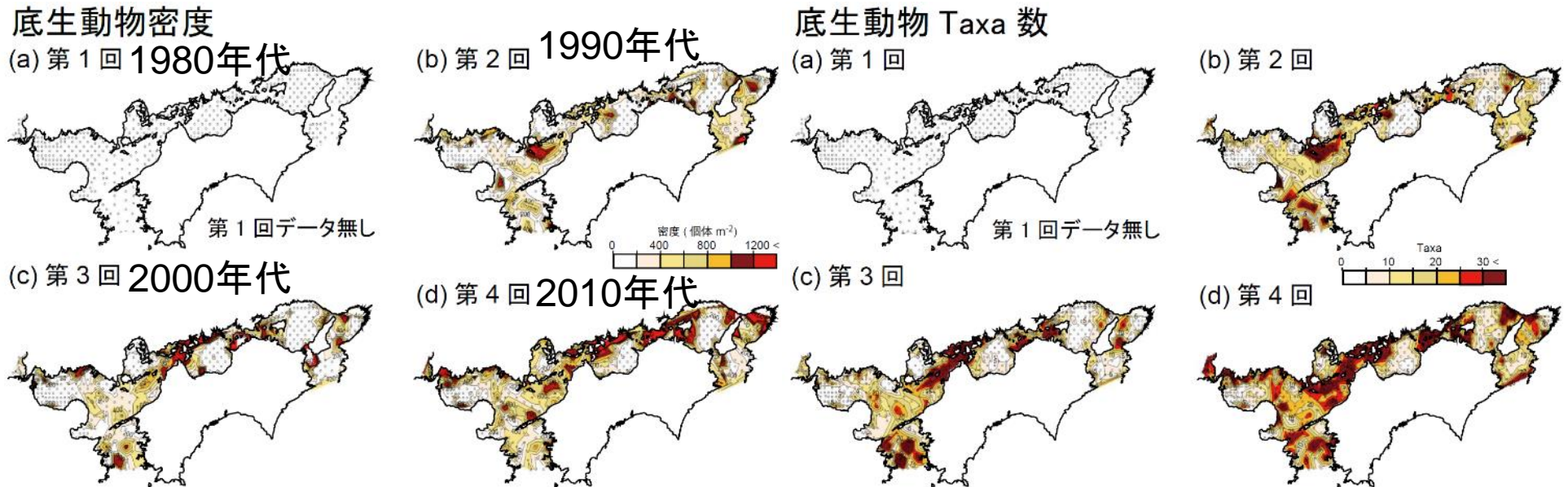


瀬戸内海における埋在性ベントス群集の今・昔 —瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた過去20年間の時空間変動解析—



金谷弦(国立環境研究所・地域環境研究センター・海洋環境研究室)

本講演の内容は以下の環境省請負業務成果の一部となります：

- ・平成28～30年度「閉鎖性海域における気候変動による影響把握等検討業務」
- ・令和元年度「閉鎖性海域における気候変動による影響評価及び適応策等検討業務」

共同研究者：

サブテーマ1 「水温・水質に係るデータ分析」：	牧秀明 ¹
サブテーマ2 「底生生物群集に係るデータ分析」：	金谷弦 ¹ ・伊藤萌 ¹
サブテーマ3 「植物プランクトンに着目した実験」：	越川海 ¹ ・横山亜紀子 ¹
サブテーマ4 「気候変動の将来予測及び影響評価」：	東博紀 ¹ ・中田聡史 ¹ ・ 吉成浩志 ¹ ・秋山 千亜紀 ^{1・2}

¹ 国立環境研究所・地域環境研究センター・海洋環境研究室

² 筑波大学大学院・生命環境科学研究科

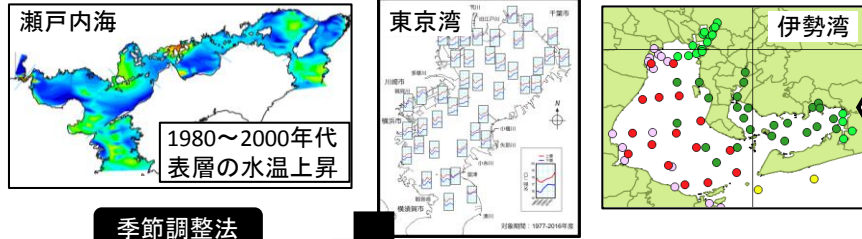
閉鎖性海域における気候変動による影響評価及び適応策等検討業務

～気候変動への適応と豊かな海の確保に向けて～

1. 水温・水質等のデータ分析・考察

水温 複数 データ
水質 海域 解析

- 瀬戸内海の行政モニタリングデータを対象に先行実施した季節調整法による水温・水質の長期変動傾向解析を東京湾・伊勢湾に展開



季節調整法

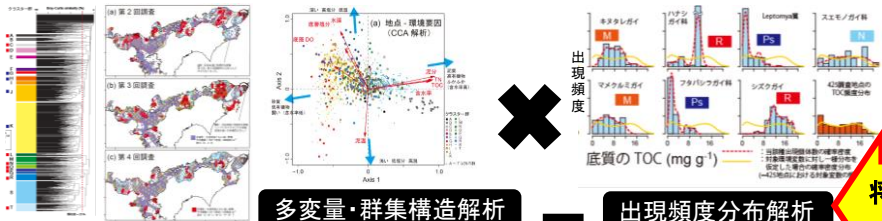
瀬戸内海 ⇒ 1980年代以降の水温・水質への気候変動影響の海域間比較

他海域
比較

2. 底生生物群集への影響評価

底生 瀬戸 データ 将来
生物 内海 解析 予測

- 環境-群集構造変動の対応関係(多変量・群集構造解析)
- 環境-種ごとの出現頻度の対応関係(出現頻度分布解析)



多変量・群集構造解析

出現頻度分布解析

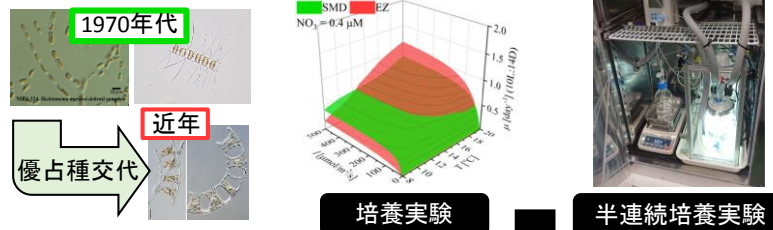
将来気候
の底質

過去データ解析 ⇒ 気候変動による底生生物群集の将来変化予測

3. 植物プランクトンの優占種交代

植プラ 瀬戸 実験 データ
内海 実験 解析

- 培養実験による水温・光・栄養塩の変動に対する種ごとの増殖特性評価
- 瀬戸内海の優占種交代プロセスの解析と半連続培養実験による再現



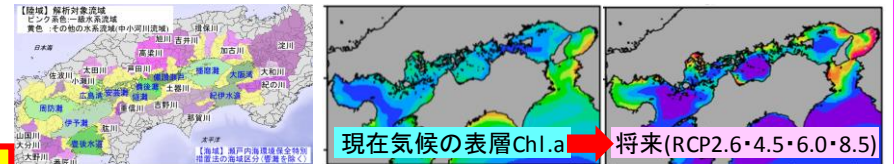
植プラ増殖特性 ⇒ 優占種交代への気候変動影響の評価・実験再現

植プラ
増殖特性

4. 将来予測・適応策の検討

シミュレー 瀬戸 将来 適応策
ション 内海 予測 検討

- 陸域-海域モデルによる水環境・生物生産性の将来予測シミュレーション
- 湾灘における気候変動影響の評価・効果的な適応策についての検討



現在気候の表層Chl.a → 将来(RCP2.6・4.5・6.0・8.5)

