

# 播磨灘における栄養塩類管理 と生態系への効果検証

(公財)ひょうご環境創造協会 兵庫県環境研究センター

古賀 佑太郎

令和5年11月17日(金)

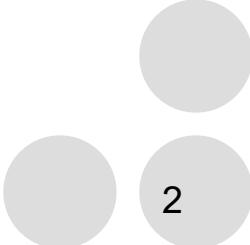
# 兵庫県環境研究センター 水環境科水質環境担当について

河川や海の環境保全のために、河川水や地下水等の様々な種類の有害物質の濃度を調べるとともに、工場排水の分析をしています。また、瀬戸内海をきれいで“豊かな海”にするための栄養塩類循環等の調査・研究も行っています。





# ○播磨灘（瀬戸内海）の栄養塩類 について



○私の研究について  
(栄養塩類管理の  
生態系への効果検証)

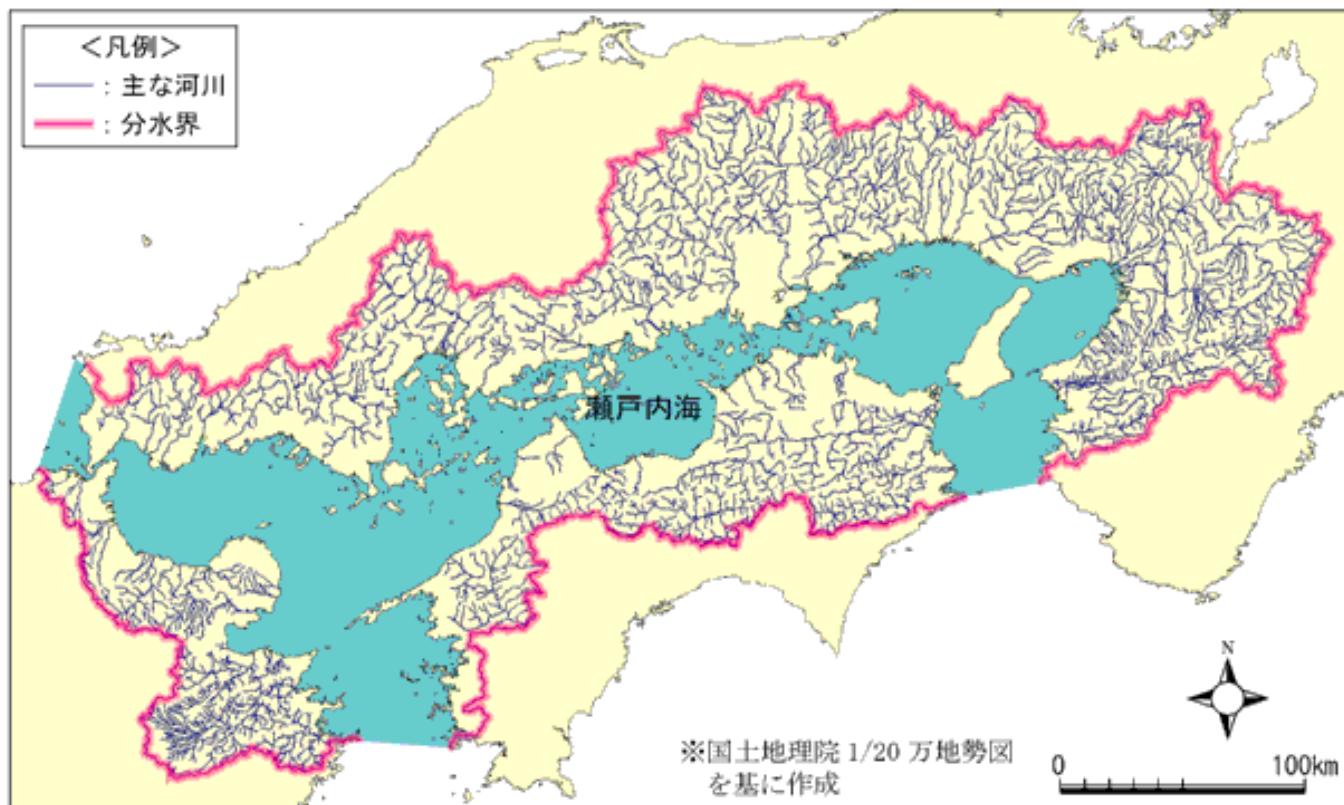
# Q.瀬戸内海はどこ？



# A.正解はここ



# Q.瀬戸内海ってどんな海？

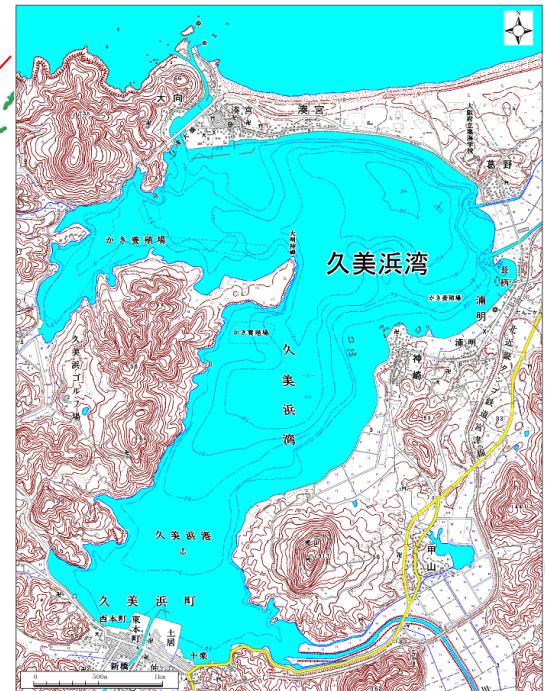
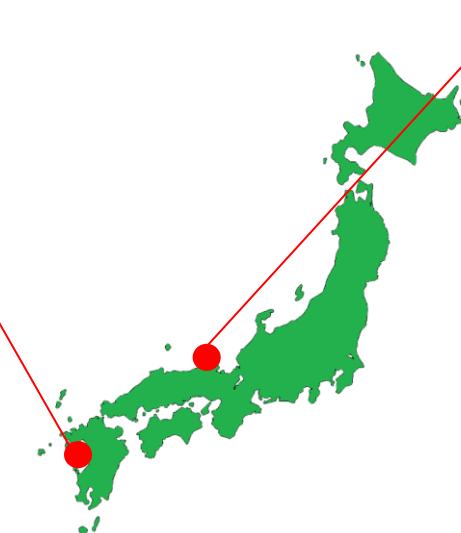


