

沿岸域における酸性化と貧酸素化の特徴： 私たちに何ができるか？

小笠恒夫（水産研究・教育機構）

2023年12月23日 サステナビリティ学講座Vol.10 「最新研究からみた志津川湾の今と未来」 講演資料

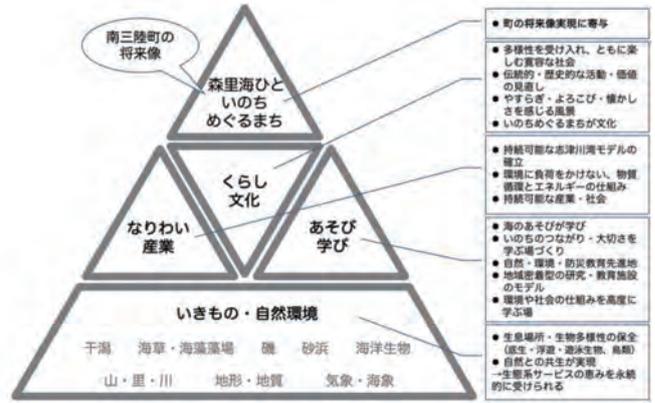


図6 志津川湾保全・活用計画の目標

[令和4年 志津川湾保全・活用計画から抜粋]

「志津川湾保全・活用計画」
の中でも...

○目標とする姿		
いきもの・自然環境		
1 自然との共生が実現している		
達成項目	具体的な内容	評価指標
1-1 まちの距離感・規模感を生かした先進的取り組みが行われている	ワイズユースモデルの実現	ワイズユース事例の収集・創出数
	1-2 流域のつながりを重視した一体的な保全策が機能している	海岸のゴミ拾い 環境調査の継続実施
1-3 海草藻場・海藻場の面的な保全	海草藻場・海藻場のモニタリング	藻場の面積、二酸化炭素吸収量の評価
1-4 環境を守り生かすグリーンインフラが主流になっている	復旧工事の影響評価、あるべき姿の議論	自然再生実施件数
	復興工事などで失われた自然（干潟、塩性湿地、ヨシ原、藻場など）の再生 小さな自然再生の実施	
1-5 養殖に適した漁場がある	環境調査の継続実施	貧酸素水域発生状況
1-6 環境に配慮した持続可能な漁業が当たり前になっている	漁業における湾の適正利用	ASC 認証の継続・範囲拡大 漁業者による環境に配慮した活動
1-7 プラゴミ、汚染が減少している	漁業系ゴミの削減・流出防止策	漂着ゴミの量
1-8 山と海の関係がより良くなっている	適切に管理された森林面積の拡大 土砂流入を防ぐ適切な陸域管理	適切に管理された森林面積 山主や河川管理者との対話の機会
	川づくりへのグリーンインフラの導入努力	

3 持続可能な産業がある。持続可能な社会となっている		
達成項目	具体的な内容	評価指標
3-1 温暖化への適応がなされ、変化に対応し、たくましく生き抜く	海洋観測データ提供、解説・相談機会の提供、各種事業支援メニューの紹介等による各社の取り組み支援	データ提供体制、相談機会の有無
		温度管理で既存の特産品残す 新しい手法へのシフトチェンジと新たな特産品の創造 陸上養殖も含めた適切な養殖技術が開発されている
3-2 漁業者が希望を持って生計を立てられる	漁業者の収益診断や漁獲物のブランド化支援 後継者育成支援	漁業者の事業収支 漁業従事者数と年齢構成
3-3 若者が地域に定着し、次世代育成が図られている	生まれ育った土地に自信と誇りを持って学校教育カリキュラム導入推進	新規就労者、Iターン、Uターン者数
	共生の思想と実行力を持った人材育成プログラムの開発・実施 大学生の地域インターンシップ導入などによる、若者が働きたい職場への変革支援	人材育成プログラム実施数
3-4 FSC®認証が浸透している	南三陸には何があるか、自信を持って伝えるための取り組み紹介機会の増加	町内の認証林面積、認証事業者、認証製品の数
	FM 認証、CoC 認証事業者数の増加、認証林面積の拡大促進政策の維持	
3-5 ASC 認証が浸透している	認証取得養殖場、CoC 認証事業者数の増加のための支援策	認証を受けた養殖場面積、認証事業者、認証製品の数
3-6 志津川湾を起点とした持続可能な産業がある	事業構築支援	支援した産業の経済効果

気仙沼水産試験場さんによる志津川湾の長期水質モニタリング (公共用水域水質調査)



志津川湾水質分析結果概要

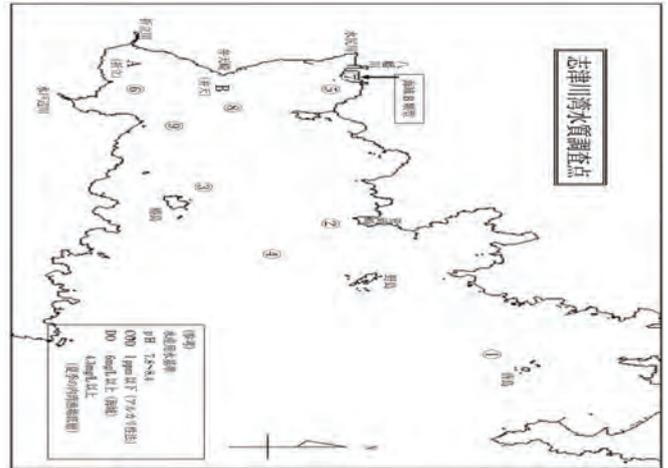
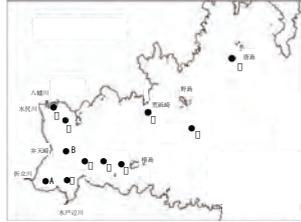
○調査日時 令和5年11月2日

