

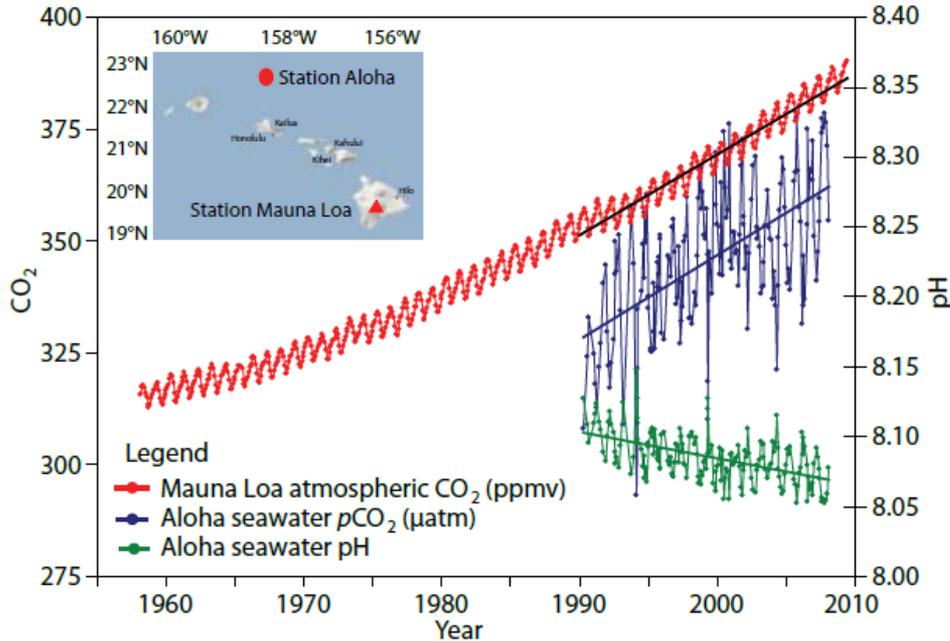
もうひとつの二酸化炭素問題—海洋酸性化

国立環境研究所 野尻幸宏



海洋酸性化

— 地球温暖化と同時に進行するCO₂問題 —



良く知られたハワイ・マウナロアでの大気CO₂増加(赤線)関数

それと呼応して海水中のpCO₂も上昇してきた(青線)

その結果、海水pHは低下、あるいは水素イオン濃度が増加(緑色)してきた

海洋酸性化とは？

CO₂は放射強制力(赤外吸収→物理)を介して気温上昇を起こすが、海洋酸性化はCO₂なる物質そのもの(化学)の問題である。大気にCO₂が加わると海水に溶解し、海水中で化学変化を起こす。この化学変化がもたらす現象を総じて海洋酸性化という。

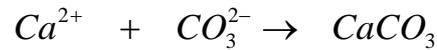
二酸化炭素を原因として温暖化と同時に進行する問題なので、「Other CO₂ problem」あるいは「Evil twin of climate change」として、世界の研究界から問題が提起されている。

EPOCA あるいはモナコ宣言 (Ocean in High CO₂ World II, 2008)

海洋酸性化

— 海水中のCO₂の化学変化と炭酸カルシウム —

人為的海洋酸性化は化石燃料消費・土地利用変化で大気CO₂が増加して起こる海洋の酸性化



$$\text{Saturation State } \Omega_{\text{phase}} = \frac{[Ca^{2+}][CO_3^{2-}]}{K_{sp, \text{phase}}}$$