出典：環境省せとうちネット

# A.閉鎖性(へいさせい)海域

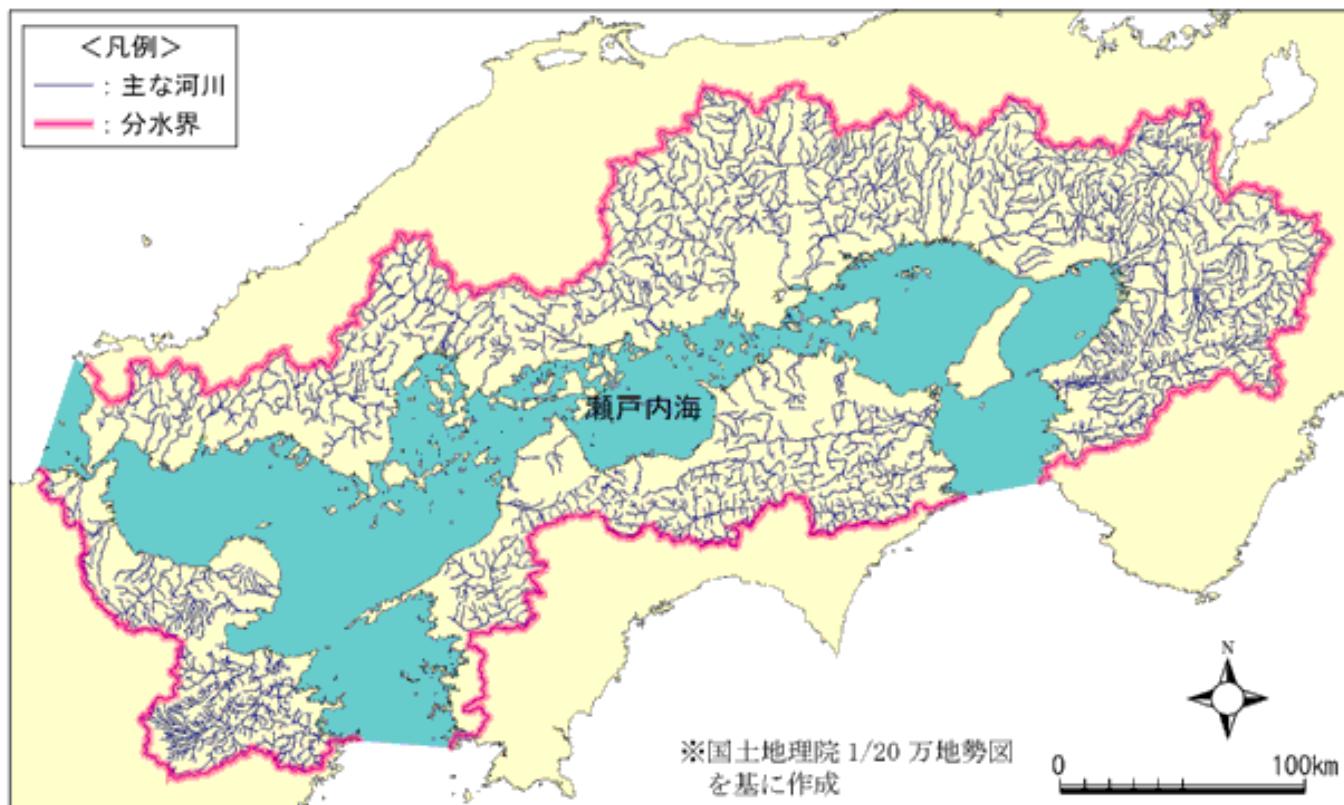
## 閉鎖性海域とは？

外部との水の交換が少ない内湾、内海などのこと。  
人間活動による栄養がたまりやすい。



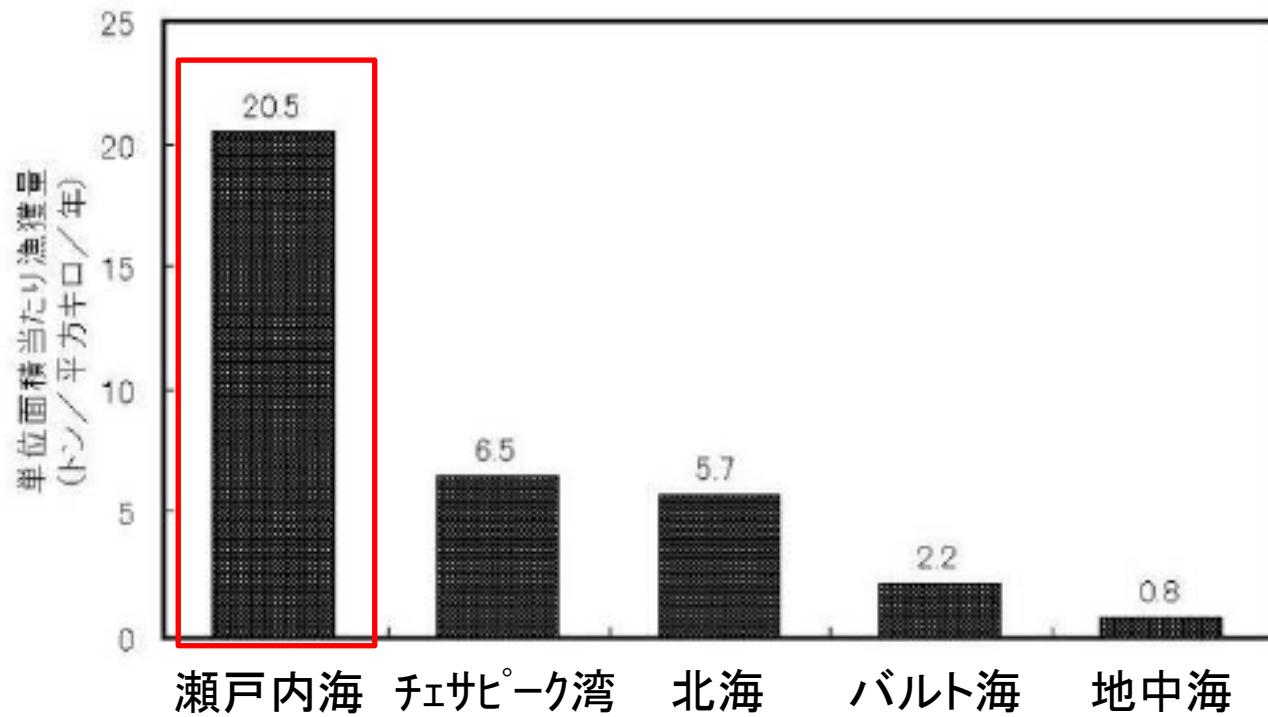
日本の他の閉鎖性海域

# Q.瀬戸内海って魚が多い？



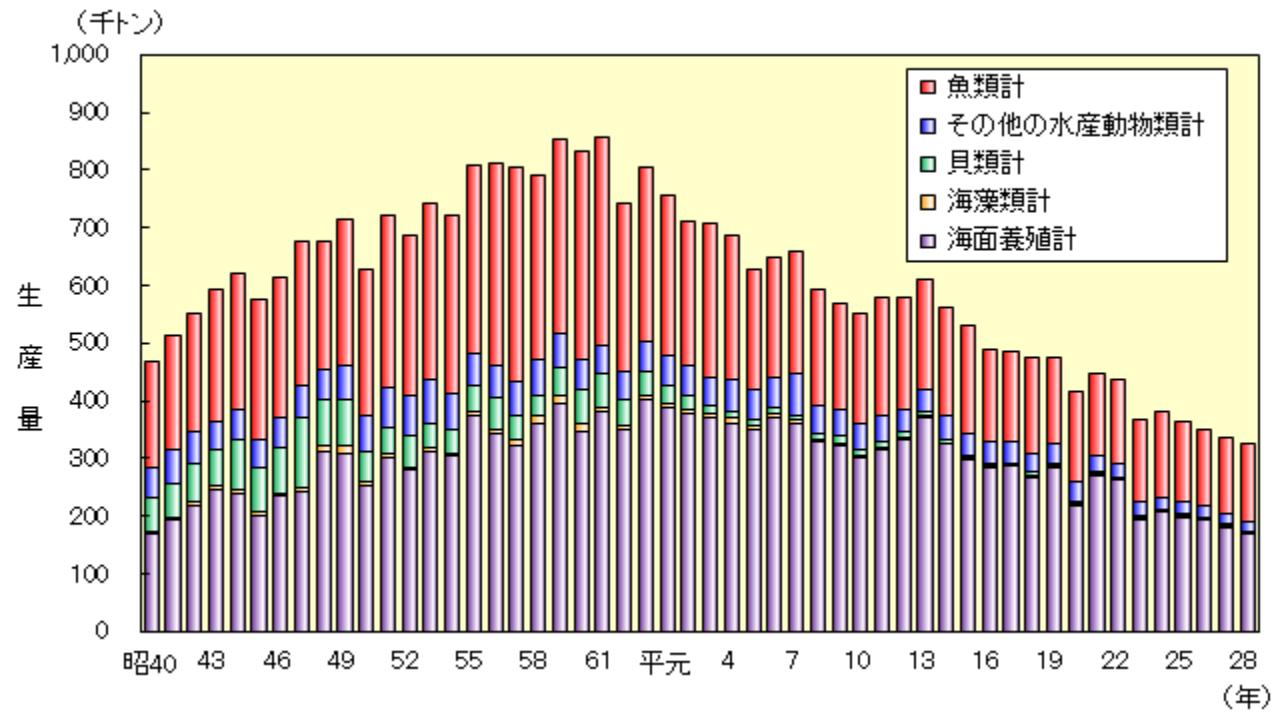
出典：環境省せとうちネット

# A. 世界的に漁獲圧は大きい (1970、1980年代)



出典: Okaichi, T. and T. Yanagi ed. ( 1997)  
Sustainable Development in the Seto Inland Sea

# 瀬戸内海の漁獲量の推移



減少している...

# 瀬戸内海の昔

赤潮の発生



出典：瀬戸内海の自然と環境

魚のへい死



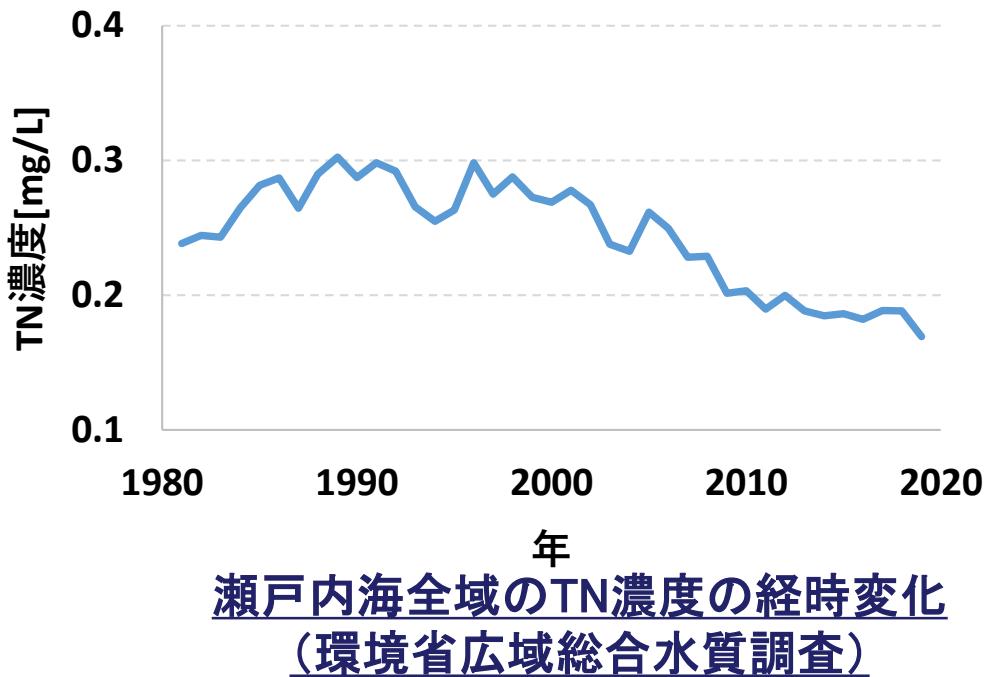
出典：北九州市HP

富栄養化

出典：瀬戸内海-日本最大の閉鎖性海域  
社団法人瀬戸内海環境保全協会

海をきれいにする対策を取った

# 瀬戸内海の法規制



水質汚濁・富栄養化

規制強化

現在は?