○概要

- 1) 水温：表層で18.8～20.8℃、底層で18.7～20.4℃の範囲にあった。
- 2) 塩分：表層で33.4～34.1、底層で33.4～34.1の範囲にあった。
- 3) pH：7.90～8.11の範囲にあり、全点で水産用水基準(7.8～8.4)を満たしていた。
- 4) COD：0.3～0.8 mg/Lの範囲にあり、全点で水産用水基準(閉鎖性内湾：2 mg/L以下)を満たしていた。
- 5) DO：6.0～7.4 mg/Lの範囲にあり、水産用水基準(6.0 mg/L以上)を上回った。
- 6) 無機栄養塩：各項目は以下の範囲内にあった。

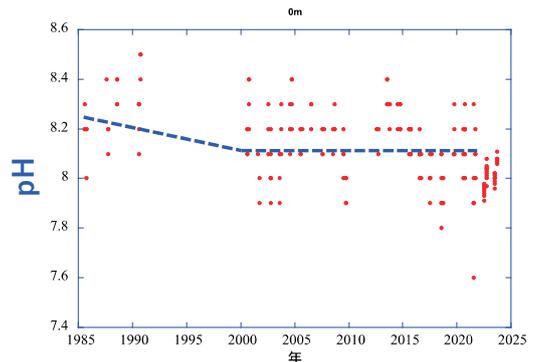
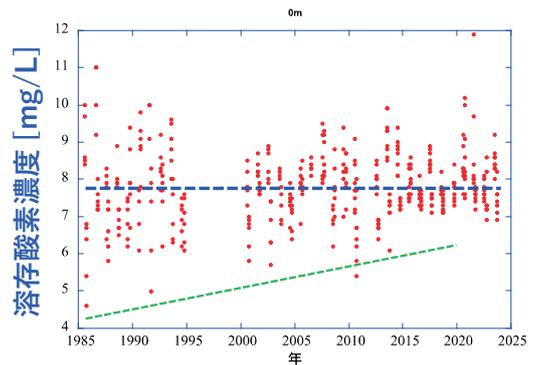
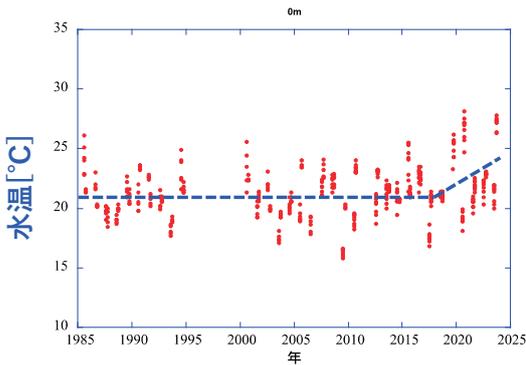
リン酸塩(P _o -P)	0.9～15.9 μg/L
アンモニア態窒素(NH ₄ -N)	3.6～27.4 μg/L
亜硝酸態窒素(NO ₂ -N)	0.4～4.8 μg/L
硝酸態窒素(NO ₃ -N)	0.1未満～42.4 μg/L
(三態窒素合計)	5.3～74.2 μg/L

※三態窒素とはアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素の合計です。



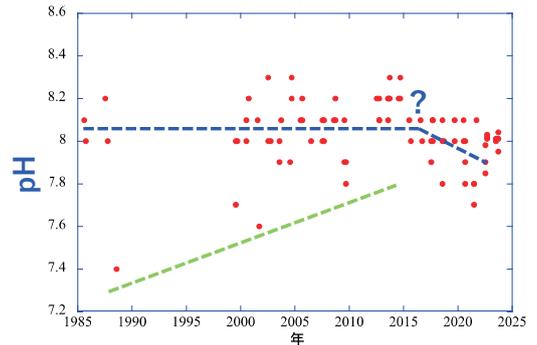
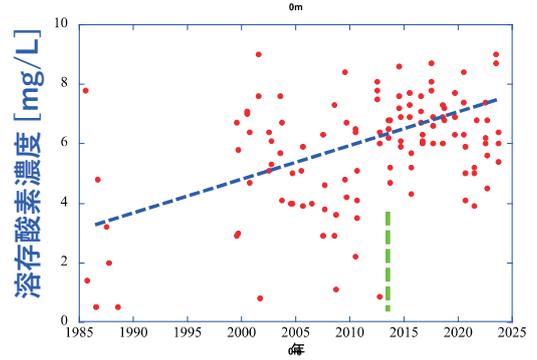
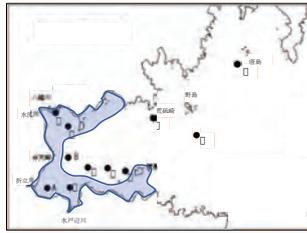
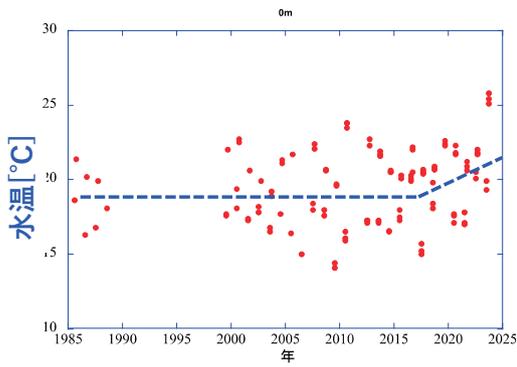
- 1985年から現在まで、2ヶ月おきに志津川湾の水質調査を実施。
- 調査結果を宮城県HPで公開(2010年以降)
- 「酸性化適応プロジェクト」による栄養塩採水調査のデータも、同じHP上で公開

