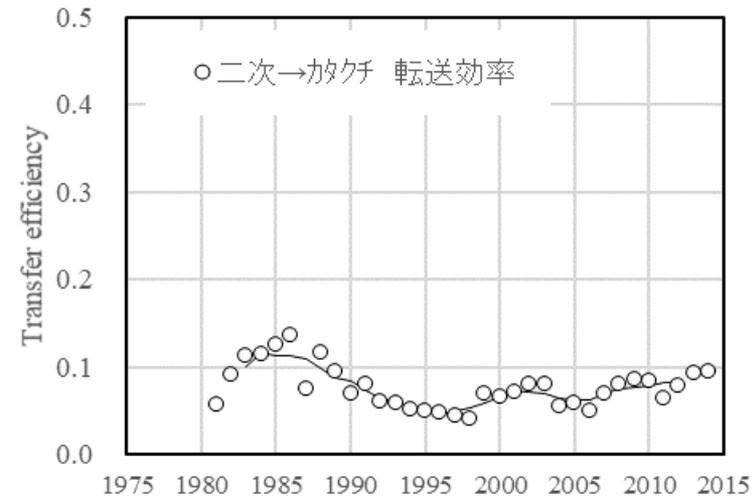


1980年代から1990年代にかけてのプランクトン食魚はマイワシの減少で説明され、それ以降は減少していない。主要種であるカタチイワシの資源量は近年増加している。

二次生産からプランクトン食魚への転送



1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015



$$\text{カタクチイワシの生産速度 (mgC d}^{-1}\text{)} = \sum_{m=0}^{10} \left[\frac{W_{m+1} - W_m}{30} \right] \times S_m \times 0.1$$

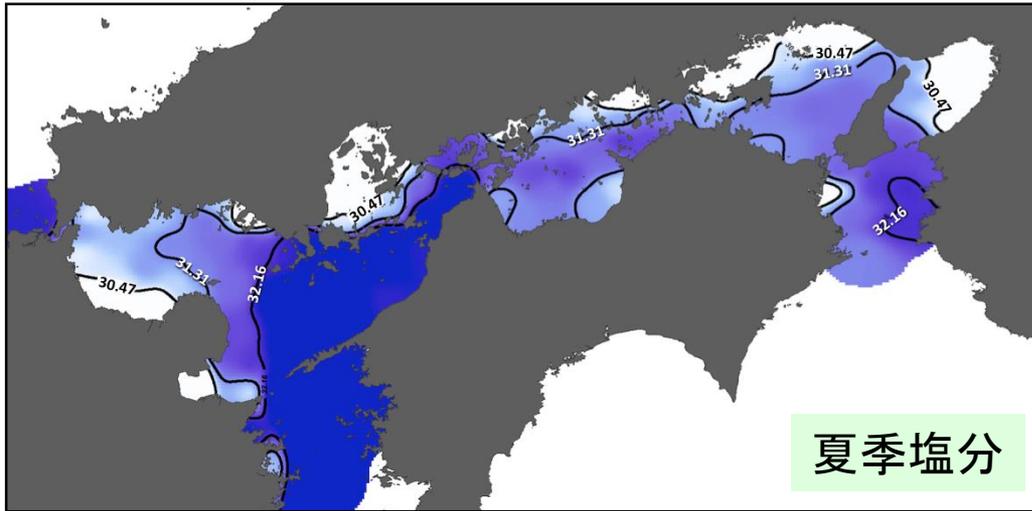
W_m : m月齢の平均体重(g-ww)

S_m : m月齢の資源尾数

※炭素量は質重量の10%として計算

※10月齢以上は10月齢としてまとめた

- ・カタクチイワシの生産速度は減少していない
- ・マクロな視点では、基礎生産・二次生産の変化が直接プランクトン食魚など魚類生産に影響を及ぼしている可能性は低い。