陸域淡水・汚濁負荷流出モデル → 海域流動・水質・底質モデル

気候変動影響の将来予測 ⇒ 水環境分野における適応策の検討・評価

気候変動への適応を踏まえた「豊かな海」の確保に向けた科学的知見の提示

気候変動影響の海域間比較
・共通性と相違性の抽出・脆弱海域の把握

気候変動影響評価・予測の充実化
・気候シナリオの複数化・底生生物群集の予測

気候変動影響への適応策
・海域ごとに必要な施策の提示・効果評価

目的と方法

目的

- ・瀬戸内海の底層水温における30年間の変動傾向を示す
- ・過去の環境-埋在性ベントスデータから、「生息環境が変わるとベントス群集はどう応答するか？」の対応関係を類推する
- ・将来的な気候変動による水温・底質環境の変化に伴い、瀬戸内海のベントス群集はどの海域でどう変わるかを予測する(現在進行中)

方法

- (1) 瀬戸内海の底層水温における長期変動解析(どの海域で上昇しているのか)
- (2) 過去20年(10年おき・3回)の調査データから底質と底生動物密度・多様性が「どこで・どのように」変わったかを可視化する
- (2) 多変量解析と環境傾度解析により、底生動物の分布や群集構造を規定している環境要因を特定(瀬戸内海の一般的傾向を読み取る)する
- (3) 文献調査:底生動物・沿岸生態系と水温上昇の関係(参考資料1・2)
- (4) モデルによる将来予測結果から、気候変動が底生動物の生物多様性や生産性に及ぼす影響を見積もる(現在進行中)

解析に用いたデータ

(a)「基本調査」: 1980年代~2010年代、10年おき、425定点、底質と底生動物

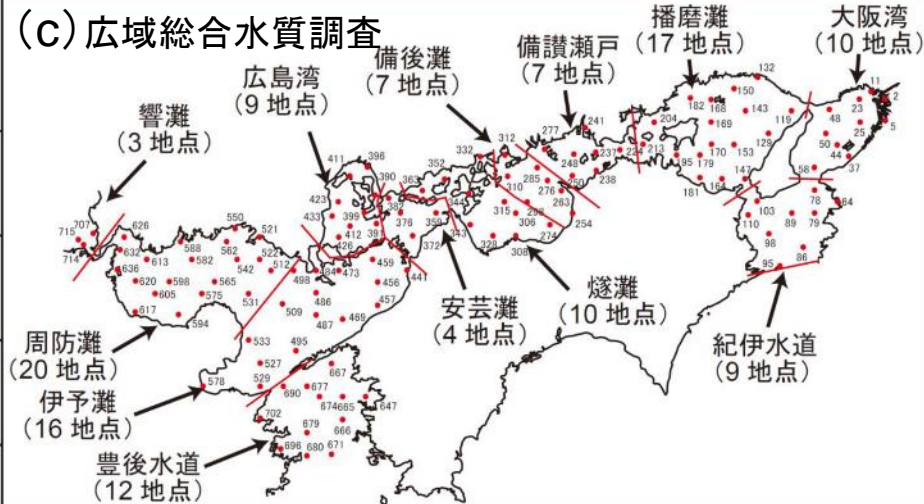
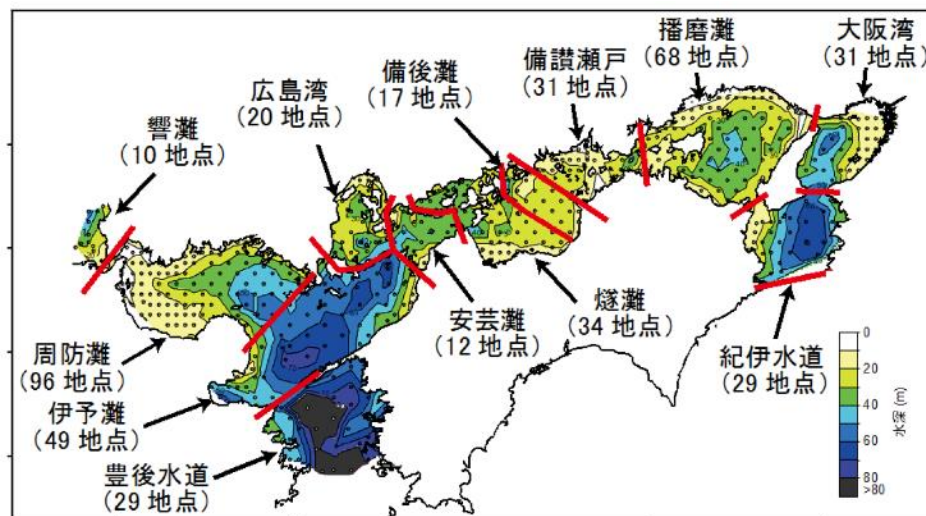
(b)瀬戸内海総合水質調査: 毎年4回、142~229地点、底層水質(一部多変量解析にのみ使用)

(c)広域総合水質調査: 毎年4回、124地点、底層水質(底層水温の経年変動解析)

(b)瀬戸内海総合水質調査



(a)瀬戸内海環境情報基本調査



結果：瀬戸内海における海域毎・季節毎の底層水温特性

- ・播磨灘・備讃瀬戸は夏～秋に高水温、冬低水温
- ・紀伊水道・豊後水道・響灘は冬～春に高水温(暖流の影響)

海域	底層水温の平均値(°C)			
	1月 ^a	5月 ^a	7月 ^a	10月 ^a
紀伊水道	12.6	16.6	20.1	24.3
大阪湾	10.9	15.0	21.7	25.2
播磨灘	10.0	15.2	21.9	24.0
備讃瀬戸	9.4	16.6	23.3	23.8
備後灘	10.1	15.9	22.2	23.7
燧灘	11.3	15.6	22.0	23.6
安芸灘	11.9	15.7	20.9	23.5
広島湾	12.1	15.0	19.7	23.8
伊予灘	12.4	15.0	20.4	23.1
周防灘	9.7	15.3	21.0	22.6
響灘	12.7	17.3	22.5	23.1
豊後水道	14.4	17.3	20.9	22.5
全海域平均	11.5	15.9	21.4	23.6