気仙沼水産試験場による長期モニタリングの結果： 表層の水質変化 [7月-9月]



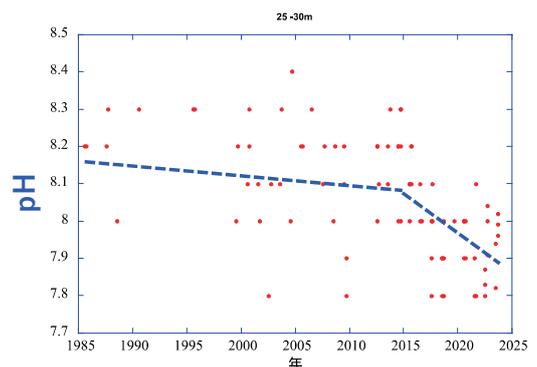
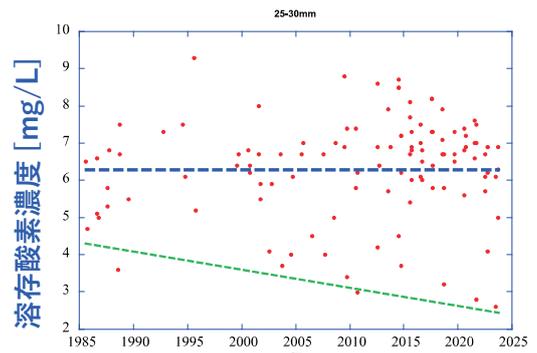
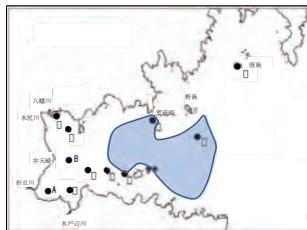
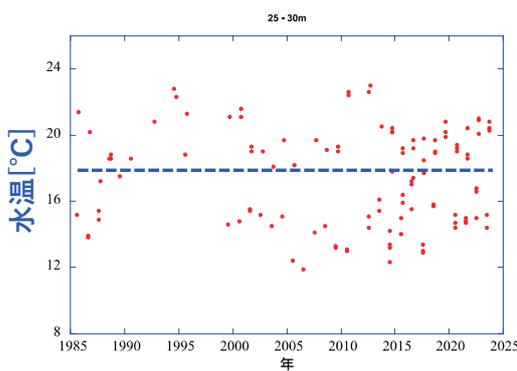
- 志津川湾の表面水温は2010年代の後半ごろから上昇気味？
- 溶存酸素濃度の平均的な値は変わらず。ただ、たまに出る低酸素濃度水塊の出現頻度が年々減少している。
- pHは2000年代以降は下がっていないようにみえる。

気仙沼水産試験場による長期モニタリングの結果：
底層(6-9m、湾奥)の水質変化 [7月-9月]



- ・水温の変化パターンは表面と同じ。
- ・溶存酸素濃度は急激に改善。
特に**2013年以降は4mg/L以下の水がほぼゼロ。**
- ・pHも、極端に低い値は出ないようにになっている。
しかし、**2015年ごろから平均値が低下傾向**
(水温上昇に対応?)

気仙沼水産試験場による長期モニタリングの結果：
底層(水深25m~30m、湾央)の水質変化 [7月-9月]

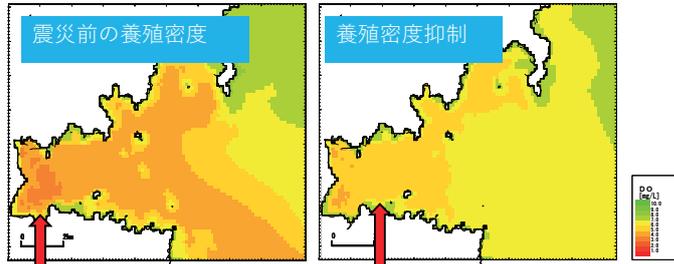


- ・深い底層では大きな水温変動なし。
- ・溶存酸素濃度の平均的な値は変わらず。
ただ、たまに出る**低酸素濃度水塊の出現頻度が増えている?**
- ・底層のpHも、**年々減少しているように見える。**
(特に2015年ごろ以降)

表層と湾奥の底層では、カキ養殖密度緩和などの努力が効果を奏している。

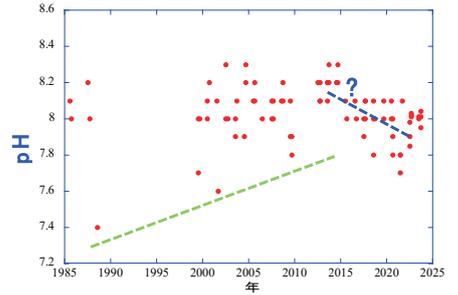
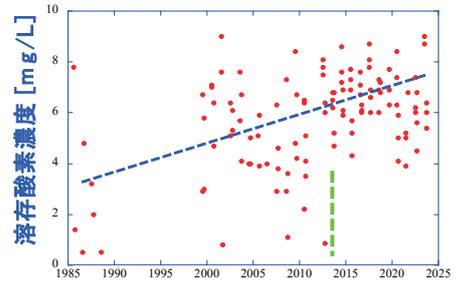