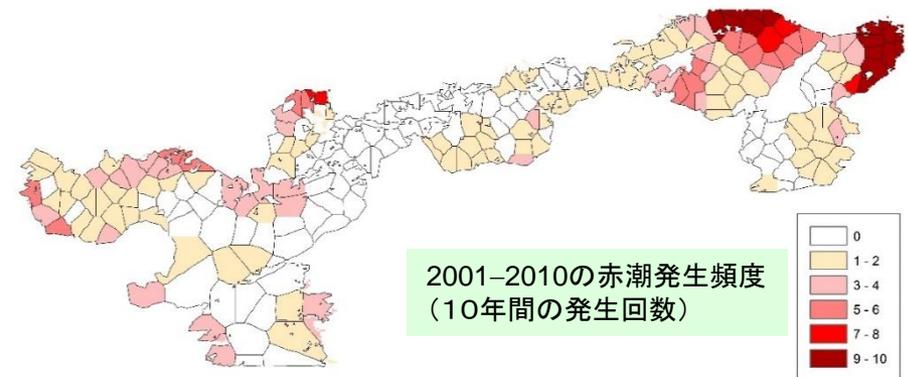
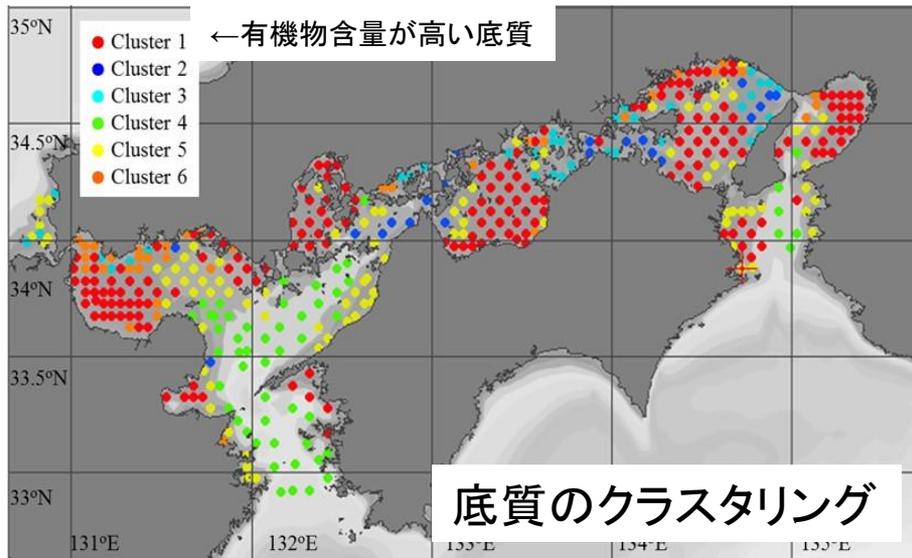


過度な陸域からの栄養塩の削減は
海域の生産性を落としてしまう。



このバランスをどうとるか？

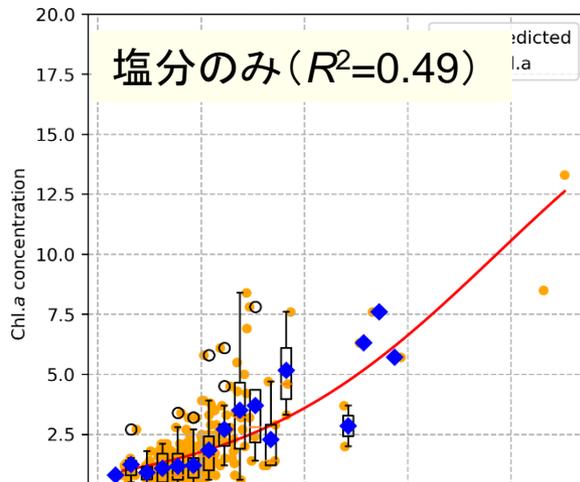
平均Chl.a濃度は下がったが、陸域影響の強い(塩分が低い)沿岸域では依然として赤潮の発生、底質の有機汚濁等過度な植物プランクトンの増殖が原因の現象がみられる。