58年 水質保全法、工場排水規制法 制定

67年 公害対策基本法 制定

70年 水質汚濁防止法 制定

71年 環境庁 設置

73年 **瀬戸内法(臨時措置法)** 制定

73年 COD負荷量削減 開始

79年 第1次総量削減(COD)

93年 環境基本法 制定

93年 窒素・りん排水濃度規制 開始

01年 環境省 設置

01年 第5次総量削減(窒素・りん追加)

15年 **瀬戸内法改正**

21年 **瀬戸内法一部改正** 栄養塩類管理制度の創設

# 瀬戸内海の環境基準

## 化学的酸素要求量(COD)



類型	COD (mg/L)
A	$\leq 2$
B	$\leq 3$
C	$\leq 8$

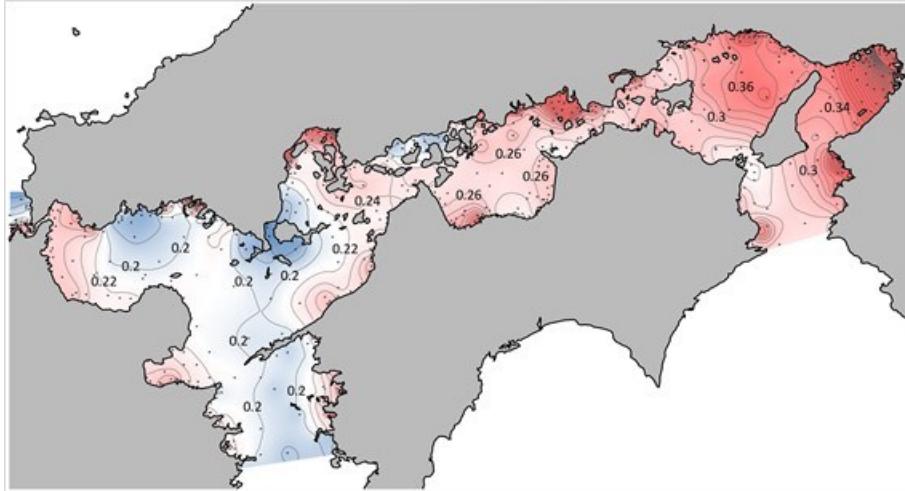
## 全窒素(TN)、全りん(TP)

類型	TN (mg/L)	TP (mg/L)
1	$\leq 0.2$	$\leq 0.02$
2	$\leq 0.3$	$\leq 0.03$
3	$\leq 0.6$	$\leq 0.05$
4	$\leq 1$	$\leq 0.09$

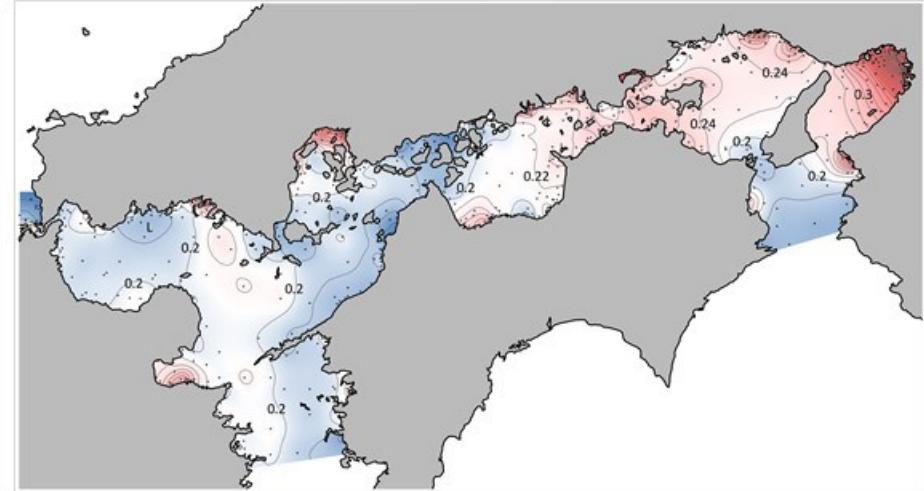


# 瀬戸内海のTN濃度の変遷

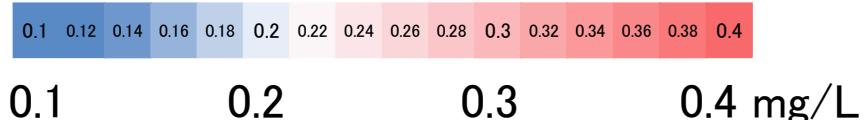
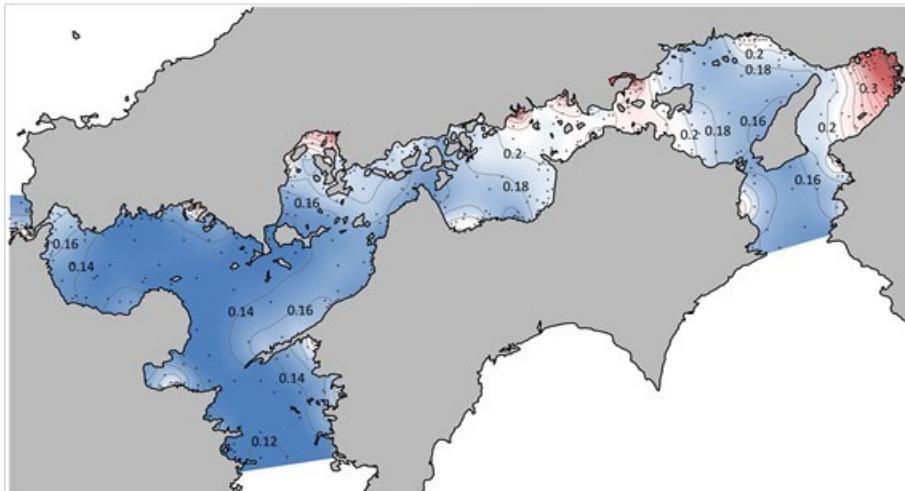
1995–1998 (H7–10)



2004–2008 (H16–20)



2014–2017 (H26–29)

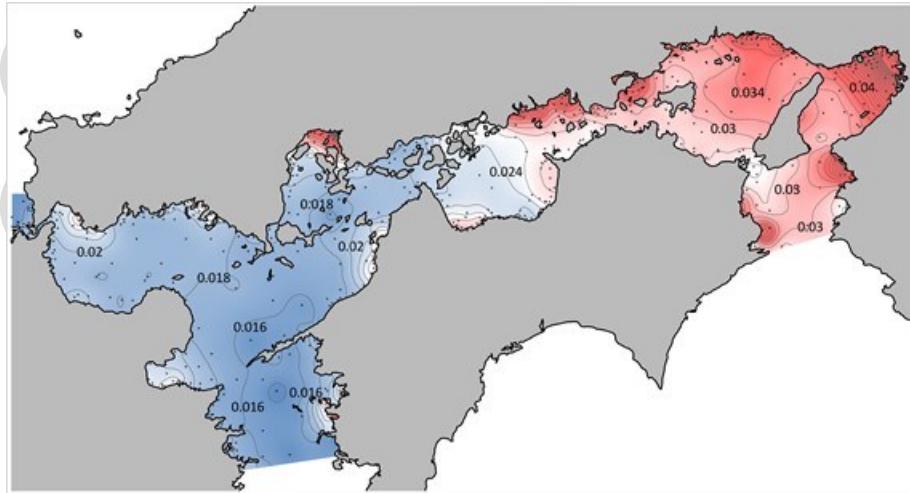


## 瀬戸内海の栄養(TN)の濃度

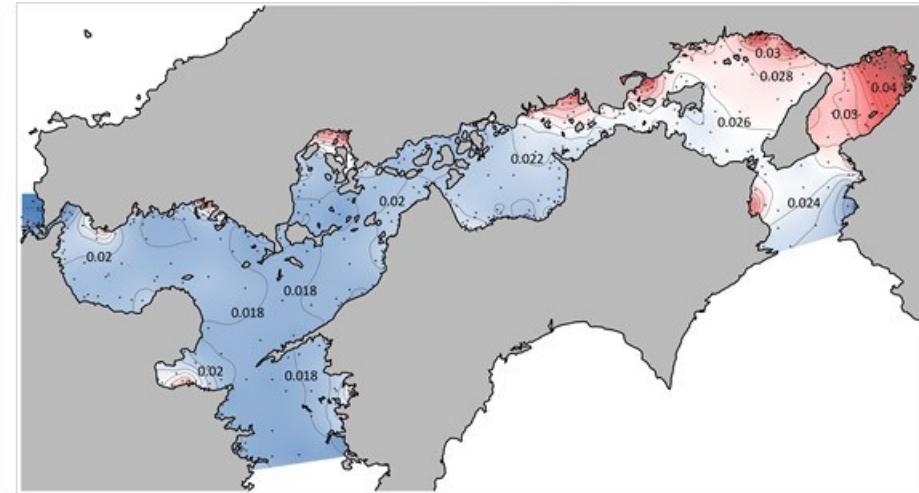
京都大学名誉教授 藤原建紀氏提供

# 瀬戸内海のTP濃度の変遷

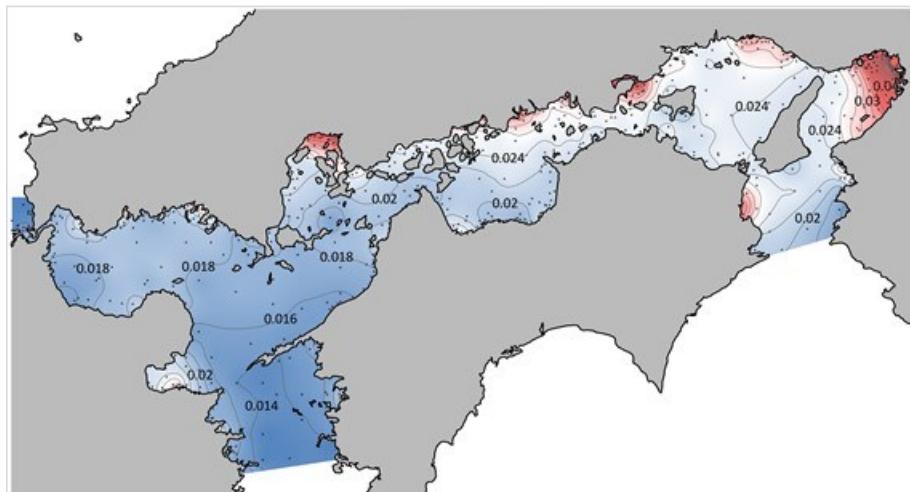
1995–1998 (H7–10)



2004–2008 (H16–20)