カキの養殖密度を変えたことによる
湾内酸素濃度の変化予測モデル
[環境総合推進費 S-13 最終報告書]

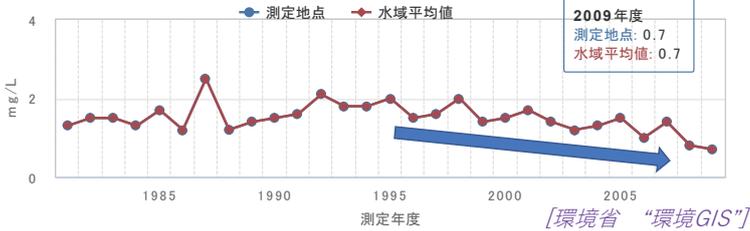


湾奥部の海底では
DOが4mg/Lを下回る

現在は、夏季でも海底付近のDOが
あまり低下しない → ASC認証

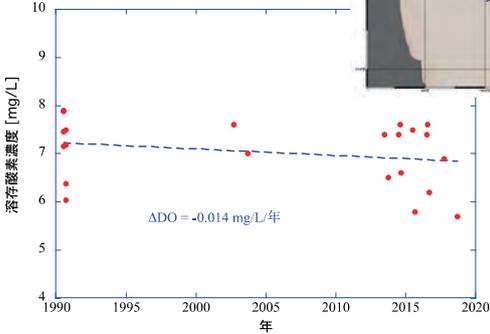


八幡川河口におけるCODの長期モニタリング結果



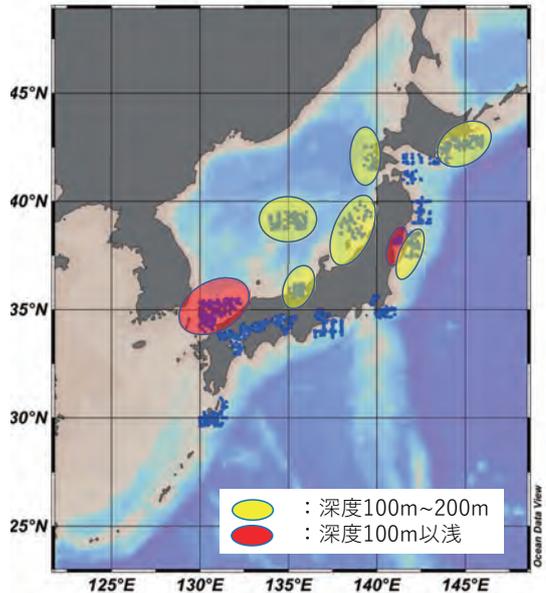
湾央では底層酸素濃度もpHも減少しているが、
実は仙台湾でも…日本の各地でも…

仙台湾の底層溶存酸素濃度
(水深40m) の経年変化



志津川湾では湾内の有機物負荷による貧酸素化は
解消傾向にあるが、その一方で
温暖化による外洋性の貧酸素化の影響が、湾央の
底層に現れ始めている可能性がある。

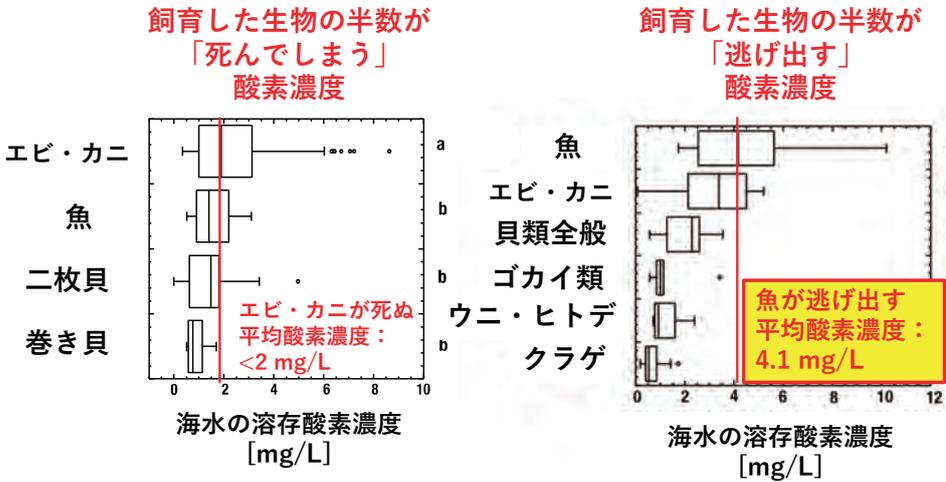
日本の沿岸の中で、200mよりも浅い水深で
溶存酸素濃度の低下が見られる海域



そもそも、酸素ってどのくらい必要なの？

世界中の飼育実験から推定された、
海洋生物の生物グループ別の酸素耐性

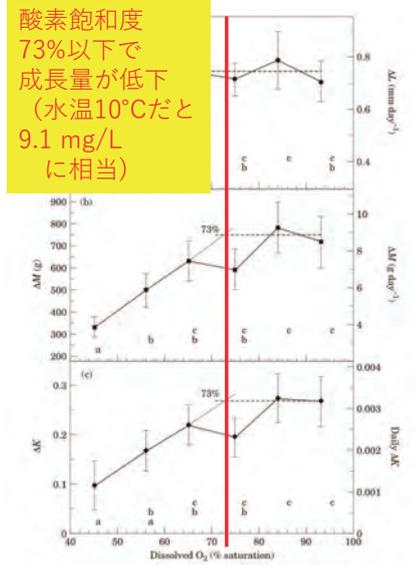
[Vaquer-Sunyer & Duarte, 2008]