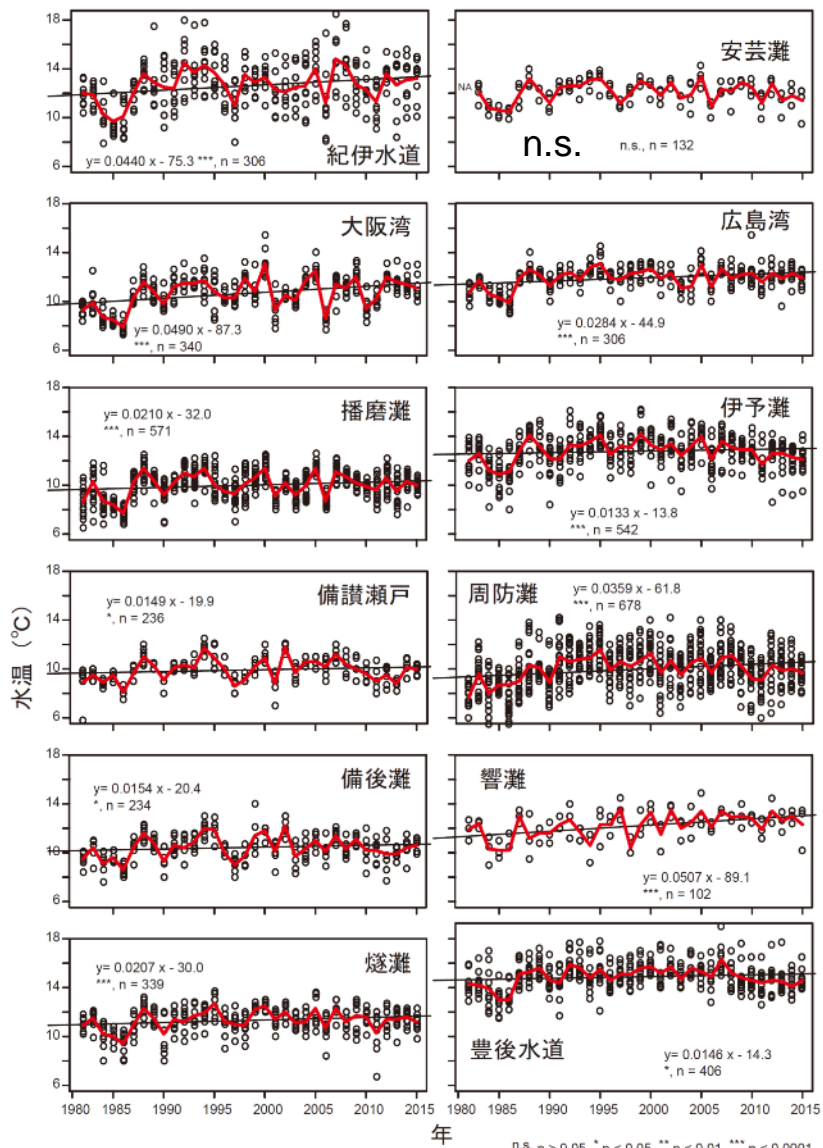
^a 広域総合水質調査、

NA: データ無し。青字: 低温の海域、赤字: 高温の海域。

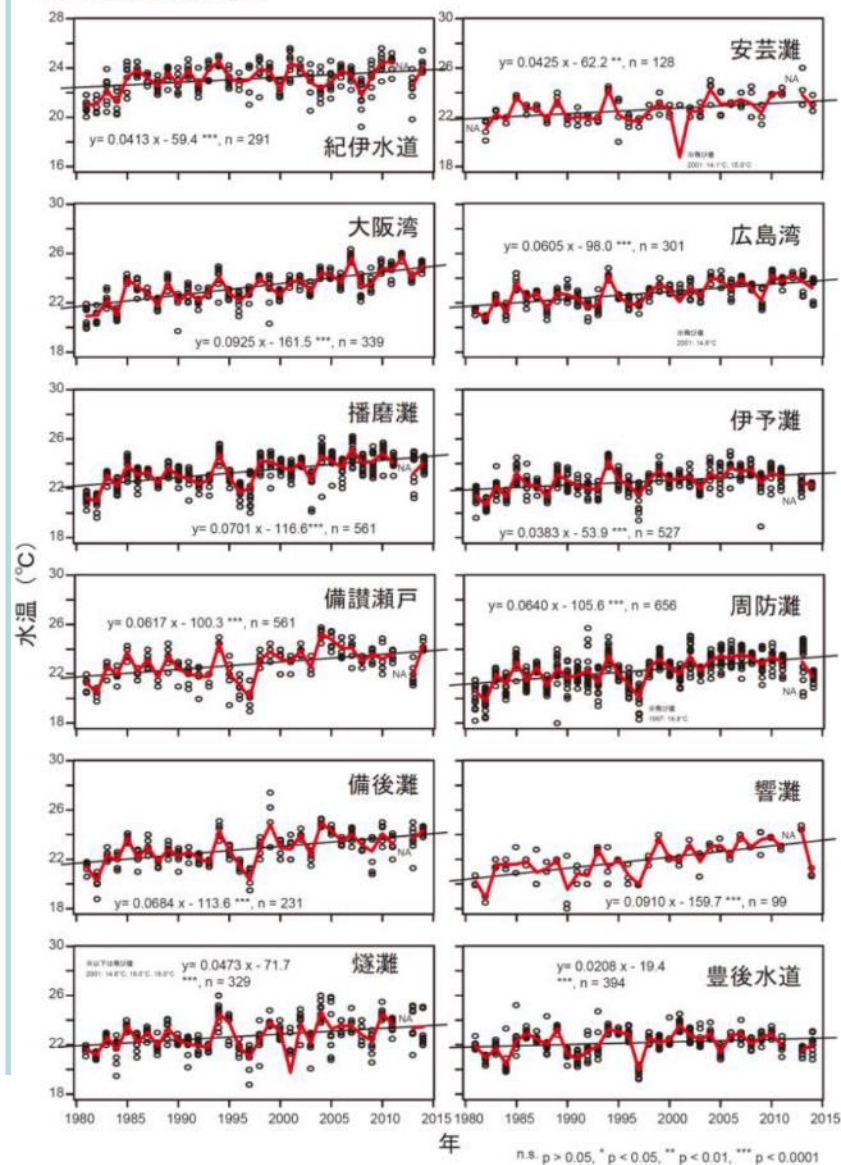
結果：瀬戸内海における底層水温の経年変動（1980～2010年代）

多くの海域で底層水温が有意に上昇

1月の底層水温



10月の底層水温



結果: 底層水温の経年変化速度(°C /年)

- ・10月の上昇速度が最大(大阪湾、播磨灘、響灘で大)
- ・上昇はほとんどの海域・季節に及ぶ

海域	底層水温の経年変化速度($\Delta^{\circ}\text{C yr}^{-1}$)			
	1月 ^a	5月 ^a	7月 ^a	10月 ^a
紀伊水道	0.0440	0.0289	-0.0294	0.0413
大阪湾	0.0490	n.s.	0.0200	0.0925
播磨灘	0.0210	0.0188	0.0179	0.0701
備讃瀬戸	0.0149	n.s.	n.s.	0.0617
備後灘	0.0154	n.s.	n.s.	0.0684
燧灘	0.0207	0.0308	0.0254	0.0473
安芸灘	n.s.	0.0359	0.0252	0.0425
広島湾	0.0284	0.0240	n.s.	0.0605
伊予灘	0.0133	0.0197	0.0163	0.0383
周防灘	0.0359	n.s.	n.s.	0.0640
響灘	0.0507	n.s.	n.s.	0.0910
豊後水道	0.0146	0.0182	0.0178	0.0208
全海域平均	0.0280	0.0252	0.0133	0.0582

^a 広域総合水質調査、

赤字: 変化速度の上位2海域、青字: 変化速度が負の海域。

結果：底生動物密度・多様性の時空間変動（1990・2000・2010年代）

- ・多くの海域で密度・多様性ともに増加（図h；暖色系の海域）
- ・海峡・瀬戸地形の海域がホットスポット

底生動物密度

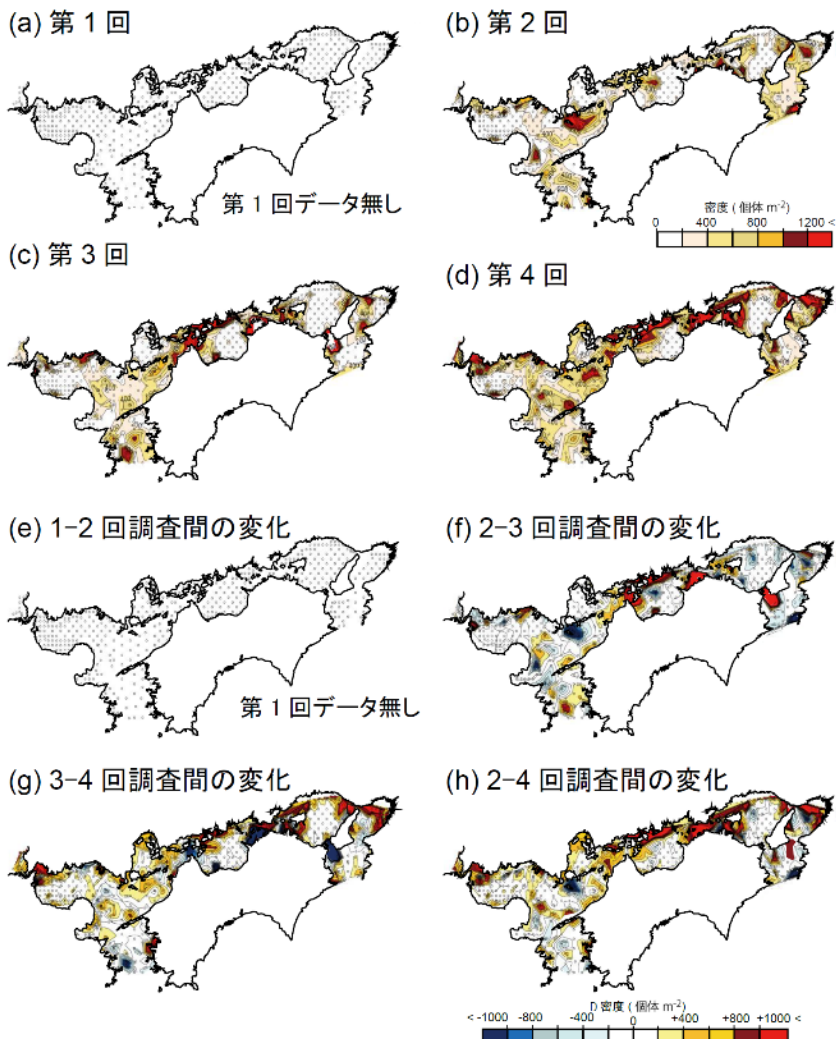


図 B-17-1 その1 第2~4回基本調査における底生動物密度の空間分布(a~d)と回次間変化(e~h)