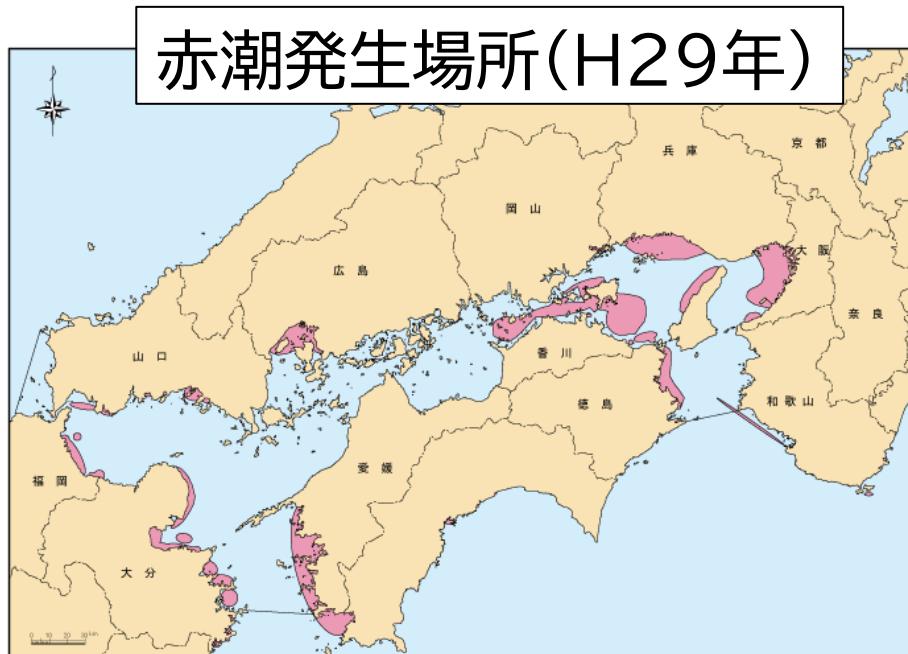
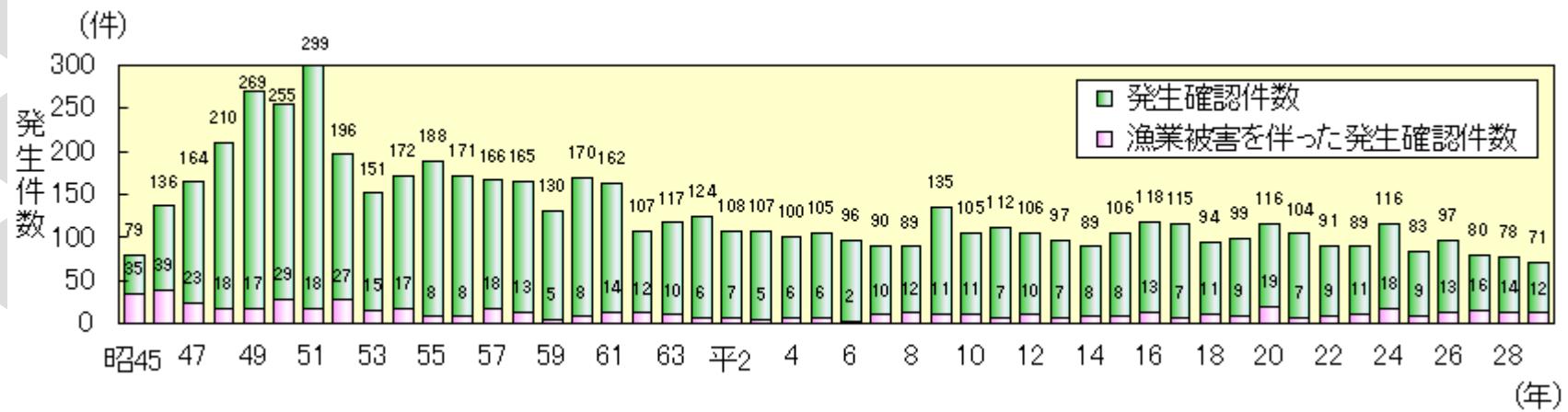
2014–2017 (H26–29)



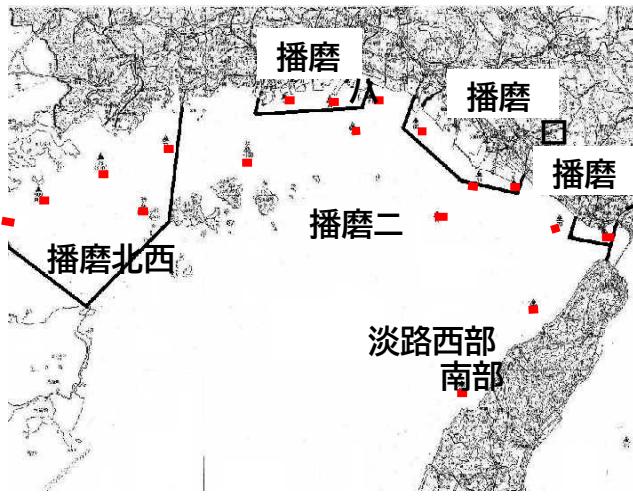
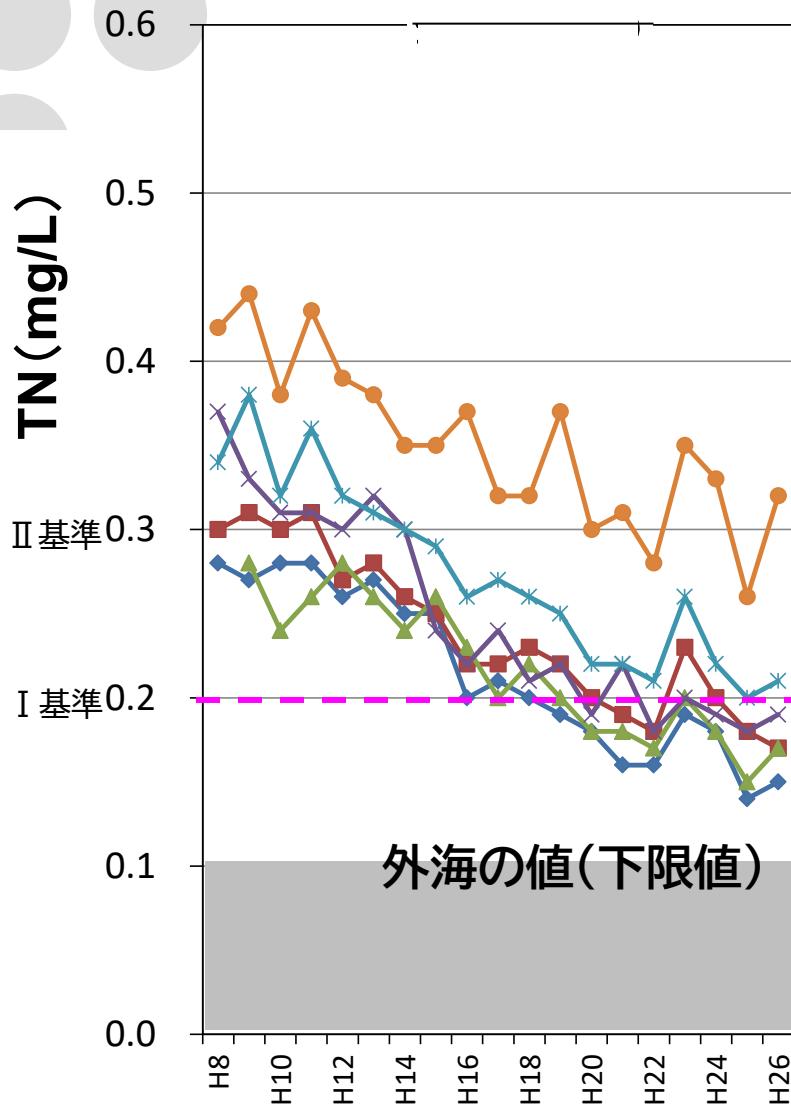
## 瀬戸内海の栄養(TP)の濃度