出典：瀬戸内海の赤潮(瀬戸内海漁業調整事務所)の分布マップから作成
ただし、分布は正確に発生海域を表している訳ではない

環境因子から夏季植物プランクトン濃度を推定する

→ 植物プランクトンの増殖のしやすさ(脆弱性: Vulnerable Index)

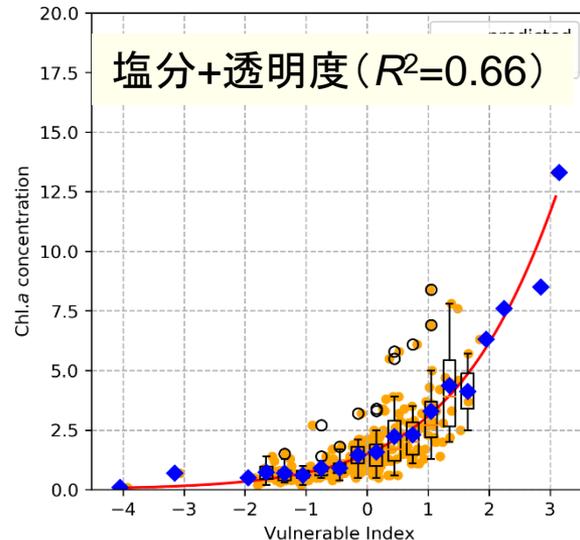


評価環境因子: 塩分、透明度、地域固有透明度、岸からの距離(島嶼は含まない)、水深、水深で標準化した密度差

正規分布していないデータは対数等の前処理

2003-2012年の夏季Chl.a濃度の平均値が目的変数

$\text{Chl.a con.} = 1/(b_1 + b_2 \times \exp(b_3 \times \text{VI}))$ でフィッティング



単独の環境因子としては塩分がもっとも夏季Chl.a濃度を予測できたが、塩分と透明度を組み合わせることで予測精度が大きく改善した

塩分だけでなく、VIを使うことでChl.a濃度が高くなりやすい場所を特定し、管理に生かすことが可能である。

- 障害が起こりやすい沿岸域に特化した栄養塩対策をとる必要がある。
 - 瀬戸内海全体への栄養塩供給量を減少させない
 - 沖合の栄養塩供給に影響を及ぼさない



沿岸域に発達する
藻場(アマモ)・干潟に注目

干潟の窒素収支

20/29

	干潟への流入		沖合への流出	
新川・春日川河口干潟 2006～2010年(高栄養)	68.7 ton y ⁻¹ PON 63% DIN 37%		39.7 ton y ⁻¹ PON 13% DIN 87%	
新川・春日川河口干潟 2017年(中栄養)	33.5 ton y ⁻¹ PON 45% DIN 55%		45.3 ton y ⁻¹ PON 11% DIN 89%	
大串半島の西海浜 前浜干潟 2017年(低栄養)	0.162 ton y ⁻¹ PON 67% DIN 33%		0.133 ton y ⁻¹ PON 58% DIN 42%	

干潟の栄養塩循環に果たす役割

変換機能 有機態→無機態栄養塩(植物が利用可能)

吸収機能はあまり期待できない

藻場の栄養塩循環に果たす役割-吸収

ポイント1: 植物プランクトンの増殖期とほぼ一致

アマモによる栄養塩吸収(春~夏)により植物プランクトンが利用可能な栄養塩が減少する

春から夏

秋から冬

アマモの
繁茂期

アマモの
衰退期

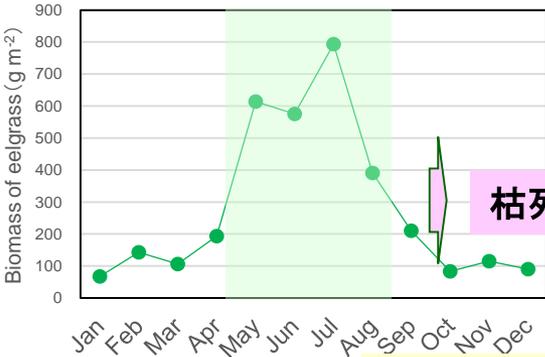
藻場で吸収

藻場で吸収

枯死体から放出

夏以降枯死したアマモは
流れ藻となって移動

分解が遅いアマモから
徐々に栄養塩が放出



枯死・流出



ポイント2: 吸収した栄養塩は秋以降放出する

年間で見ると海域への栄養塩の供給量は変化させない

アマモ繁茂期における栄養塩吸収

バイオマス、N含量、成長率(文献値)から計算

地御前アマモ(5~8月)
2,200-7,800 mgC m⁻² d⁻¹
 (水深1~4 m,透明度3 m)