底生動物 Taxa 数

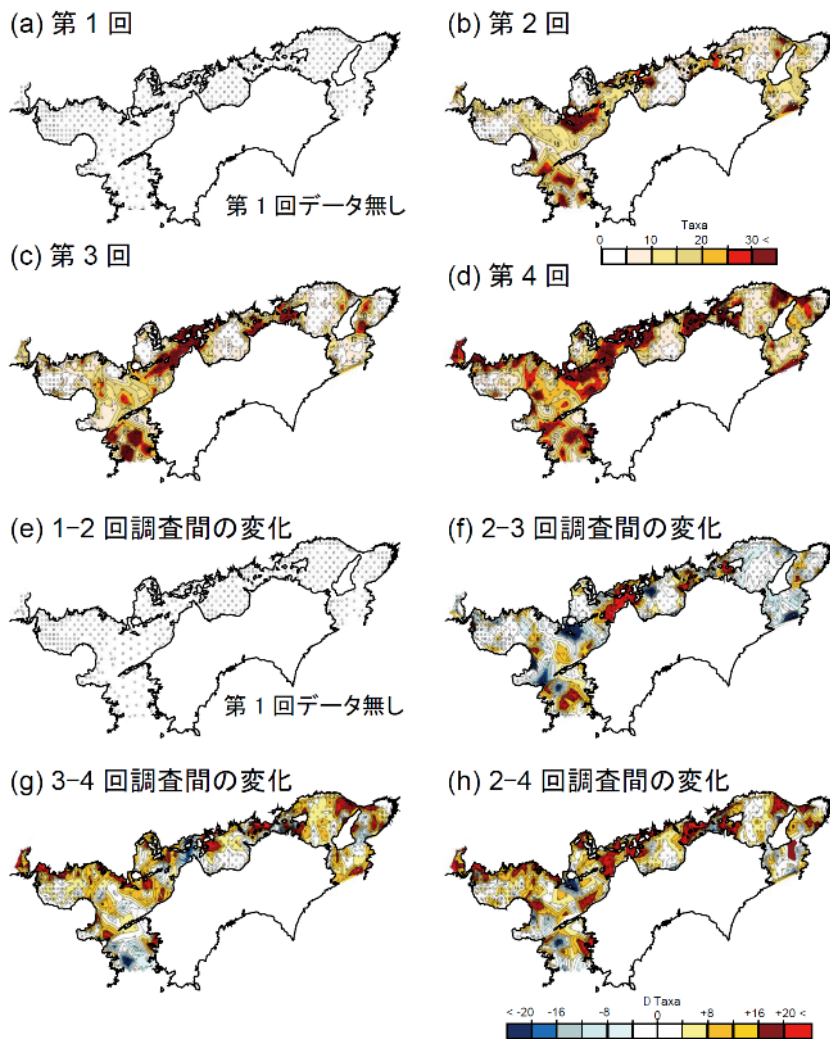
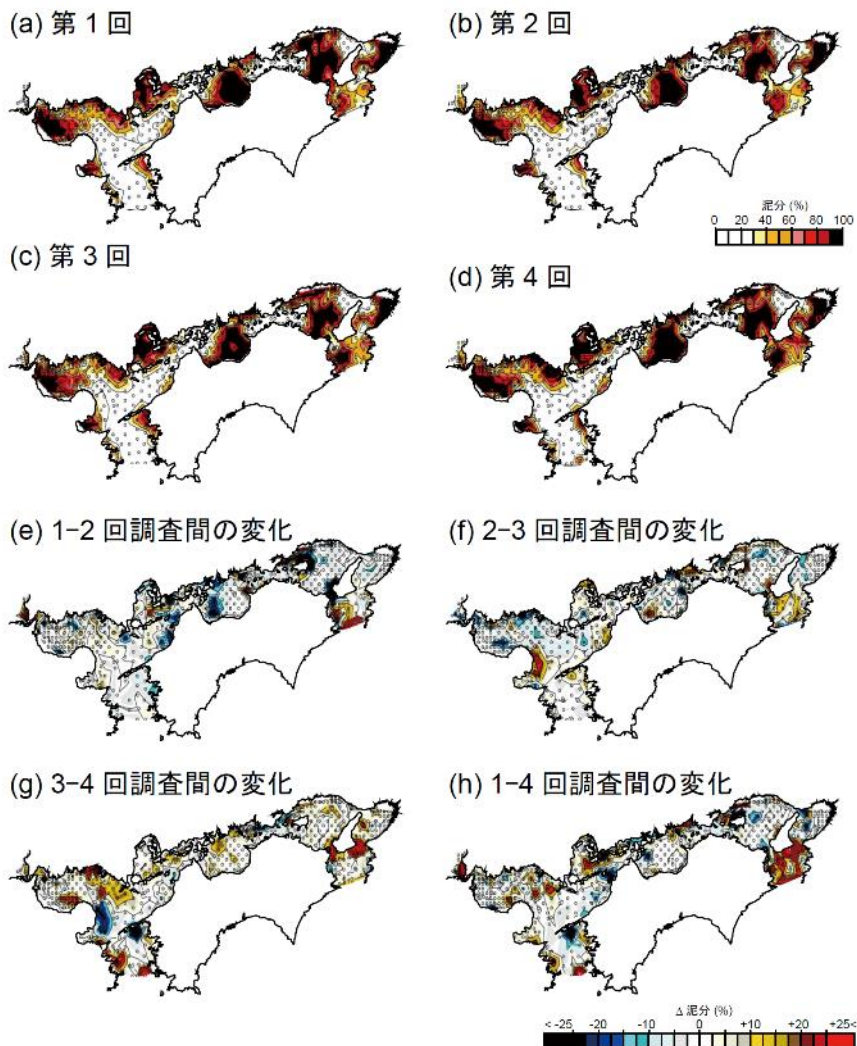


図 B-17-2 その2 第2~4回基本調査における底生動物 Taxa 数の空間分布(a~d)と回次間変化(e~h)