京都大学名誉教授 藤原建紀氏提供

# 瀬戸内海の赤潮発生件数



# 播磨灘の極端なTN濃度低下



出典:第41回瀬戸内海水環境研会議 藤原建紀氏 特別講演資料

# 瀬戸内海の今

ノリの色落ち



しんこの変化

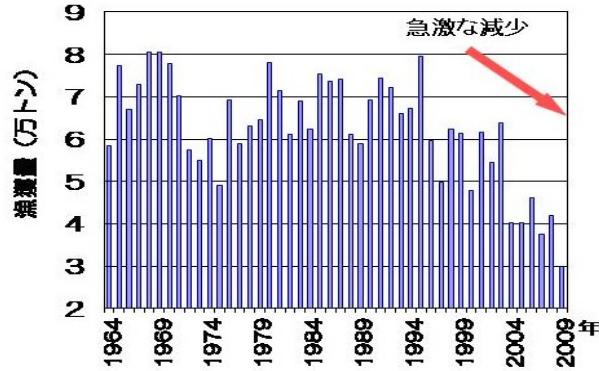


■赤腹



■青すじ

漁獲量の減少も・・・？

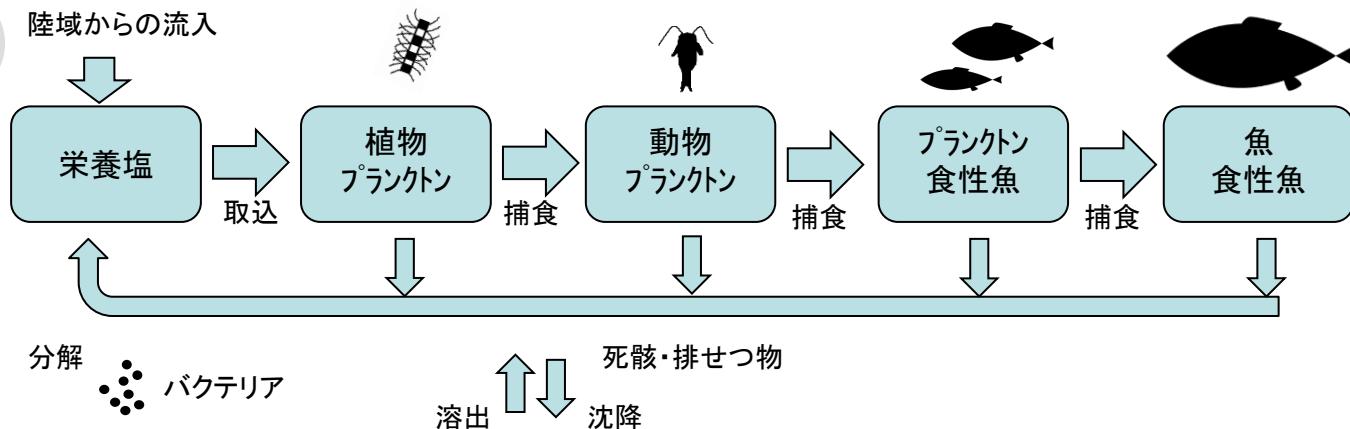


出典：兵庫県農林水産技術総合センターHP

貧栄養

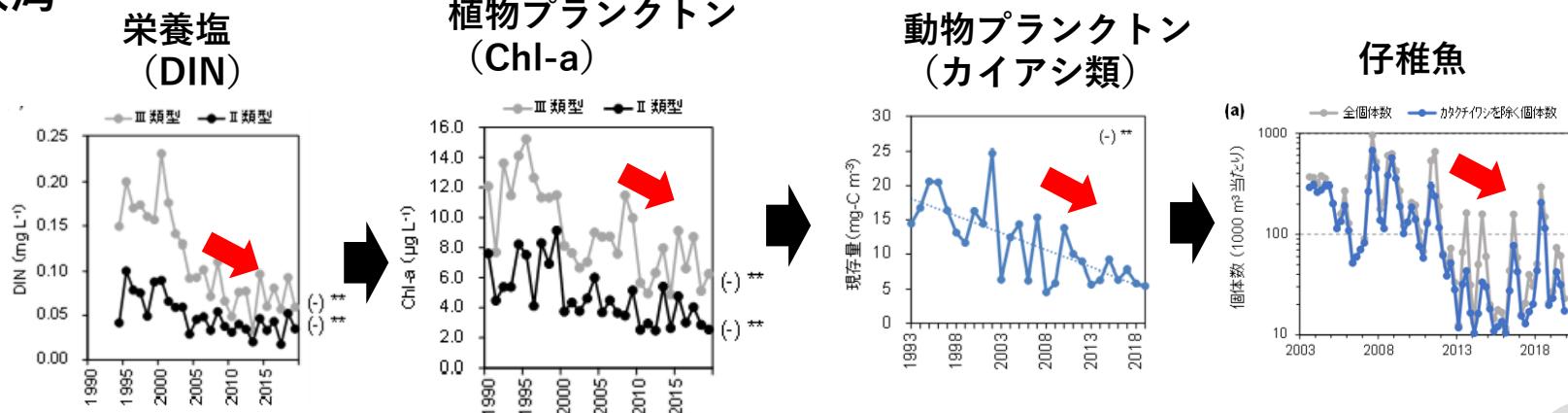
栄養塩類が減りすぎたせい・・・？

# 栄養塩類の減少が生態系に及ぼす影響



## ボトムアップ生態系

大阪湾



藤原 建紀, 鈴木 健太郎, 木村 奈保子, 鈴木 元治, 中嶋 昌紀, 田所 和明, 阿保 勝之.

栄養塩類変動が内湾の生態系・生物生産に及ぼす影響: 大阪湾. 水環境学会誌 45(3) 145-158 2022年

Q. ちょうどいい栄養塩類濃度って？

魚が獲れていた時？

赤潮がなくなった時？

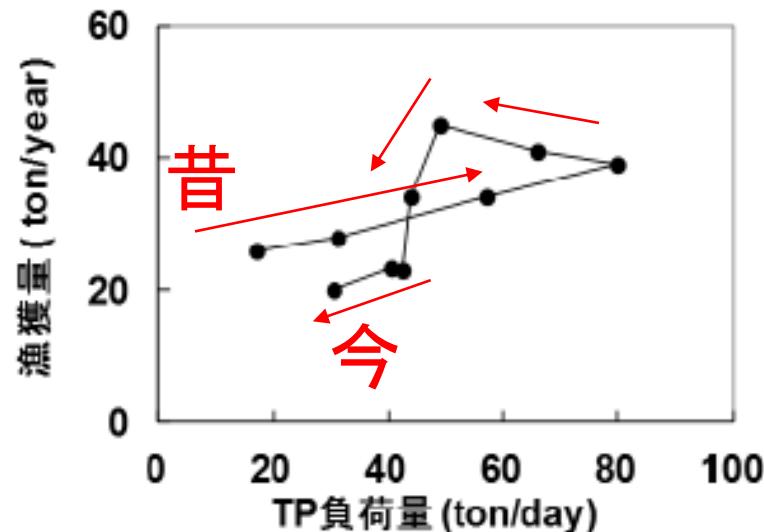
A. 魚もたくさんいて、きれいな海  
つまり、**豊かな海**

Q.じゃあ、赤潮等が発生しない程度かつ、魚が増える栄養の量は？

A.確実には分かっていない

→そのために、今科学的に分かっていることを実施しつつ、さらに研究を続けて、より良い方法を探す。つまり、順応的管理。

# 瀬戸内海の栄養と漁獲量・赤潮の関係



## 瀬戸内海の漁獲量と栄養の関係

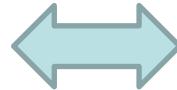
出典：山本民次,瀬戸内海の貧栄養化について（再考）,  
日本マリンエンジニアリング学会,49(4)(2014)

同じ栄養塩類濃度でも、過去と漁獲量が異なる  
→埋立・気候変動等、栄養の量以外も過去と異なるため

# 栄養塩類管理

## 人の手で管理

窒素・りんが過剰にあると、植物プランクトン等が異常繁殖し、赤潮となる（富栄養化）。



窒素・りんが不足状態になると、生物が育たない（貧栄養化）。



出典：瀬戸内海-日本最大の閉鎖性海域-社団法人瀬戸内海環境保全協会



2015年3月 山本民次・花里孝幸  
編著、地人書館出版

# 法改正

2015年10月2日

瀬戸内海環境保全特別措置法が**37年ぶり**に大幅改

**瀬戸内海を豊かな海とすることが明確化**

**(第2条の2の追加)**

(第2条の2)

瀬戸内海の環境の保全は、瀬戸内海が、我が国のみならず世界においても比類のない美しさを誇り、かつ、その自然と人々の生活及び生業並びに地域のにぎわいとが調和した自然景観と文化的景観を併せ有する景勝の地として、また、国民にとつて貴重な漁業資源の宝庫として、その恵沢を国民がひとしく享受し、後代の国民に継承すべきものであることに鑑み、瀬戸内海を、人の活動が自然に対し適切に作用することを通じて、美しい景観が形成されていること、生物の多様性及び生産性が確保されていること等その有する多面的価値及び機能が最大限に発揮された**豊かな海**とすることを旨として、行わなければならない。

# 法改正

【瀬戸内海環境保全特別措置法の一部を改正する法律（2021年6月）】  
栄養塩類の「排出規制」一辺倒から、きめ細かな「管理」への転換。  
地域ごとのニーズに応じて一部の海域への栄養塩類供給を可能とする  
「栄養塩類管理制度」の創設。



## 兵庫県での栄養塩類管理計画

- 瀬戸内海環境保全特別措置法が2021年6月に改正
- 改正法に基づき「兵庫県栄養塩類管理計画」を策定(2022年10月)し、海域への計画的な栄養塩類の供給を実施

1 対象海域 大阪湾西部、播磨灘

3 水質の目標値 望ましい栄養塩類濃度

水質の目標値 (県条例に基づく下限値以上、環境基準値以下)

水域類型	全窒素(mg/L)		全りん(mg/L)	
	県条例下限値	環境基準値	県条例下限値	環境基準値
II	0.2	0.3	0.02	0.03
III	0.2	0.6	0.02	0.05

2 対象物質 全窒素及び全りん

4 栄養塩類増加措置実施者及び実施方法

①～④の条件全てに適合するものを選定

栄養塩類増加措置実施者選定の条件

- ①総量規制対象の工場・事業場
- ②有害物質が増加しない
- ③生活環境悪化のおそれがない
- ④栄養塩類供給量の調節が可能

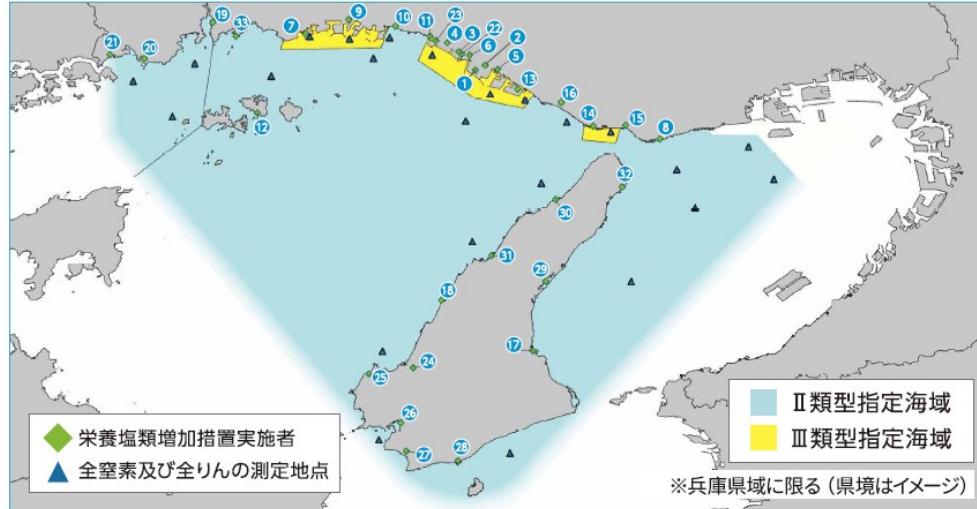
全国初

兵庫県は、栄養塩濃度の下限値を条例で設定（2019年10月）

# 法改正

全国初

兵庫県は、栄養塩類管理計画を策定（2022年10月）



## 栄養塩類増加措置実施者（所在地、工場・事業場名）

1	加古川市	（株）神戸製鋼所加古川製鉄所	12	姫路市	家島浄化センター	23	高砂市	伊保浄化センター
2	加古川市	関西熱化学（株）加古川工場	13	明石市	二見浄化センター	24	南あわじ市	松帆・湊浄化センター
3	高砂市	（株）カネカ高砂工業所	14	明石市	船上浄化センター	25	南あわじ市	津井浄化センター
4	高砂市	サントリープロダクツ（株）高砂工場	15	明石市	朝霧浄化センター	26	南あわじ市	福良浄化センター
5	播磨町	多木化学（株）本社工場	16	明石市	大久保浄化センター	27	南あわじ市	阿万浄化センター
6	加古川市	兵庫県加古川下流浄化センター	17	洲本市	洲本環境センター	28	南あわじ市	灘浄化センター
7	姫路市	兵庫県揖保川浄化センター	18	洲本市	五色浄化センター	29	淡路市	津名浄化センター
8	神戸市	垂水処理場	19	相生市	相生下水管理センター	30	淡路市	北淡浄化センター
9	姫路市	中部析水苑	20	赤穂市	赤穂下水管理センター	31	淡路市	一宮浄化センター
10	姫路市	東部析水苑	21	赤穂市	福浦下水処理場	32	淡路市	淡路・東浦浄化センター
11	姫路市	大的析水苑	22	高砂市	高砂浄化センター	33	たつの市	室津浄化センター