C:N = 1:0.06
 N:P = 16:1

地御前アマモ(5~8月)
132-468 mgN m⁻² d⁻¹
8.3-29.3 mgP m⁻² d⁻¹

生島湾アマモ(5月)
160 mgN m⁻² d⁻¹

他報告事例(成長量の実測/現場チャンパー)
 山口県柳井湾: 3,900 mgC m⁻² d⁻¹(1993)
 伊豆鍋田湾: 2,900 mgC m⁻² d⁻¹(1979)
 伊勢湾: 3,570 mgC m⁻² d⁻¹(2015)

↑ ↓ アマモ場の生産は大きい

植物プランクトンによる生産量
 広島湾調査(2015)

陸域からの栄養塩負荷(2009)

窒素負荷 387 tN d⁻¹
 リン負荷 24 tP d⁻¹

アマモ場面積

22,653 ha (1960s)
 6,381 ha (1989-90)

1989-90アマモ場面積

8.4~29.9 tN d⁻¹ (2.2~7.7%)
 0.53~1.87 tP d⁻¹ (2.2~7.8%)

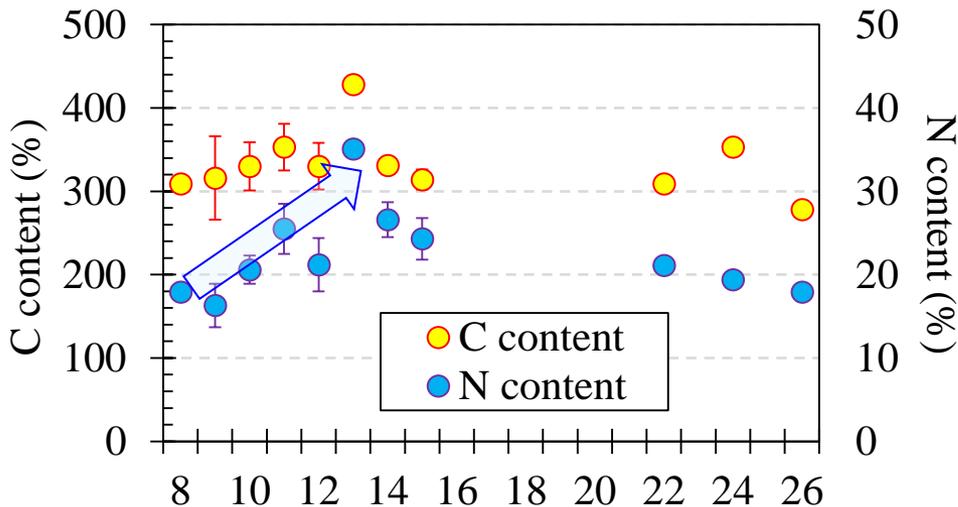
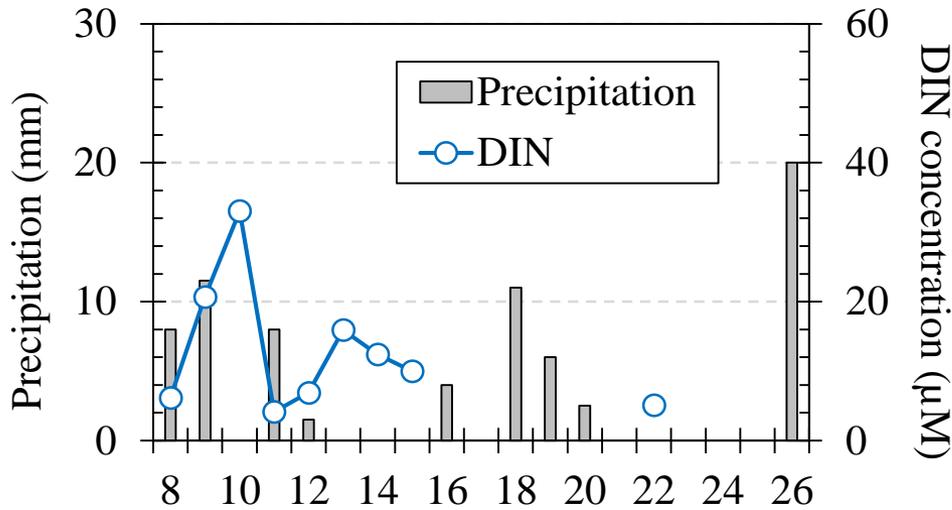
1960アマモ場面積