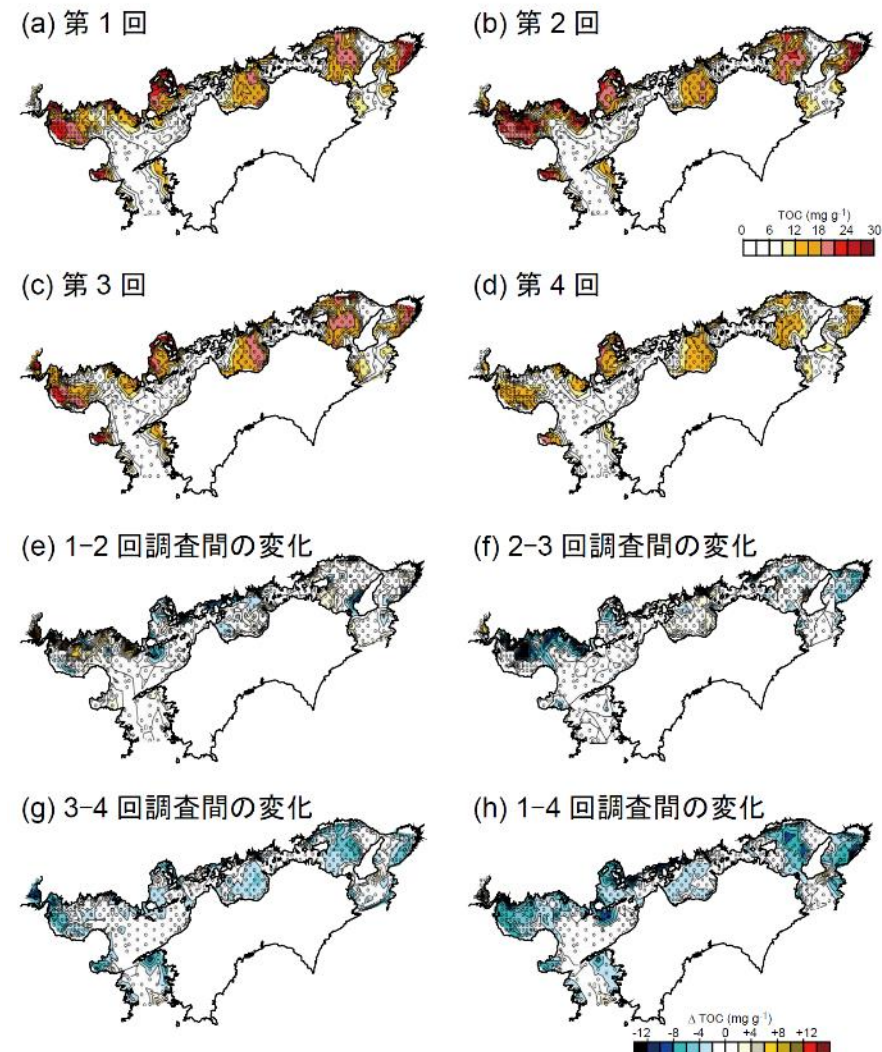
結果：泥分・底質TOCの時空間変動（1990・2000・2010年代）

- ・泥分の経年変化は小さく、傾向も見いだしがたい
- ・多くの海域で底質TOCが 4 mg g^{-1} 以上低下（右下のh；水色）

泥分 (< $\phi 0.063\text{mm}$)

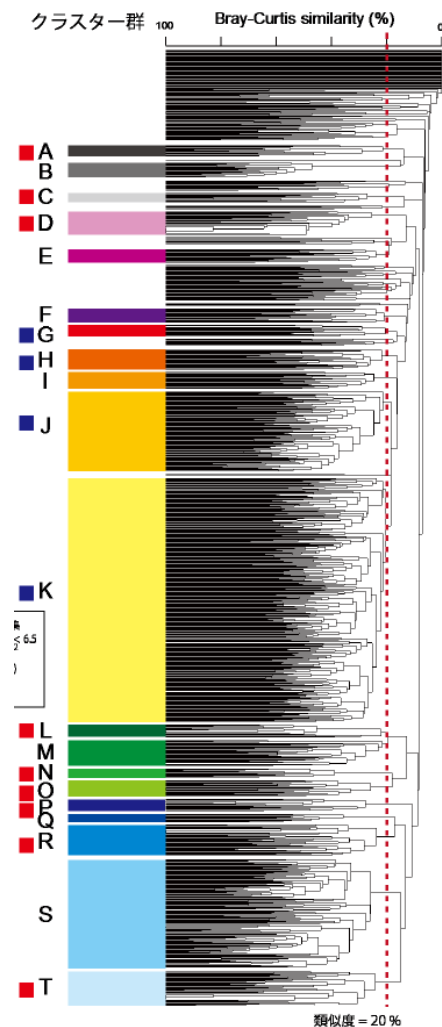


底質の TOC 含量



結果：クラスター解析による群集構造の類別化

425地点3回分の地点データによる
クラスター解析



「似た群集タイプ」で色分け



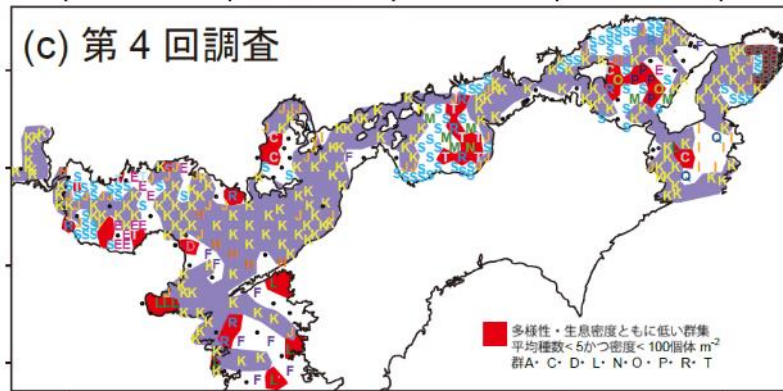
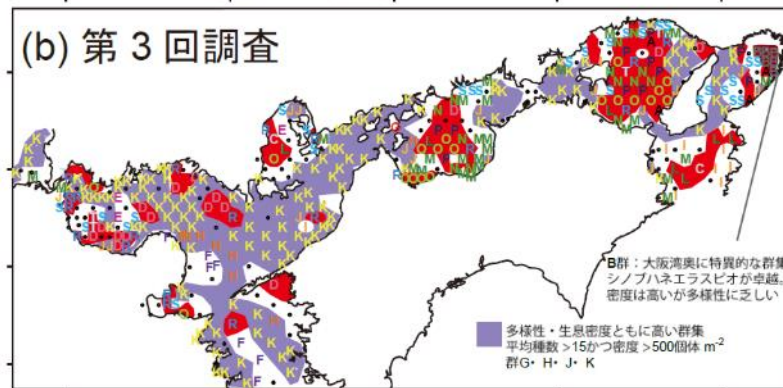
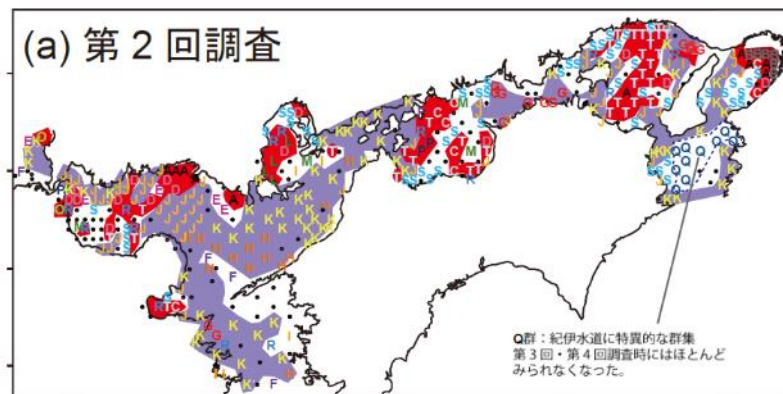
赤：密度・多様性低
紫：密度・多様性高