※栄養塩類増加措置実施方法: 1は生産工程の一部変更、2～33は汚水等の処理方法の変更(当面、栄養塩類増加措置は全窒素のみとする)

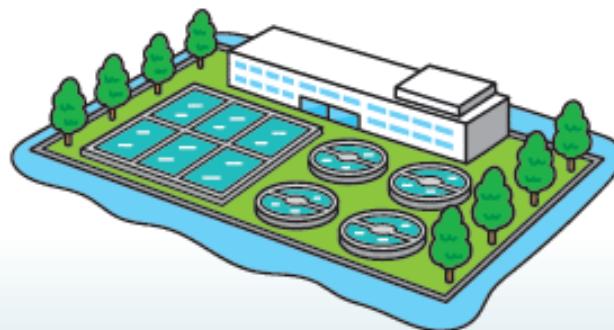
# 栄養塩類供給

## ■栄養塩類供給等の取組イメージ

工場・事業場からの  
栄養塩類供給の推進



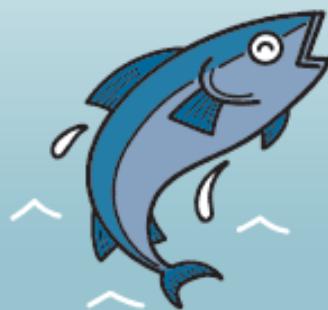
下水処理場の  
季節別運転



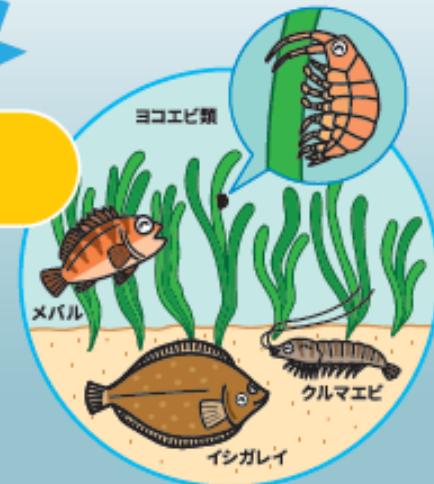
かいぼり・森林管理



海域への栄養塩類供給



海底耕うん等

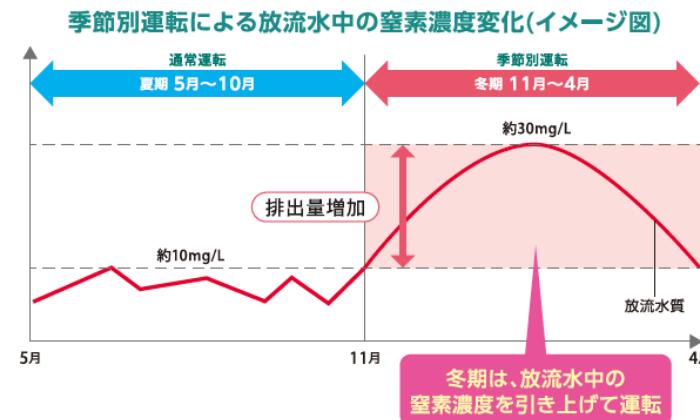


# 栄養塩類供給

## 季節別運転とは

- 降雨が少ない冬期に、河川から海への栄養塩類供給が減少
- 季節別運転とは、栄養塩類供給が減少する冬期(11月～4月)に、栄養分(窒素)の放流を増加させる運転方法

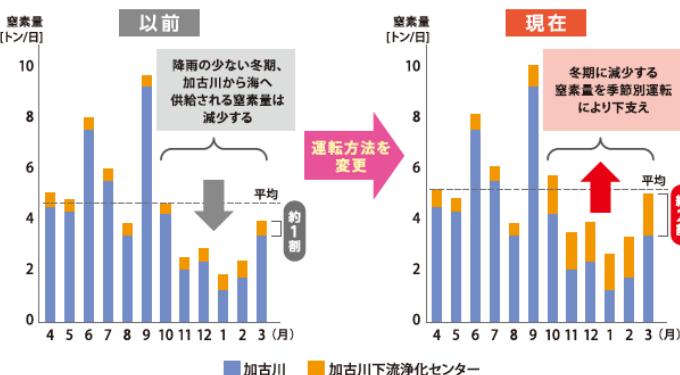
※2021年度末現在、県下28処理場で実施



## 下水放流水による窒素供給効果

- 加古川から海へ供給される窒素量のうち、本処理場から放流される窒素量の割合は、以前の約1割から現在は約2割まで増加
- 加古川から海への窒素供給量が少なくなる冬期に、季節別運転により窒素量を下支え

「加古川」と「加古川下流浄化センター」からの月別の窒素供給量



引用：兵庫県環境部水大気課資料

# 栄養塩類供給

## 下水放流水中の窒素を増加させるしくみ

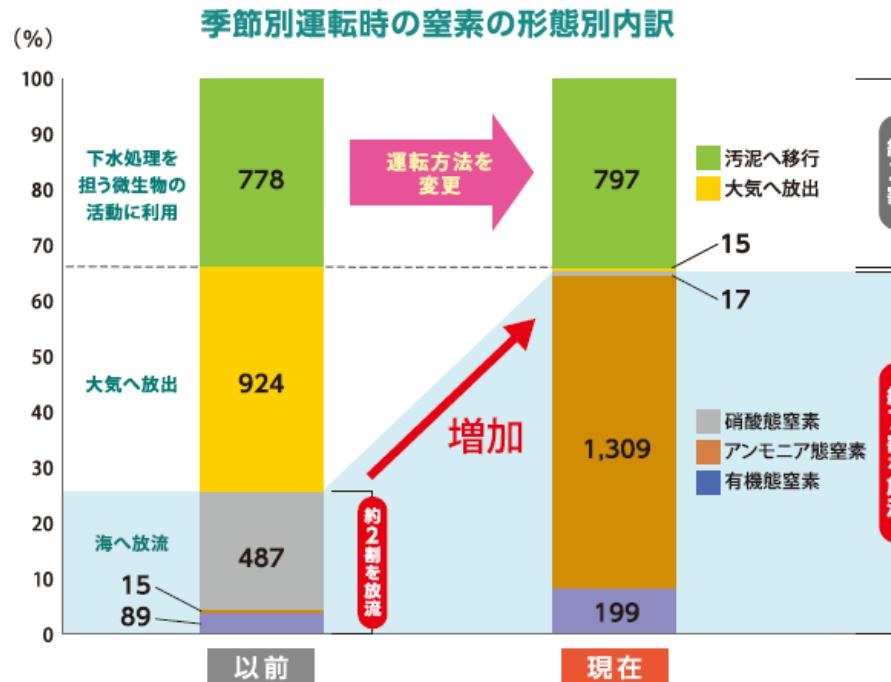
- 反応タンクでの酸素供給量を減らし、硝化細菌の活動を抑制

アンモニア態窒素の酸化を抑え、気体になり大気へ放出される窒素量が減少  
その結果、放流水中の窒素量が増加

- 以前は本処理場へ流入する窒素量の約2割を海へ放流

2019年度から行っている現在の季節別運転では、約7割\*まで増加

\*残りの3割は、下水処理を行う微生物(下水汚泥)の活動に利用



引用：兵庫県環境部水大気課資料



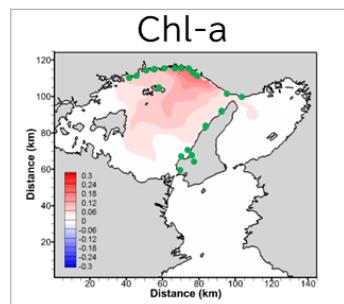
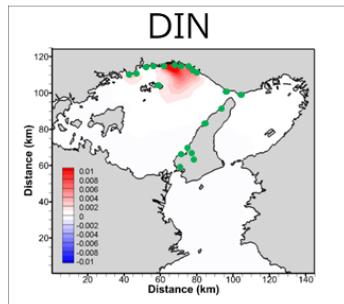
○播磨灘（瀬戸内海）の栄養塩類  
について

○私の研究について  
(栄養塩類管理の  
生態系への効果検証)

# 既往の栄養塩類管理の効果検証

## 【下水処理場の栄養塩類管理運転の影響】

海洋シミュレーションモデル（ECOMSED+改変RCA）により、県下20か所の下水処理場が栄養塩管理運転を実施した場合の感度解析を実施。水質の変化は沖合にまで広くおよび、播磨灘表層の有機物濃度が上昇。



鈴木元治, 中谷祐介, 古賀佑太郎: 下水処理場の窒素排出量増加運転が瀬戸内海播磨灘の有機物及び栄養塩の海水中濃度に与える影響評価. 水環境学会誌 43(2), 43-53 (2020)