夏場の湾中央の底層溶存酸素濃度は4.0 mg/L以下
魚にとっては少し居づらくなってるのかも…

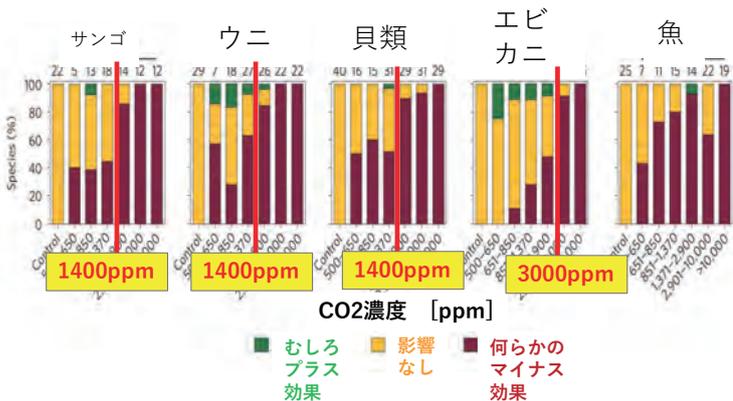
極端に弱い例：
大西洋タラの酸素飽和度に対する
成長量の変化

[Chabot & Dutil 1999]



pHはどのくらいの値が良いのか？

いろいろな動物グループが、どの程度のCO2濃度から
影響を受け始めるかをまとめたグラフ [IPCC第5次評価報告書]



貝もウニもサンゴも、CO2濃度が1400 ppmを超えると、影響の出る種の数が増える。
これは、pHで言うと7.7に相当 (志津川湾の場合) なので志津川湾の底層も、まだギリギリセーフ。

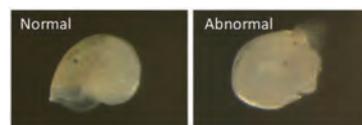
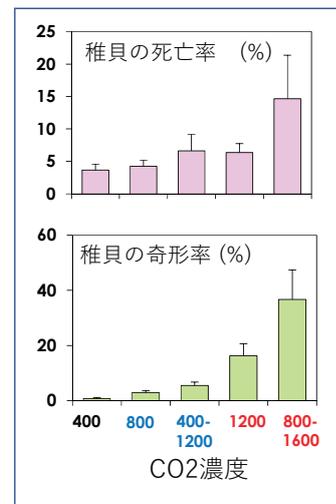
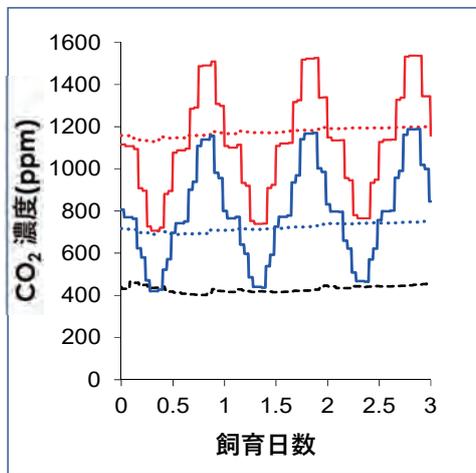
三陸周辺海域に生息する
磯根資源生物の
個別の酸性化耐性

生物種	影響が出るCO2濃度	アラゴナイト飽和度	pH	Reference
マガキ	1000ppm	1.5	7.8	Waldbusser et al. (2015)
エゾアワビ	1400ppm	1.1	7.7	Onitsuka et al. (2018)
エゾバフンウニ	570ppm	2.3	8.0 (ホントか?)	Foo et al. (2020)

ただし！

沿岸ではpHは短時間で大きく変動している。

人工的にCO₂濃度の日周変動を加えてエゾアワビの稚貝を飼育し、日周変動のない場合と比較する。[鬼塚他、2018]

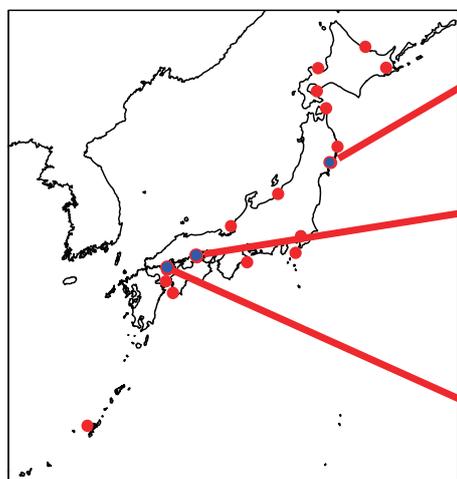


1日の平均CO₂濃度が同じでも、短期的にCO₂濃度が高くなる場合の方が生物への影響は大。
=>ごく短期間の酸性化でも問題になる可能性がある。

短期間の変動も含めた、詳しいpHの動態を知るためのpHモニタリング

NPO法人里海づくり研究会議/日本財団「海洋酸性化適応プロジェクト」による地先pH観測 (志津川・日生)