29.9~106.0 tN d⁻¹ (7.7~27.4%)
 1.88~6.64 tP d⁻¹ (7.8~27.8%)

アマモ場の回復

基礎生産速度 (mgC m ⁻² d ⁻¹)	沿岸域 (H1-4)	沖合 (H5,6)
夏季	919	443
年間	530	313

降雨時の間欠的な栄養塩供給

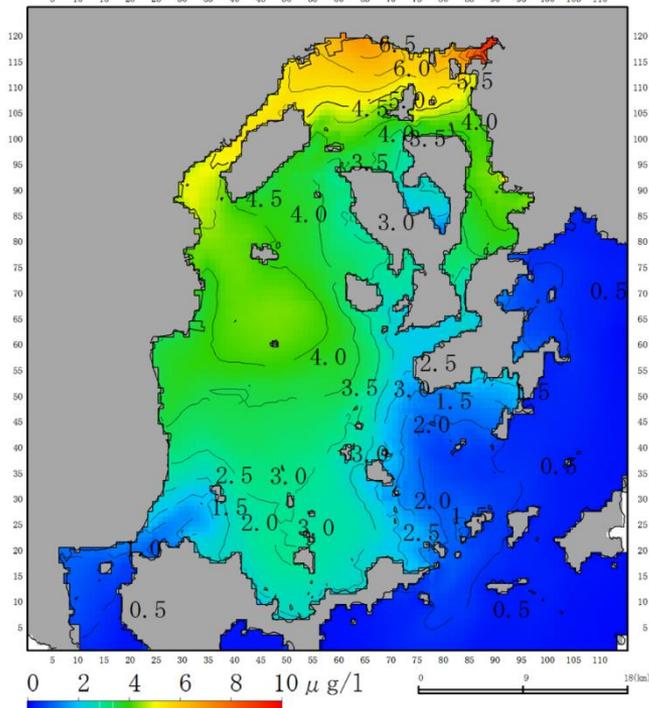


(June, 2015)
Sampling date

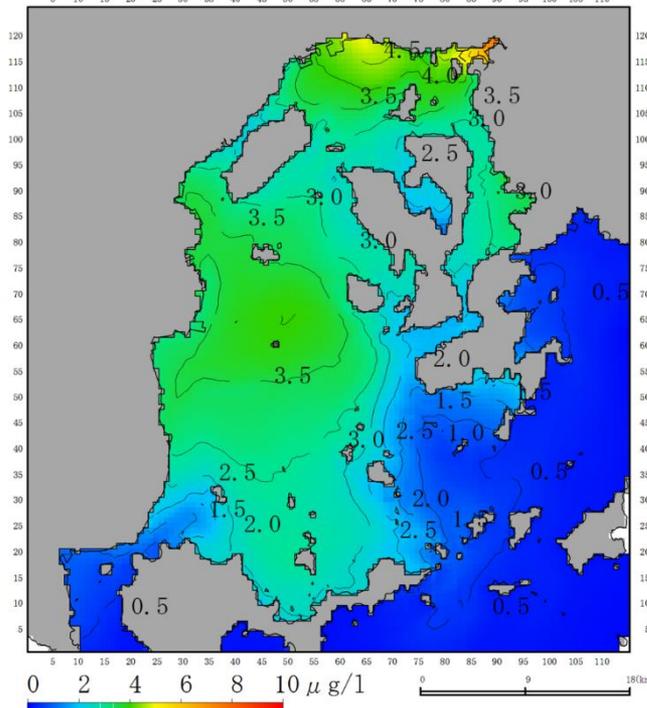
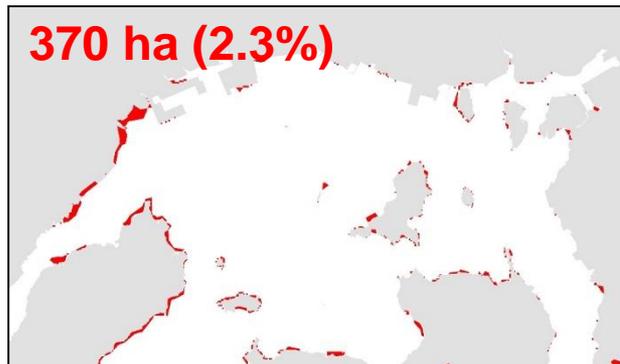
降雨による一時的な栄養塩濃度の増加に対して、アマモは栄養塩の吸収を高める