生態系パラメータ等は海域ごとに異なるため、データが十分に揃っていない。パラメータのチューニング作業は困難になる。



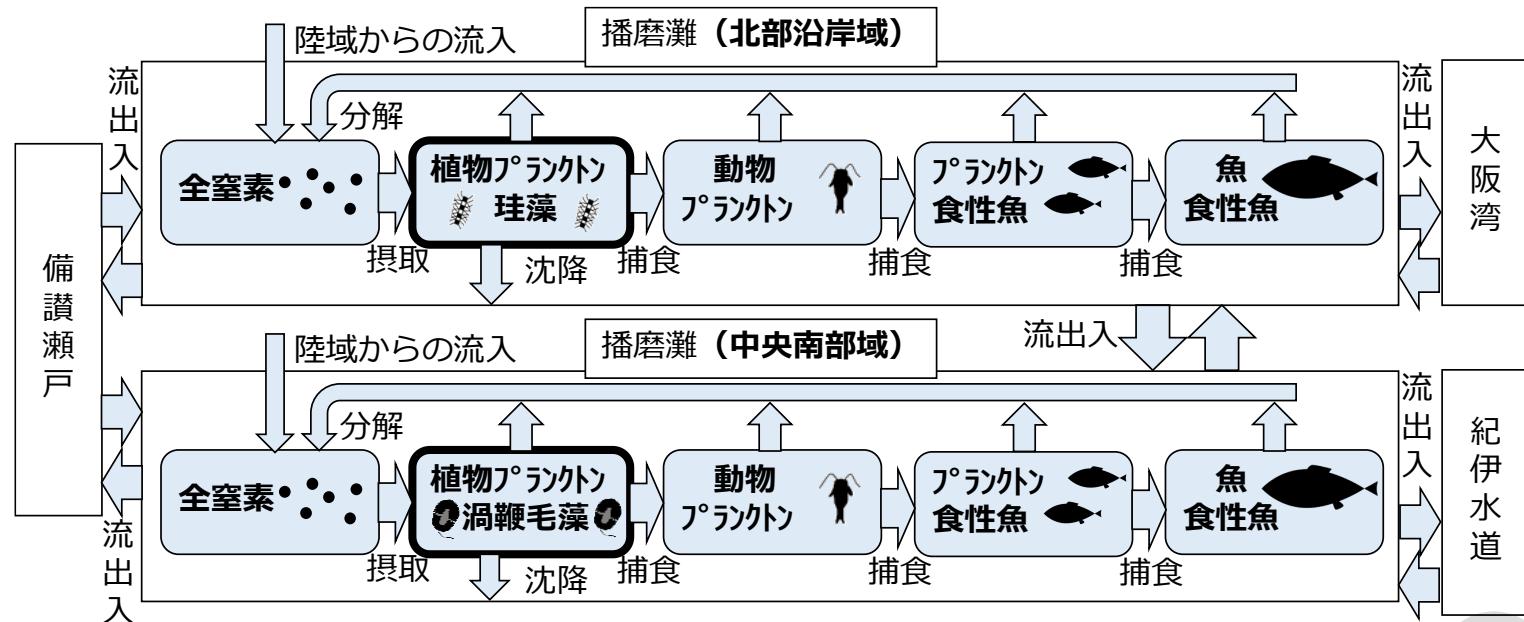
課題：予測結果に科学的な不確実性を含む

# 食物連鎖モデル概要

琵琶湖を対象に開発した食物連鎖モデル※を、播磨灘を対象として改変。

## 【特徴】

- モデル内は栄養塩類、植物プランクトン、動物プランクトン、プロランクトン食性魚、魚食性魚で構成される。
- パラメータ幅を設定し、モンテカルロ法により現況を安定して計算できる複数パターンのパラメータセット・計算結果を得ることができる。
- 北部沿岸域と中央南部域で、異なる生態系パラメータを設定することができる。



※佐藤祐一・早川和秀(2019). 栄養塩負荷の増減が琵琶湖の高次生態系に与える影響：モンテカルロ法を用いた食物連鎖モデルによる解析.

# 食物連鎖モデル計算手順

モデル内では、以下の手順に従って計算される。

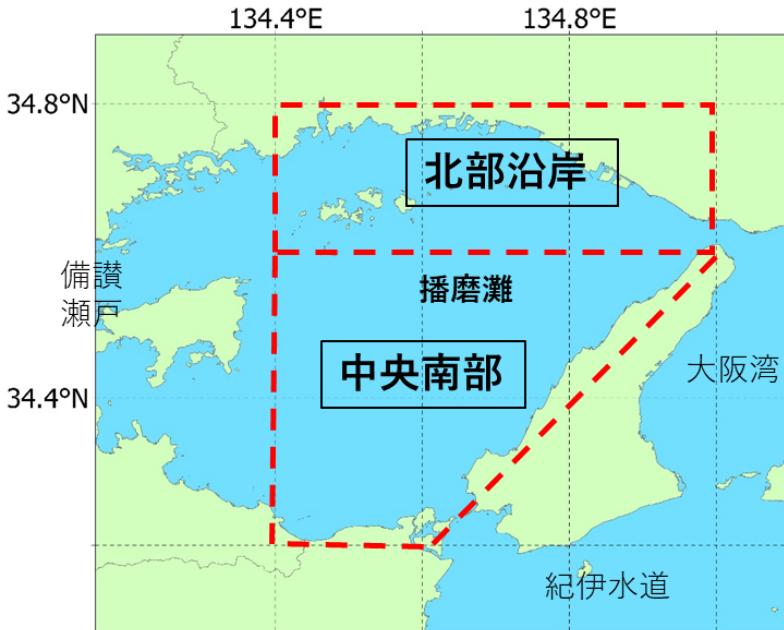
STEP1	モデルパラメータを文献等から定めた幅の範囲内でランダムに設定し、20年間の計算を行う。
STEP2	計算結果が以下の条件を満たす場合にそのモデルを採用する。採用されなかった場合はSTEP1に戻る。①計算された栄養塩濃度および各バイオマス濃度の平均値が2010年代の観測値等から設定した範囲内にあること。（現況再現条件）②20年目の栄養塩濃度および各バイオマス濃度の変動係数（=標準偏差/平均値）が0.2以下であること。（定常条件）
STEP3	計算初期値を20年目の平均値に置き換える。その後、栄養塩の流入負荷量を変化させて20年間の計算を行うことで流入負荷量の変化に対する栄養塩濃度および各バイオマス濃度の感度を求める。
STEP4	1000パターンの結果が得られるまでSTEP1～3を繰り返す。

# 計算条件

## 計算領域

播磨灘を北部沿岸域と中央南部域で分割

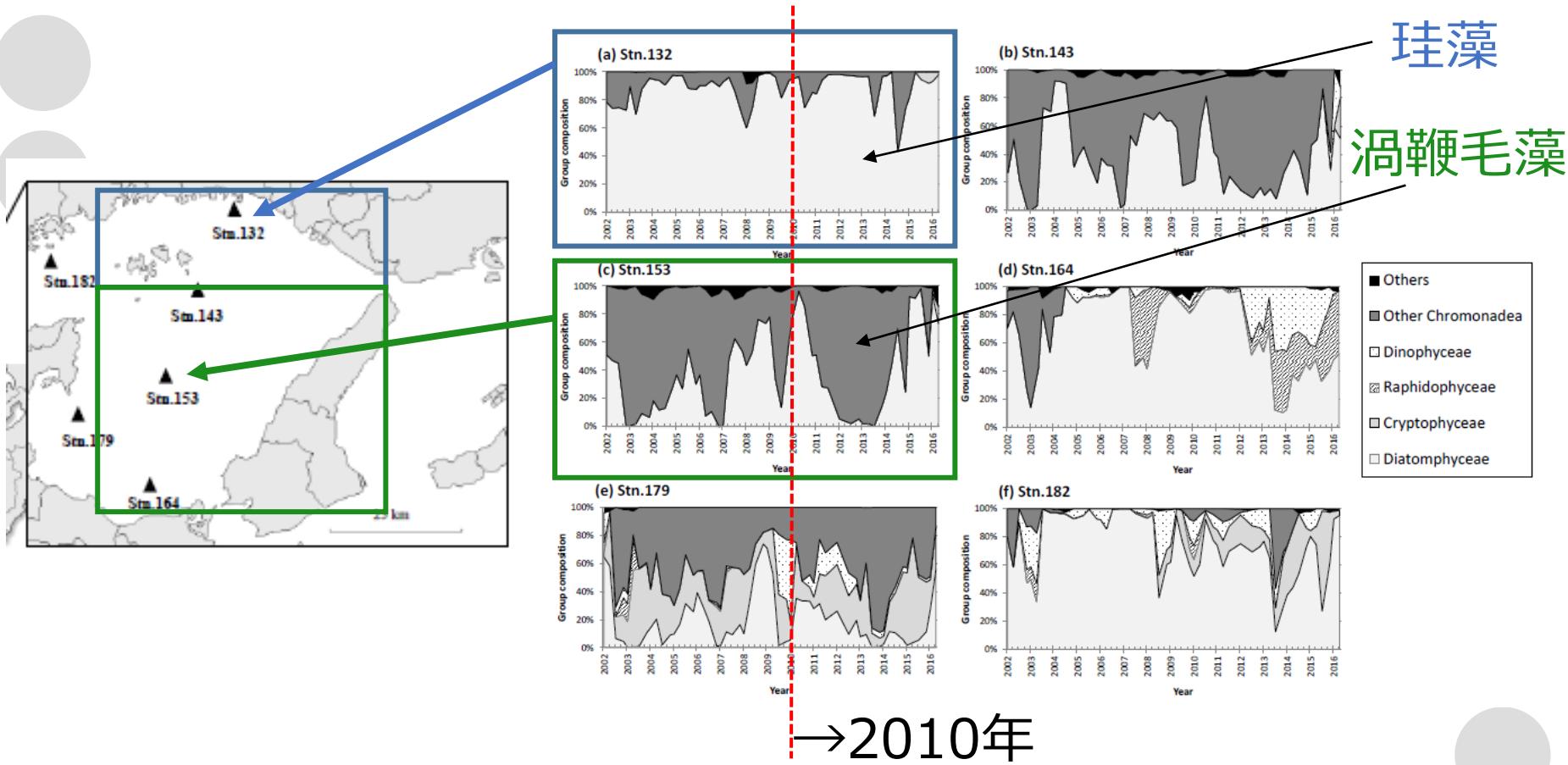
- 陸域流入負荷量を増加すると北部沿岸域の方が大きく影響を受ける。
- 北部沿岸域と中央南部域では隣接する海域が異なる。
- 北部沿岸域と中央南部域では水深・植物プランクトン（クロロフィルa）濃度・植物プランクトンの種別存在割合が大きく異なる。



	北部沿岸	中央南部
水量 [m <sup>3</sup> ]	<b><math>1.79 \times 10^{10}</math></b>	<b><math>4.46 \times 10^{10}</math></b>
水深 [m]	<b>21.9</b>	<b>29.2</b>
TN濃度 [t/day]	2010s <b>0.172</b>	<b>0.174</b>
	1990s <b>0.381</b>	<b>0.330</b>
植プラ [gC/m <sup>3</sup> ]	2010s <b>0.102</b>	<b>0.078</b>
	1990s <b>0.109</b>	<b>0.077</b>