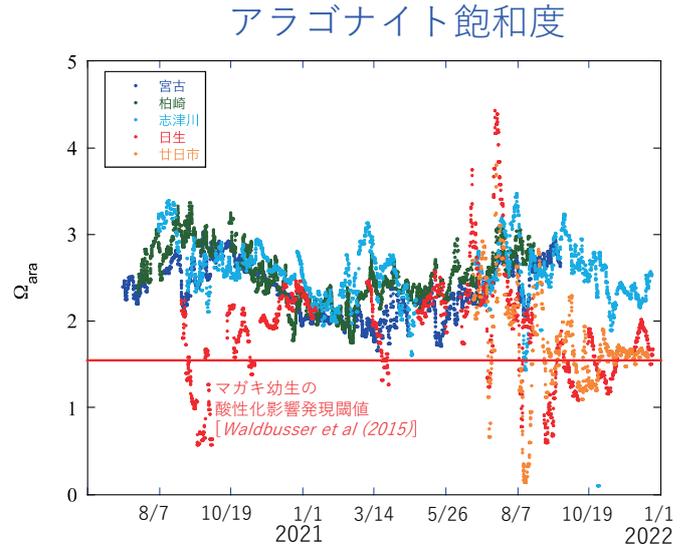
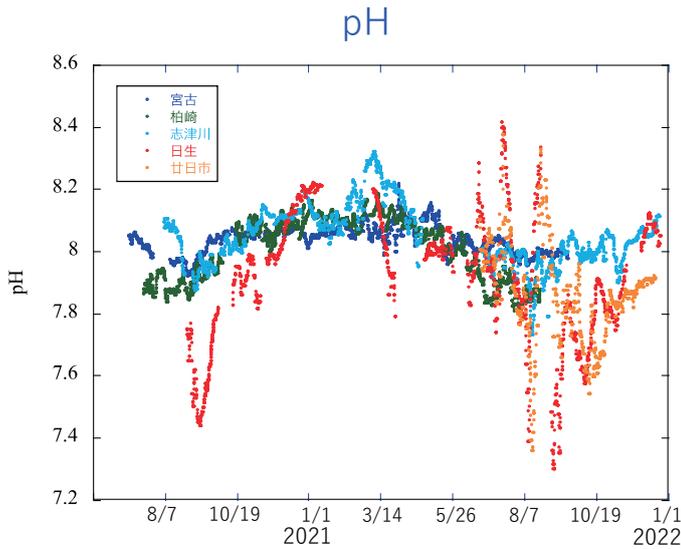
日本沿岸域で現在実施中のpH連続観測点



- ・志津川・日生の各海域において、4測点でT,S,DOの連続観測を実施 (係留水深1m)
- ・両湾でマガキ幼生の形態観察も実施
- ・2021年6月より、淡水の影響の強い海域の例として、広島県廿日市市地先での観測も開始

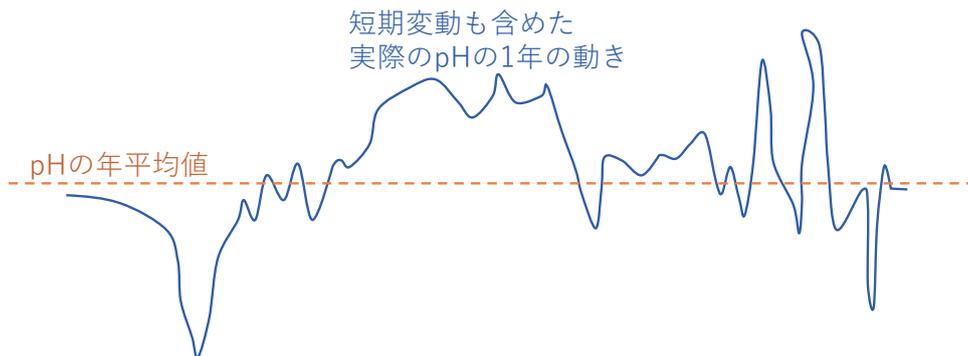


宮古・志津川・柏崎・日生・廿日市におけるpHの周年変化の比較



- ・三陸&北陸と瀬戸内で、pHやアラゴナイト飽和度の季節変動パターンが異なる。(特に秋の Ω_{ara})
- ・夏～秋の**スパイク的なpH低下イベント**は、程度の差はあっても5海域すべてで発生
- ・日生と廿日市では、このスパイク的なpH低下イベント時にアラゴナイト飽和度が1.5を下回ることがある。
(志津川でもちょっとだけ下回る日がある！)
- ・いまのところ、志津川でも日生でもマガキの幼生に奇形などの異常は見られていないが…

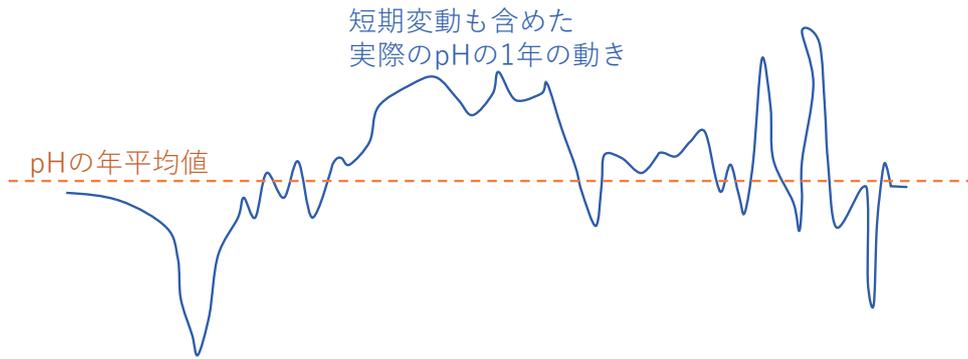
今はまだ大丈夫、でも将来海水のpHが下がっていくと.....