アマモの栄養塩吸収による植物プランクトンの増殖抑制効果を 広島湾で検証

現在のアマモ場の分布



光環境を満足する海底(表面光量の20%以上)にすべてアマモが生息可能水域



アマモは水質改善に伴い増加するか？

25/29

- 陸域からの栄養塩負荷の削減



- 植物プランクトン量の減少



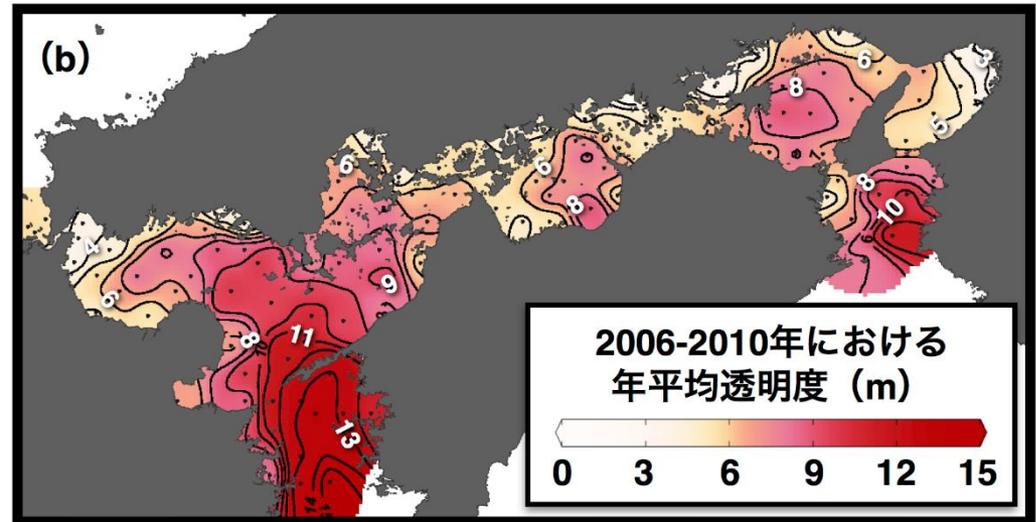
- 光の透過性改善



- 藻場の自然回復



このシナリオは
本当か？

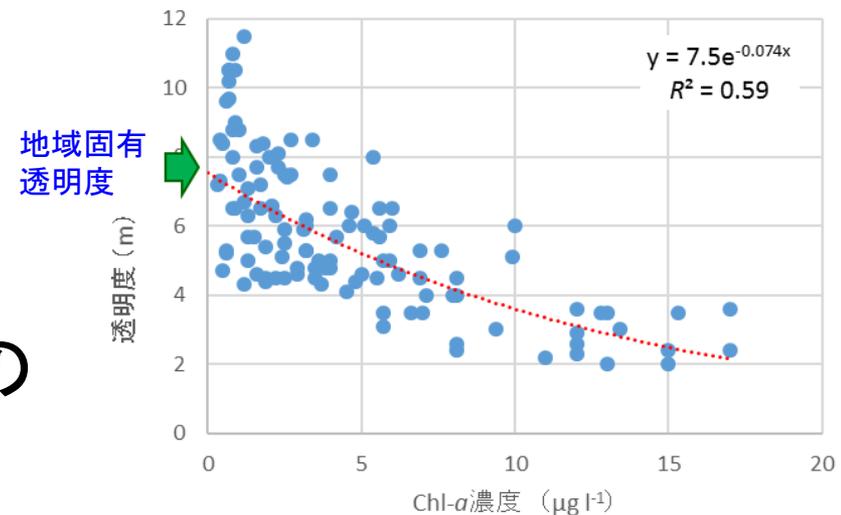


新しい指標：地域固有透明度

26/29

$$K_d \text{ 光減衰係数 [m}^{-1}\text{]} \\ = K_W + K_{\text{CDOM}} + K_{\text{Trp}} + K_{\text{Phy}} \\ \text{水 着色溶存 其他 植物} \\ \text{有機物 SS プランクトン}$$

K_{Phy} は富栄養化の程度によって変化するが他の項目は富栄養化とは関係なく一定



栄養塩を極限まで削減したときの
その海域の光減衰/透明度は？

環境省 or 国交省のモニタリング地点毎に
全モニタリングデータをプロット

$$K_d - K_{\text{Phy}}$$

地域固有の光減衰係数 [m⁻¹]