# 植物プランクトンの種別分布

北部沿岸域：珪藻、中央南部域：渦鞭毛藻の割合が大きい



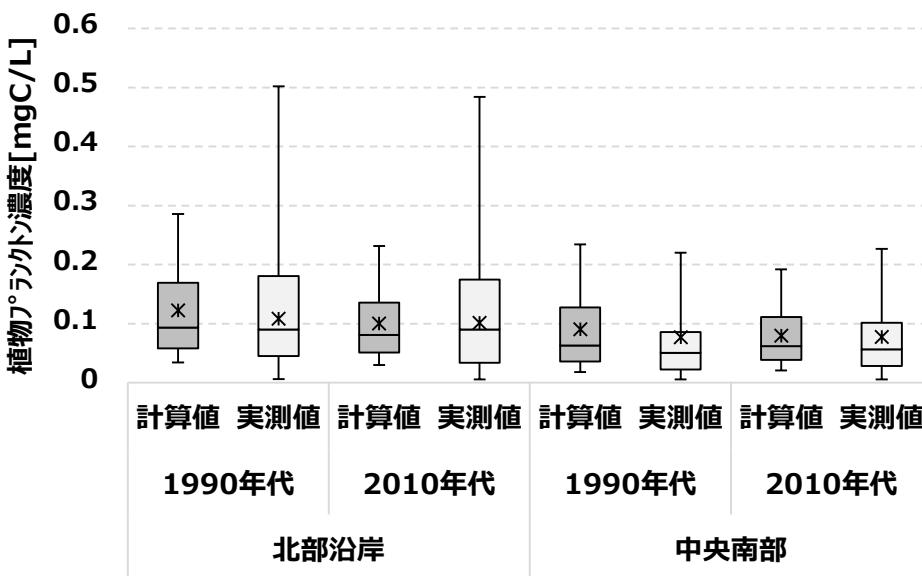
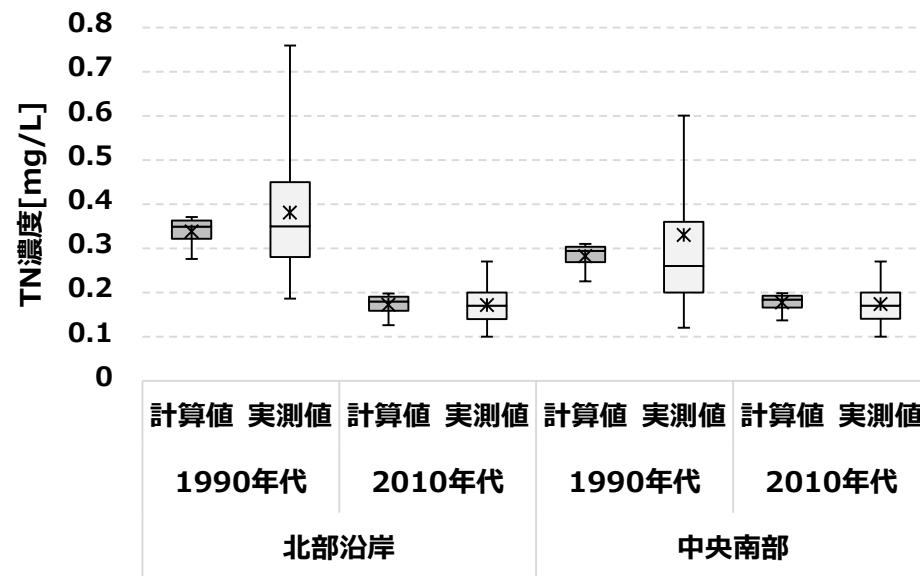
# 入力条件(初期値・許容変動幅)

北部沿岸域と中央南部域で異なる実測値のある、TN濃度・植物プランクトン等は別で設定。TN濃度・植物プランクトンの変動幅は実測値の範囲（5%値～95%値）を基に設定。その他の項目は文献値等を参考に設定。

- 再現性を実測値のある「TN濃度・植物プランクトン量」の1990年代・2010年代で確認。
- 陸域負荷量を×0.1～×10の範囲で変化させて、栄養塩類管理の影響を評価

バイオマス等初期値 と許容変動幅	単位	北部沿岸			中央南部		
		初期値	変動幅 最小値	変動幅 最大値	初期値	変動幅 最小値	変動幅 最大値
TN濃度	gN/m <sup>3</sup>	0.172	0.1	0.4	0.174	0.1	0.4
植物プランクトン	gC/m <sup>3</sup>	0.102	0.01	0.3	0.078	0.01	0.25
動物プランクトン	gC/m <sup>3</sup>	0.03	0.01	0.12	0.03	0.01	0.12
プランクトン食性魚	gC/m <sup>3</sup>	0.07	0.001	0.25	0.07	0.001	0.25
魚食性魚	gC/m <sup>3</sup>	0.035	0.001	0.25	0.035	0.001	0.25

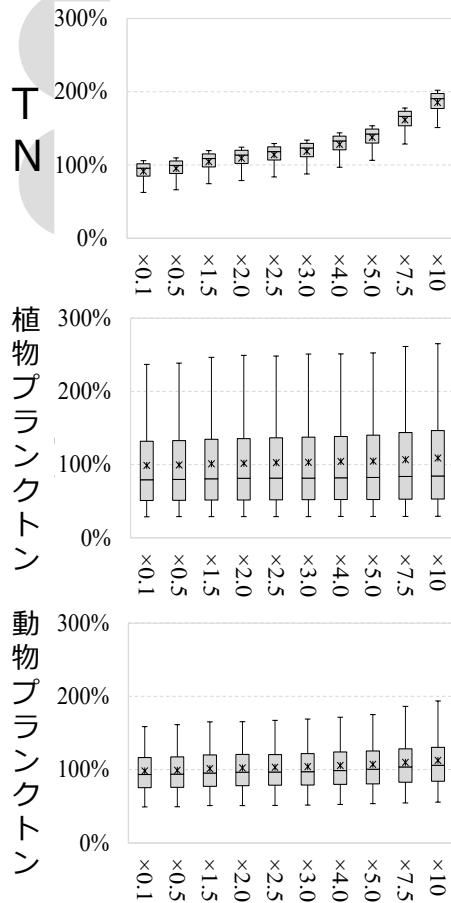
# 結果(陸域負荷量を増加)



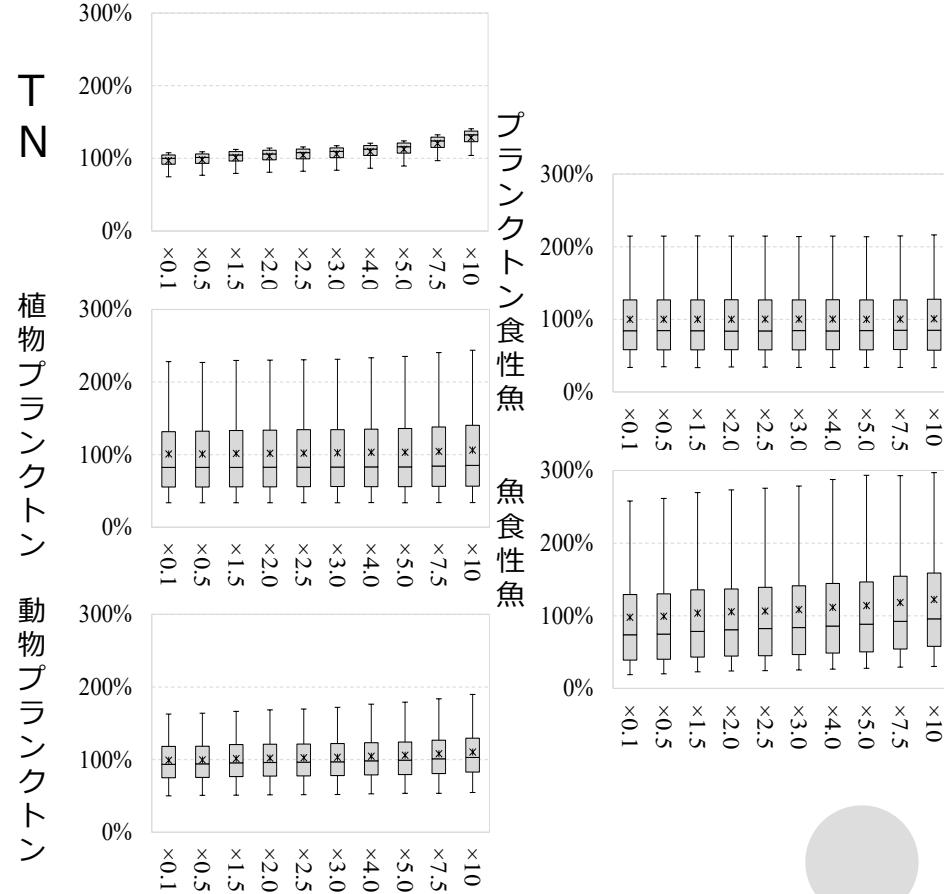
ひげ上端 : 95%値  
箱上端 : 75%値  
中央線 : 中央値  
箱下端 : 25%値  
ひげ下端 : 5%値  
\* : 平均値

# 結果(陸域負荷量を増加)

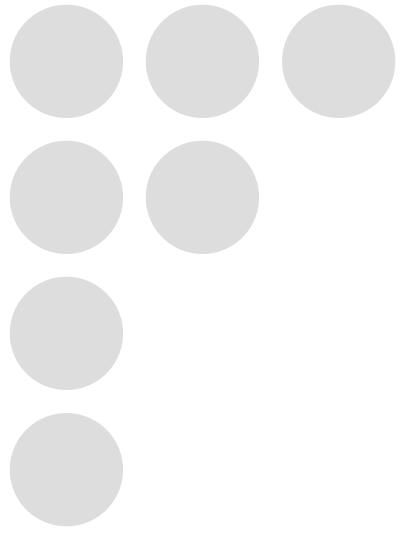
## 北部沿岸域



## 中央南部域



ひげ上端: 95%値, 箱上端: 75%値, 中央線: 中央値  
 箱下端: 25%値, ひげ下端: 5%値, \*: 平均値



ご清聴ありがとうございました。