生物が健康でいられるpHの下限

2100年：
pHの年平均値そのものが
下限に到達する。

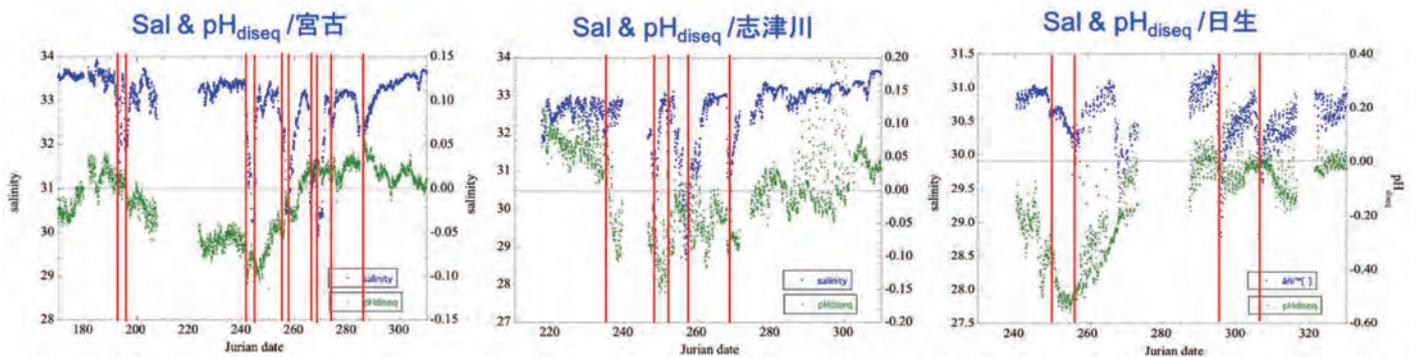
今はまだ大丈夫、でも将来海水のpHが下がっていくと.....



生物が健康でいられるpHの下限

- ・大気のコ₂濃度の増加により、**2100年**には、日本中の沿岸で生物に影響が出るレベルの酸性化が発生する。これを避けるためには世界中で**CO₂の排出量を減らす**とともに、**耐性のある品種への転換、陸上養殖への切り替え**等が必要
- ・富栄養化の影響の残る内湾では、**2100年よりかなり前**の段階で、有機物の分解による一時的な酸性化が危険レベルに達するようになる。
- ・この「有機物の分解による一時的な酸性化」の方は、何らかの方法で**短期的なpHの低下幅を抑える**ことができれば、回避できる可能性がある。

短期的なpHの低下イベントは、ほぼ全て降雨の後に起きている。



- ・9月の塩分低下イベントは、pH低下イベントを伴うことが多い
各イベントのpH低下幅は**0.03**程度
- ・塩分低下からpH低下開始まで数日のラグがある
- ・塩分の低下継続日数よりも、pHの低下継続日数の方が多い

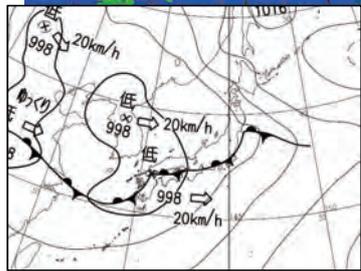
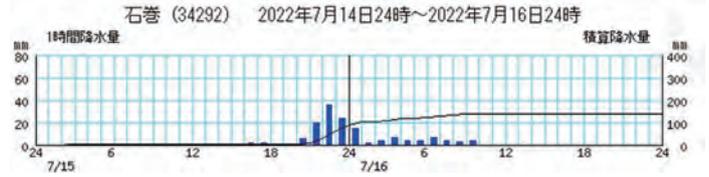
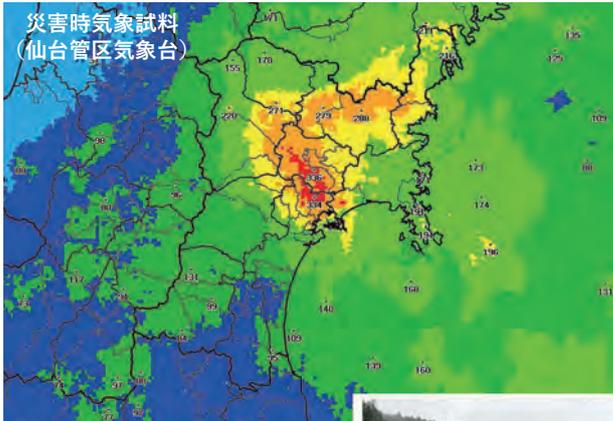
- ・ほぼ全ての塩分低下イベントがpHの低下イベントを伴う
各イベントのpH低下幅は**0.1**程度
- ・塩分低下からpH低下開始まで数日のラグがある
- ・塩分の低下継続日数よりも、pHの低下継続日数の方が多い

- ・塩分低下イベントの数日後にpHの低下イベントが発生。各イベントのpH低下幅は**0.1**くらい？
- ・9月中旬～10月初旬に3週間程度継続する低塩分イベントがあり、この時期にpHが**0.4**程度低下。