・「赤」が減り「紫」が増加

・「赤」：底質TOCが高い
海域の群集

・「紫」：泥分・底質TOC
の低い海域の群集

→経年的な底質TOCの
低下と良く対応

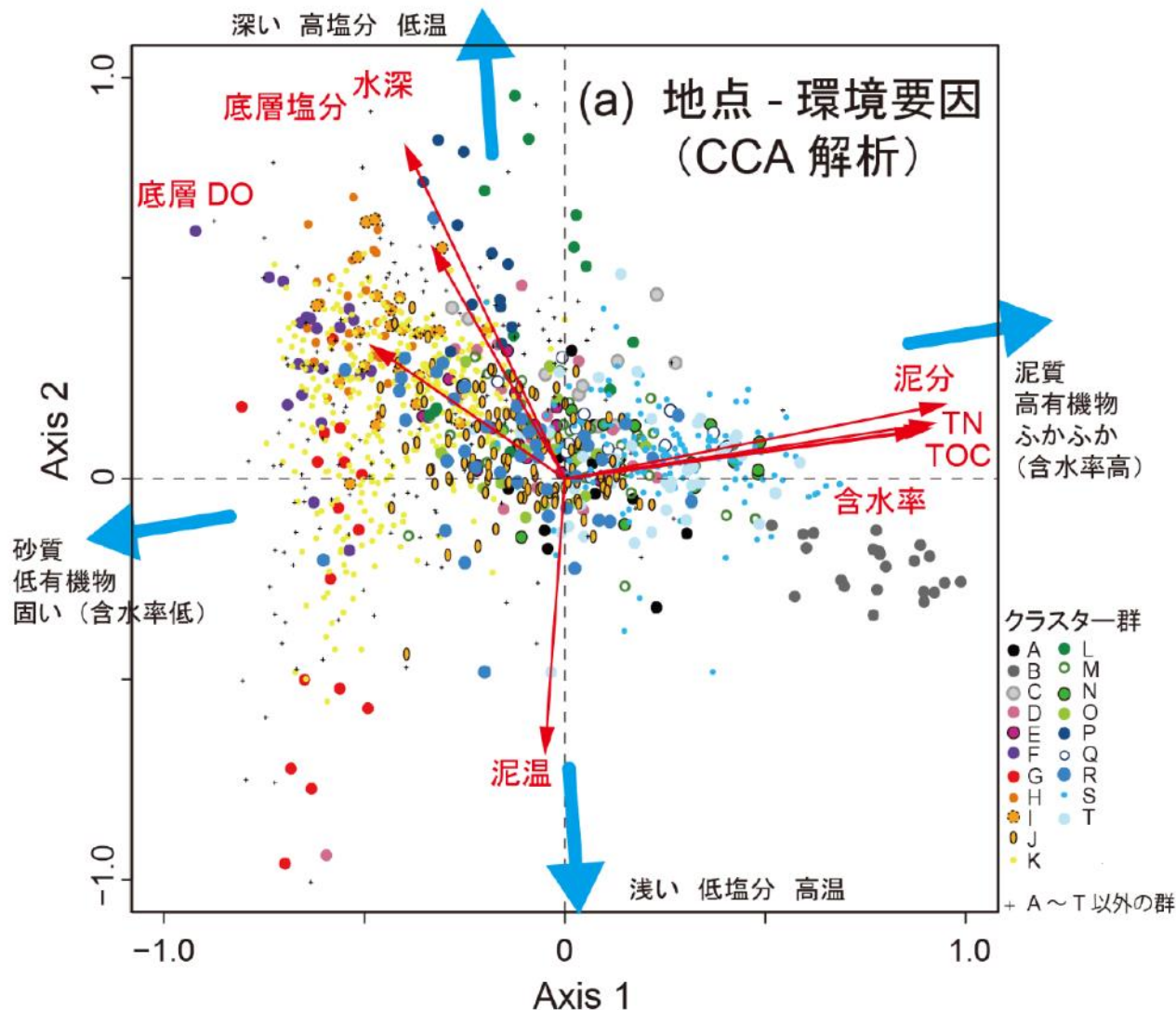


結果：ベントスの分布と環境要因(CCA解析)－底質 vs 温度・水深

- ・Axis1は底質環境、Axis 2は水温・水深環境を示す
- ・各点(調査地点)を、クラスター解析で定義された群集(群A～T)毎に塗り分けた
- ・各群は両Axisに沿って、空間的に良く区別されて配置

(1) 底質(≡Axis1)
(粒度・有機物含量)
(2) 水深・水温(≡Axis2)

が瀬戸内海の底生動物
群集構造を規定している
2つの要因



結果：CCA解析からクラスタ一群と環境因子の対応を読み解く

(b) : 密度・多様性高い群集

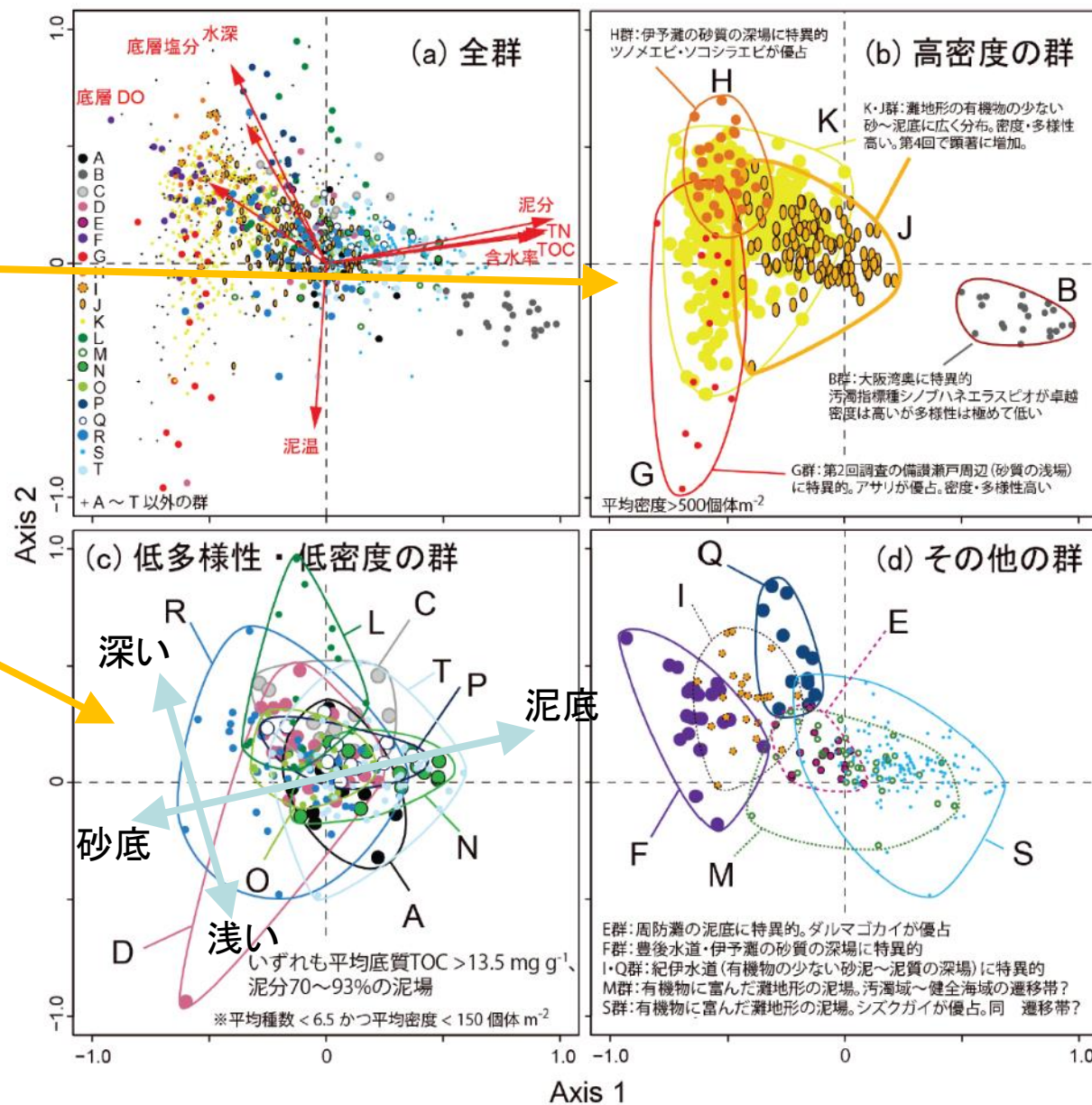
(※B群は汚濁指標種が卓越。多様性低)