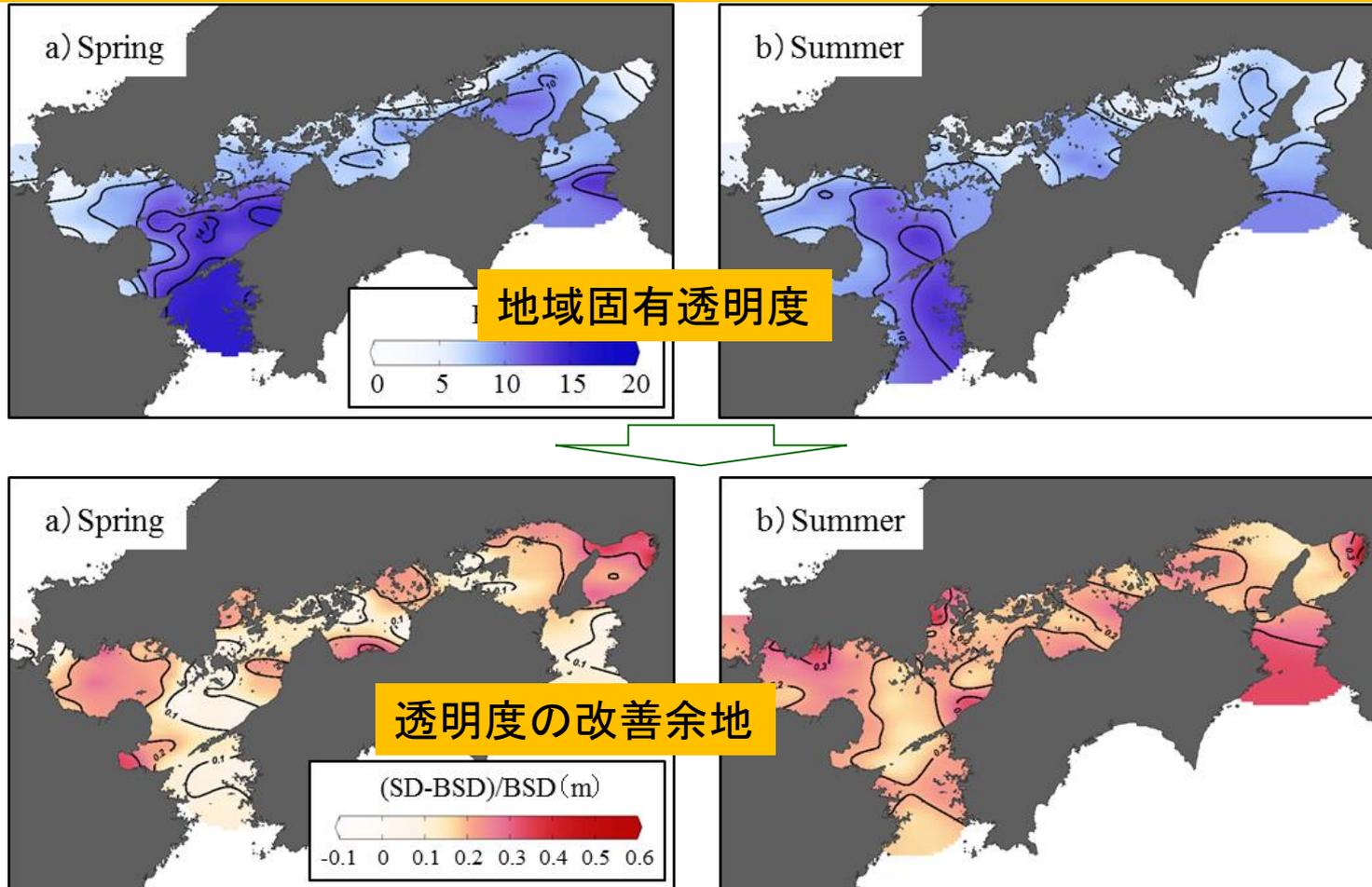
植物プランクトンの非存在下の透明度

地域固有透明度

BSD: Background Secchi Depth

透明度の改善余地は小さい

27/29



透明度の改善余地は大阪湾奥部を除けば、多くて2割程度
→ 富栄養化の改善による藻場の自然増に多くの期待はできない
→ 「沿岸透明度」の目標値設定(環境省)において地域固有透明度は重要な指標となる。

1. 陸域からの栄養塩削減が沿岸域の過剰な植物プランクトンの増殖を低減した一方で、二次生産、三次生産には大きな影響を及ぼしていないことを明らかとし、今後の瀬戸内海の総量削減計画の策定に重要な知見を提供した。
2. 瀬戸内海特別措置法に示された湾灘管理に加えて、本研究では塩分あるいは脆弱性指標で分けた沿岸域・沖合を分けた管理を提示し、新しい視点を提供した(瀬戸内海環境情報基本調査及び豊かな海の確保に向けた方策検討業務有識者検討会ですでに活用)。
3. 本研究で開発した地域固有透明度という概念は、それぞれの地域で達成できる限界の透明度が存在することを示した。これは、環境省が設定を求めている沿岸透明度の設定において、実現可能な目標透明度を設定するための重要な知見を提供した。

(平成28年度)

タイトル:美しく恵み豊かな瀬戸内海を目指して

「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発」

環境省環境研究総合推進費S-13テーマ1・テーマ5合同シンポジウム

開催日時:2017年1月26日(木)、場 所:サテライトキャンパスひろしま502大会議室

参加人数:61名

(平成29年度)

タイトル:美しく恵み豊かな瀬戸内海を目指して

「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理」

環境省環境研究総合推進費S-13テーマ1・宇部工業高等専門学校

研究推進モデル校「浅場の保全・再生」プロジェクト合同シンポジウム

開催日時:2017年11月2日(木)、場 所:サテライトキャンパスひろしま501・502大会議室

参加人数:85名

(平成30年度)

タイトル:瀬戸内海関連プロジェクト合同シンポジウム

美しく恵み豊かな瀬戸内海を目指して

環境省環境研究総合推進費S-13テーマ1&5「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理」

地域適応コンソーシアム事業中国四国地域事業

宇部工業高等専門学校研究推進モデル事業「浅場の保全・再生」

開催日時:2018年10月15日(月)、場 所:サテライトキャンパスひろしま501・502大会議室

参加人数:57名