- ・**降雨に伴う塩分低下と連動して、数日～数週間スケールのpH低下イベントが発生するのは各点共通。**
しかし、**生物活動の規模と継続期間は各海域の環境条件により異なる。**

2022年7月豪雨時のpH集中観測

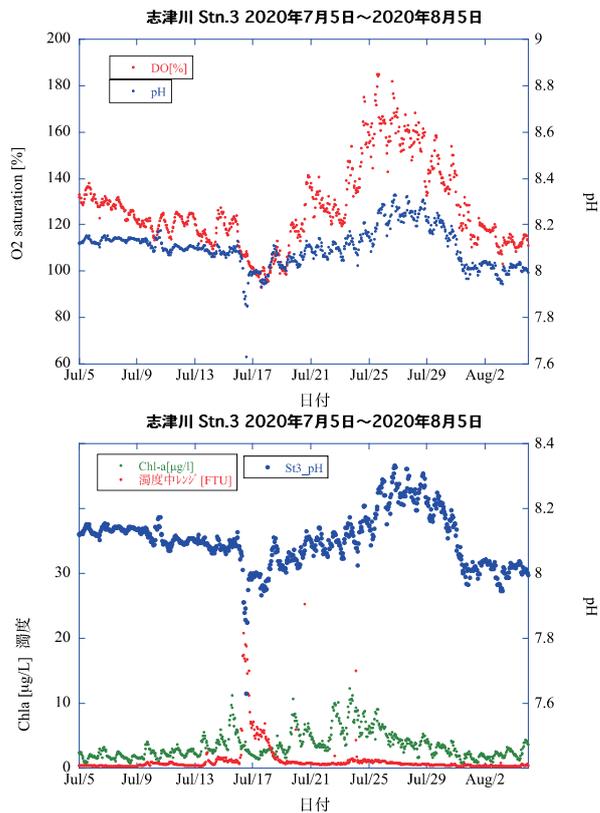
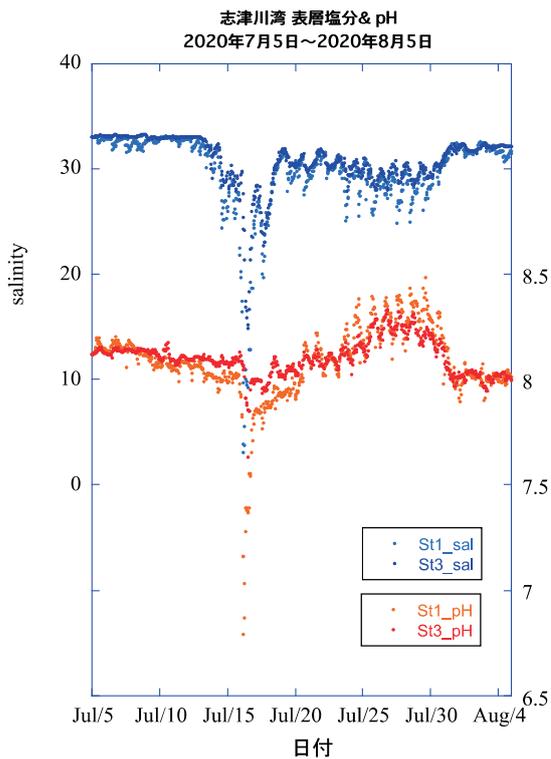
アメダス降水量（48時間積算）7月15日00時～7月16日24時



八幡川の水位上昇により陥没した国道398号=16日午前8時すぎ、宮城県南三陸町志津川駅前下 (原気仙沼土木事務所提供)

- 2022年7月15日から7月16日にちにかけて、宮城県域で集中豪雨が発生。
南三陸町でも二日間の積算雨量が149mmを記録。
国道破損等の様々な被害が発生。
- この降雨イベントの前後（7月11日/7月25日）にも、志津川湾定点S1, S3での鉛直・採水観測を実施していただいた。（ありがとうございました！）
また各定点のセンサーが、降水イベント時の海洋環境変化を1時間毎に記録。

大規模出水時の応答



*塩分低下からpHの低下まで、1日ほどのラグがある。

*pH低下時には濁度は上がるが、植物プランクトンは増えていない。

*pH低下時のDO飽和度は低下。

*低塩イベントの1週間後（7/24頃）に植物プランクトンが増殖
その後にDO飽和度とpHのピークが来る

=>出水時のpH低下は低塩分そのものや、河川水に溶けている栄養塩ではなく、川から来た有機物粒子が海で分解することで生じている!。

まとめ：志津川湾の貧酸素化と酸性化の対策として 私たちがいま、できること

- ・陸からのCOD負荷の減少や湾内での下記養殖密度の緩和などの努力によって、志津川湾の表層や湾奥の底層の酸素濃度とpHは、大きく改善されています。
- ・そのいっぽうで、温暖化に起因する外洋性の貧酸素化の影響が、湾中央の底層には現れ始めているようです。
- ・湾内の表層でも、降雨の後の数日～数週程度の間は、短期的にpHが低下していることがあります。これは、雨で増水した河川から陸由来の有機物が海に流れ込み、その有機物が湾内で分解する際にpHを下げていることが原因です。
- ・河口域に干潟や藻場、ヨシ原などを適切に造成することで、川から流れ込む有機物の量を安定化させ、降雨後の短期的なpHの低下を弱めることができるかもしれません。
- ・2100年ごろに到来すると思われる全面的な酸性化や、沖からやってくる外洋性の貧酸素化の影響をなくすためには、世界的なCO₂放出量の削減に取り組む必要があります。