→ 深い / 浅い砂底

→ 低有機物の泥底

(c) : 密度・多様性低い群集

→ 高有機物の泥底



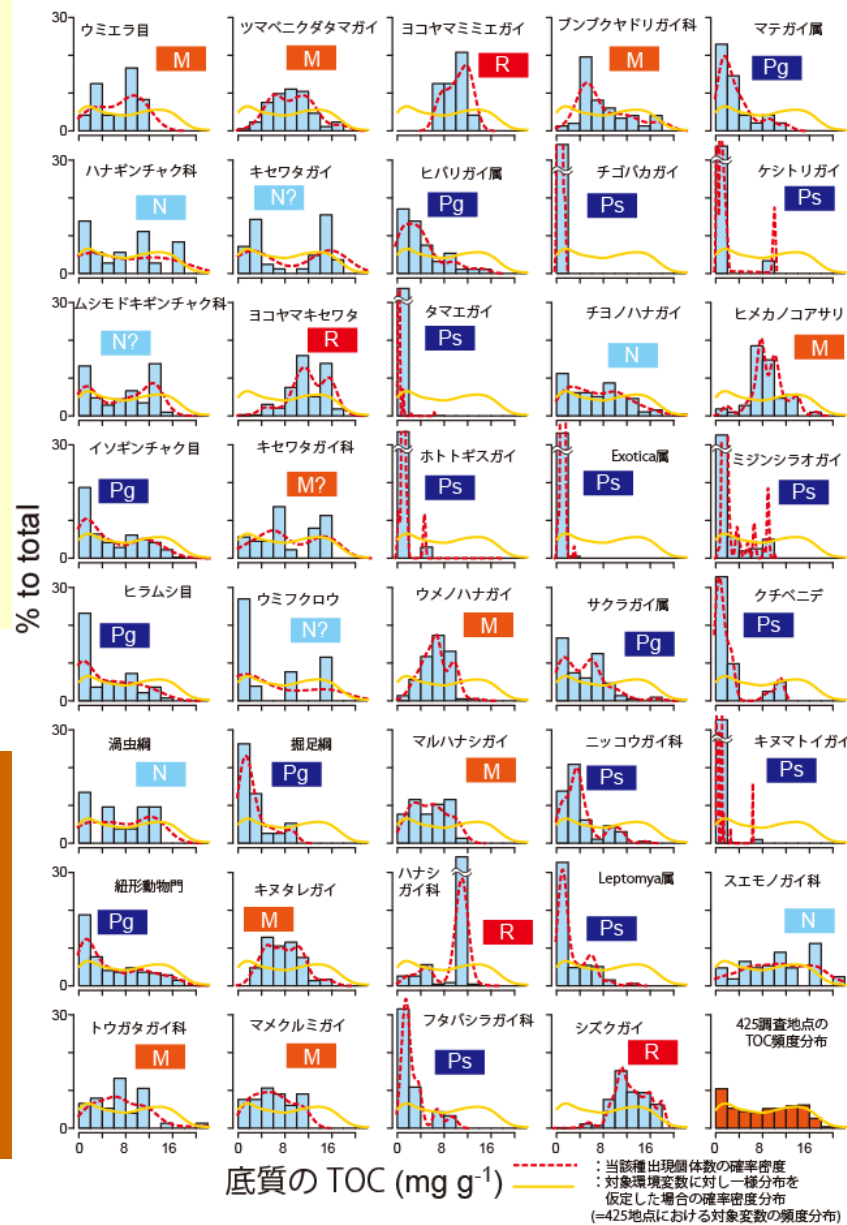
結果: ベントス種(193種)の環境選好性を読み解く

- ・横軸に環境変数、縦軸に**ベントス種の出現頻度**をプロットしたヒストグラムを作成
- ・「黄線」: 当該変数に対して「均等に」分布した場合の**確率密度関数**
- ・「赤線」≒「黄線」であれば当該変数への**選好性無**
- ・解析は193種を対象に、**泥分、底質TOC、水深、泥温**のそれぞれについて実施



- ・多くが特定の泥分と底質TOCへ**選好性**
- ・泥分よりも底質TOCの変化により**鋭敏**
- ・泥温と水深に対しては、多くの種が**明瞭な選好性を示さなかった**

底質 TOC に対するベントス種の出現頻度分布と確率密度 - 第4回基本調査その1



結果のまとめ

- ・底層水温は経年的に上昇。上昇速度は10月が最大(全海区平均: +0.0582°C yr⁻¹)
- ・1990~2010年代に底生動物の多様性と密度は増加。群集構造も変化
→底質TOC・TNの低下が要因の1つと推定
- ・底生動物の分布は泥分と底質TOCに良く対応
→底質TOCにより鋭敏に応答する種が多い
→泥温と水深による影響は小さい
- ・気候変動に伴う底層水温上昇の影響は？
→浅海性の埋在ベントスの多くは、高水温に対して耐性を有するため、
致死的作用よりも生活史、繁殖、成長、二次生産などへの影響が大と予想
→藻場、サンゴ、南方系魚類等に対しては生育の可否に関わる影響
- ・気候変動に伴う底質環境変動(特に底質有機物)の影響は？
→豪雨出水等による底質変化は埋在ベントスの分布や密度に顕著な
影響をもたらす可能性が高いと推定

瀬戸内海のこれから—今後に向けた考察と課題

プロセスA: 水温の上昇

プロセスAにともなって
起こりうる沿岸生態系の変化

水柱一次生産の低下?
(→底生一次生産の増加?)
貧酸素発生期間・頻度の変化
有機物分解速度の増加

プロセスA・Bが同時に生じると?

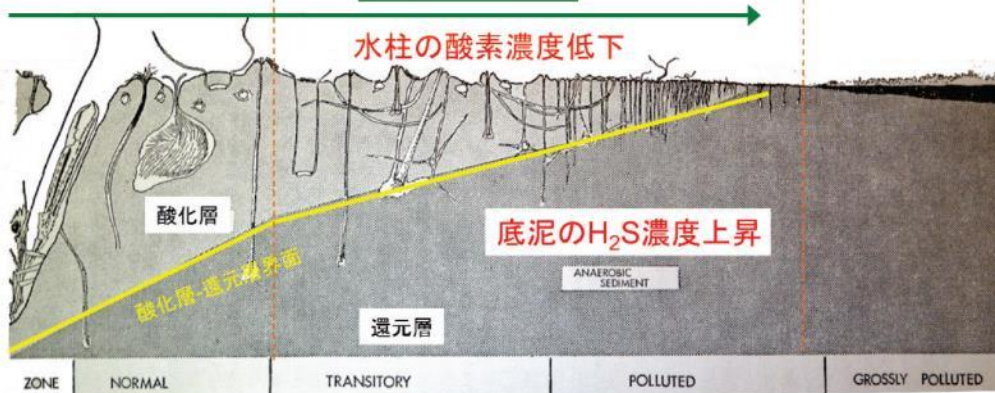
底生系-浮遊系相互作用の変化
(benthic-pelagic coupling)
食物網構造の変化
(底生食物網の寄与が増加?)
底質環境はどう変わる?
貧酸素は?

有機汚濁の進行と底生動物群集の変化

多様性の高い群集

小型多毛類中心の
単純な生物群集。
種多様性の低下

無酸素・H₂S蓄積
無生物域



プロセスBにともなって
起こりうる沿岸生態系の変化

ベントス密度・多様性の回復
底魚資源(底生食物連鎖)の増加
底泥酸素消費の低下
栄養塩回帰速度(量)の変化

プロセスB: 底質環境の改善

瀬戸内海のこれから—今後の必要な方策・行うべき研究

■水質の保全及び管理、水産資源の持続的な利用の確保のために必要な研究

- **長期的な水質・底質・生物モニタリング**の継続・・・気候変動は数十年スケールで生じる
 - 20年分の「基本調査」は回数としてはまだ $n = 3$
 - 蓄積された調査データの共有(オープンサイエンス)・生物標本の有効活用
- 埋在性ベントスの回復がこれを**餌とする生物群にどう波及するのか**についての検討
 - 底生魚の資源量が増えているのか
- **水産有用種以外のベントスや魚**に関する生理生態的な知見の集積
 - 環境がどう変われば生物がどう応答するのかが、一部の種以外では不明

■共通して必要な考え方

- 生態系を構成する要素間の**つながりと相互作用**の理解・どこがどう変わるとどう帰結するか？
 - 水温変動、一次生産性、底生食物網 vs 浮遊系食物網、海藻・海草藻場、サンゴ、動物種の個体群特性・生活史・生理的耐性・・・
- 環境変動への生態系の応答は**閾值的、連続的、履歴効果**など多様である
 - すぐに効果は出ないかもしれないが、あるところではがらっと変わる可能性もある

ご清聴ありがとうございました

参考資料1:水温上昇による沿岸生態系への影響1(文献調査)

水温上昇にともなう影響	備考	文献
DO・硫化水素		
溶存酸素濃度の変化 濃度・飽和度の低下(-0.354 mg°C ⁻¹ 、-3.91 %°C ⁻¹)	総説 京浜運河での30ヶ月間の実測値	Doney et al. 2012 Kanaya et al. 2018
底泥酸素消費(SOD)の増加	英虞湾底泥、20~26°Cの室内実験	丸茂・横田 2012
水柱の酸素消費が約2.5倍に	大阪湾底泥、20°Cと25°Cの室内実験	丸茂・横田 2012
底泥H ₂ S濃度の上昇(+0.308 mM °C ⁻¹)	京浜運河での30ヶ月間の実測値	Kanaya et al. 2018
底泥中の硫酸還元活性上昇	チェサピーク湾での現地調査	Marvin-DiPasquale et al. 2003
生物の代謝・耐性		
酵素活性の高まり	総説	Kordas et al. 2012
魚類、甲殻類における酸素消費量の増加	総説	丸茂・横田 2012
底生動物における貧酸素耐性の低下	メタ解析	Vaquar-Sunyer and Duarte 2011
アサリ稚貝の24時間生存率が90%から17~40%へ低下	貧酸素+H ₂ S、20°Cと28°C	Kodama et al. 2018
生活史・繁殖・成長・二次生産		
ウニ胚の卵割阻害。20→24°Cで40%、20→26°Cで60%が阻害	室内実験	Byrne et al. 2009
ベントスの二次生産と生産性/生物量比(P/B)の増加	メタ解析	Cusson and Bourget 2005
クロアワビを12月から20°Cで飼育したところ4月に成熟	室内飼育、通常の産卵期は10月	水研セ 2014
ヨコエビ <i>Corophium voltator</i> が年1世代から2世代へ	ヨーロッパ、現地調査	Wilson Jr. and Parker 1996
低温年にはイカナゴの産卵期が2回(寒仔・春仔)みられる	瀬戸内海	井上 1967
夏期高水温がイカナゴの加入量に負の影響	瀬戸内海	日下部ら 1997
浮遊幼生期間と分散距離の短縮、浮遊幼生期の死亡率低下	総説	Hoegh-Guildberg et al. 2010
瀬戸内海における南方系魚種イラの繁殖・再生産	総説	重田 2008
アサリの繁殖回数が年1回から年2回へ	現地調査と文献調査	Kanzawa and Sato 2007
アサリの日成長速度と水温に正の相関(<20°Cの範囲で)	現地調査	Kanzawa and Sato 2007
ハマグリの日成長速度と水温に正の相関	現場飼育	中村ら 2009
ハマグリ生殖腺発達	現地調査	Nakamura et al. 2010
バルチックシラトリガイ。春の繁殖時期の早まり、産卵数の減少による加入量変化。水温は他の二枚貝(ヨーロッパザルガイ、オオノガイ、ヨーロッパイガイ)の個体群動態も規定。	ワッデ海、1973~2001年の現地調査	Philippart et al. 2003
熱波による底生二次生産の低下(サギガイモドキの減少)	ポルトガルの河口域。現地調査	Dolbeth et al. 2011
個体の成長速度、個体群の成長速度の増加	総説	Kordas et al. 2012

参考資料2:水温上昇による沿岸生態系への影響2(文献調査)

水温上昇にともなう影響	備考	文献
捕食圧・摂食量・種間競争		
ガンガゼ→アサメの植食圧増大	29℃で最大、14℃で最小、水槽試験	海生研 2012
ガンガゼ→海藻の植食圧増大	13~27℃で高温ほど大、文献調査	海生研 2012
アイゴ→海藻の植食圧増大	29℃で最大、14℃で最小、水槽試験	海生研 2012
アイゴ、ブダイ、イスズミ→海藻クロメへの植食圧増大	28℃で最大、19~14℃で最小、水槽試験	桐山ら 2001
水温低下によるアイゴ→海藻の摂食停止	14~17.5℃で停止、文献調査	海生研 2012
海域の群集レベルでの種間相互作用の変化	総説	Kordas et al. 2012
熱帯海域では捕食による多様性決定作用が温帯域より卓越	緯度間での野外操作実験	Freestone et al. 2011
岩礁付着群集における捕食圧の高まり	野外操作実験	Haley 2011
藻場での植食圧増加、海藻の衰退、無節サンゴモの増加	総説	Haley et al. 2012
群集・生態系構造		
海域の群集・生態系レベルでの機能や相互作用の変化	総説	Doney et al. 2012
例:海水温、海洋循環、成層状態の変化。死亡、浮遊分散過程や種間相互作用の変化がもたらす個体群レベルでの変化。これらは特に極地や熱帯域で顕著。		
地中海での群集・生態系レベルでの機能や相互作用の変化	総説	Lejeune et al. 2010
ベントスの密度・多様性の増加/減少(pHにも依存)	メソコスム実験	Hale et al. 2011
長期的な水温上昇がベントス群集の経年変化を最もよく説明	バルト海北部、1964~2007年	Rousi et al. 2013
甲殻類の群集構造・分布域の変化	イギリス近海、30年間の比較	Henderson et al. 2011
低水温を好むベントス種の減少(群集中の1種のみ)	北海、1986年と2000年の比較	Kröncke et al. 2011
水温上昇に伴うベントス種分布域の変化	北海、1986年と2000年の比較	Hiddink et al. 2015
ベントス密度、種数、多様性及び南方種の増加	北海、1920s、1950s、1980sと2000sの比較	Kröncke 2011
水産有用種(魚、底生動物、海藻)の分布域・漁場の北上	日本沿岸、将来予測	桑原ら 2006
成層強化による下層からの栄養塩供給低下、一次生産減	将来予測	水研セ 2014
動物プランクトン密度の増加による植物プランクトンの量、密度と植物プランクトン由来有機物の沈降量の低下。及びこれらに起因する炭素フローの変化。+3℃	アメリカ・ナラガンセット湾、メソコスム実験	Keller et al. 1999
春のブルーム時期の早まり、捕食圧増大による植物プランクトン量の減少、細胞小型化、群集構造変化(大型珪藻の減少、越冬性の動物プランクトンから晩春-夏種への置換)	バルト海、+6℃メソコスム実験	Lewandowska and Sommer 1999
海域表層で植物プランクトンのDIC取込みが31%増加。POCとDOCの存在割合の変化(DOCが蓄積)。炭素沈降量の低下。有機物の高次捕食者への移送効率の低下	バルト海、メソコスム実験。+2~+6℃	Wohlers et al. 2009
浮遊系生態系の植物プランクトン量と全バイオマスの低下、ピコ植物プランクトンの増加、一方で動物プランクトン量と微生物量の増加。これらは栄養塩添加条件下で顕著	総説	Hoegh-Guildberg et al. 2010
1990年代後半に熱帯性有毒渦鞭毛藻を新たに確認	瀬戸内海、1997年以降	水研セ 2014
岩礁性ベントスの多様性へ負の作用(高水温・低水温とも)	ノルウェー沿岸、1990~2010年	Norderhaug et al. 2015
岩礁付着群集における帯状分布変化(下方へ)	長期野外調査	Haley 2011
海藻群集の変化。「四季藻場」から「春藻場へ」。南方種出現	九州沿岸、200年代以降	長崎県水産部 2012
サンゴ群落の北上、ミドリイガイの出現、養殖コンブ減少	愛媛県宇和海	鈴木・竹内 2007