減る

$\Omega < 1$ 炭酸カルシウムの溶解

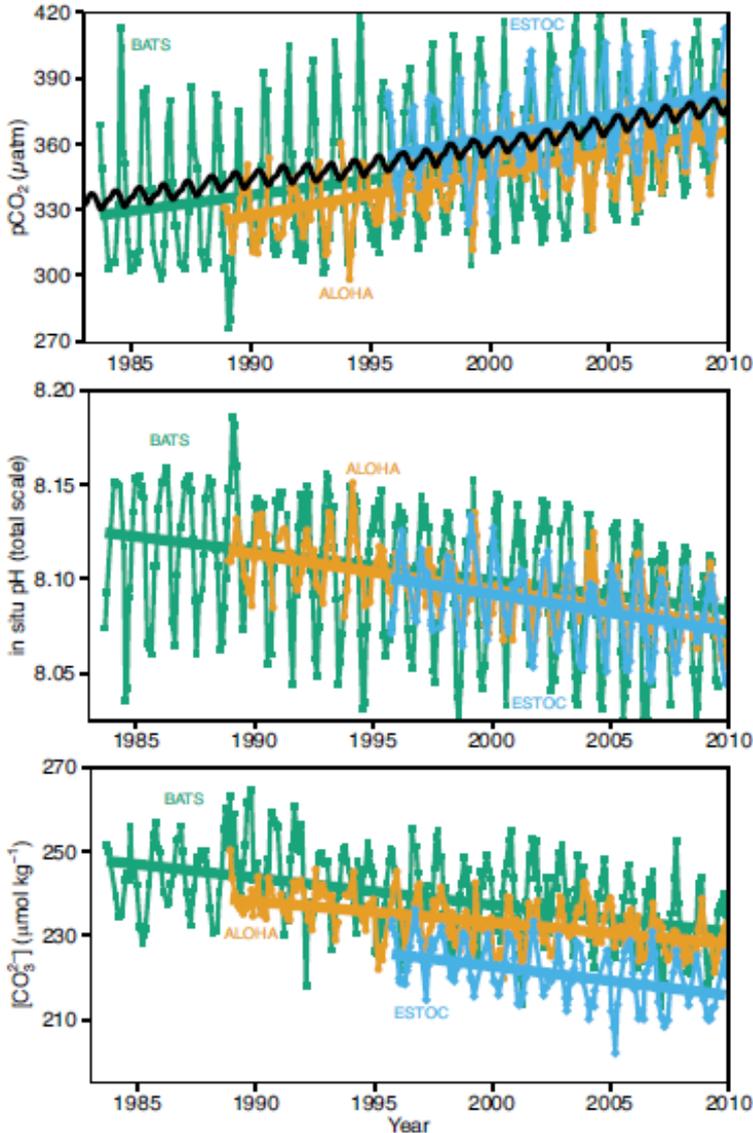
$\Omega = 1$ 化学的には炭酸カルシウム形成の閾値

$\Omega > 1$ 炭酸カルシウムの結晶形成

炭酸イオン(CO₃²⁻)が減少すると、CaCO₃(アラゴナイト・カルサイト)の溶解度増加し、特に石灰化生物で殻や骨格の形成が困難になる

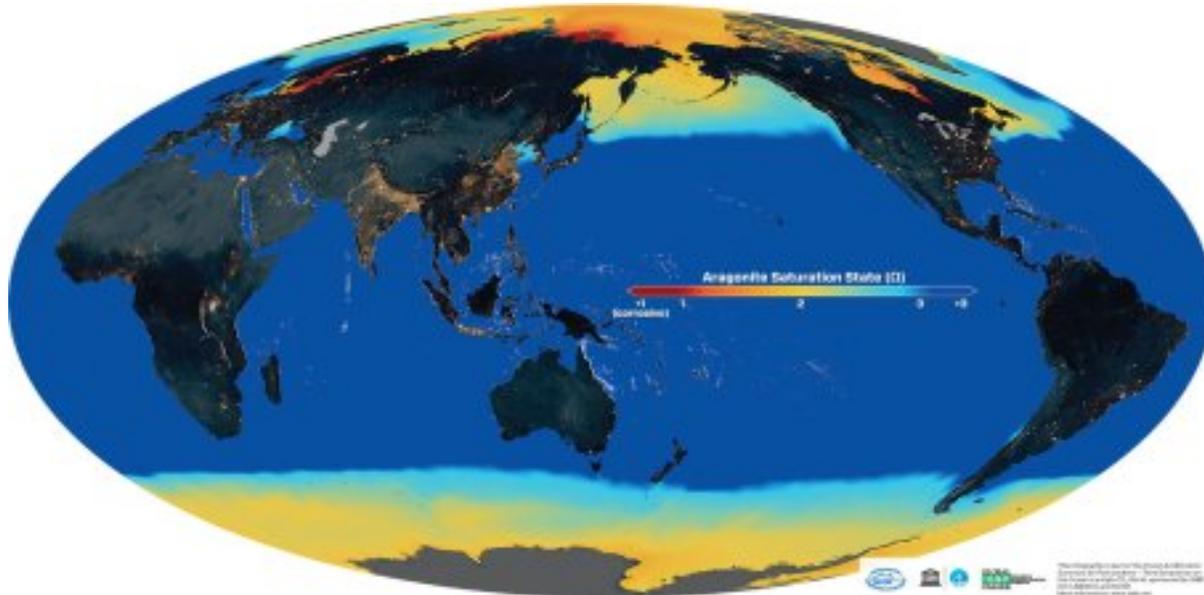
より一般的には海水中H⁺濃度増加(pH低下)が生理影響をもたらす

図: 太平洋・大西洋の定点観測で長期に観測された表層海水のCO₂分圧、pH、炭酸イオンの経年的変化 (IPCC AR5 WG1)



産業革命以前(1850年)の海水炭酸カルシウム(アラゴナイト)飽和度

熱帯域は3以上であり、サンゴ等の成長に最適、低温・低塩の北極海は元来飽和度が低かった



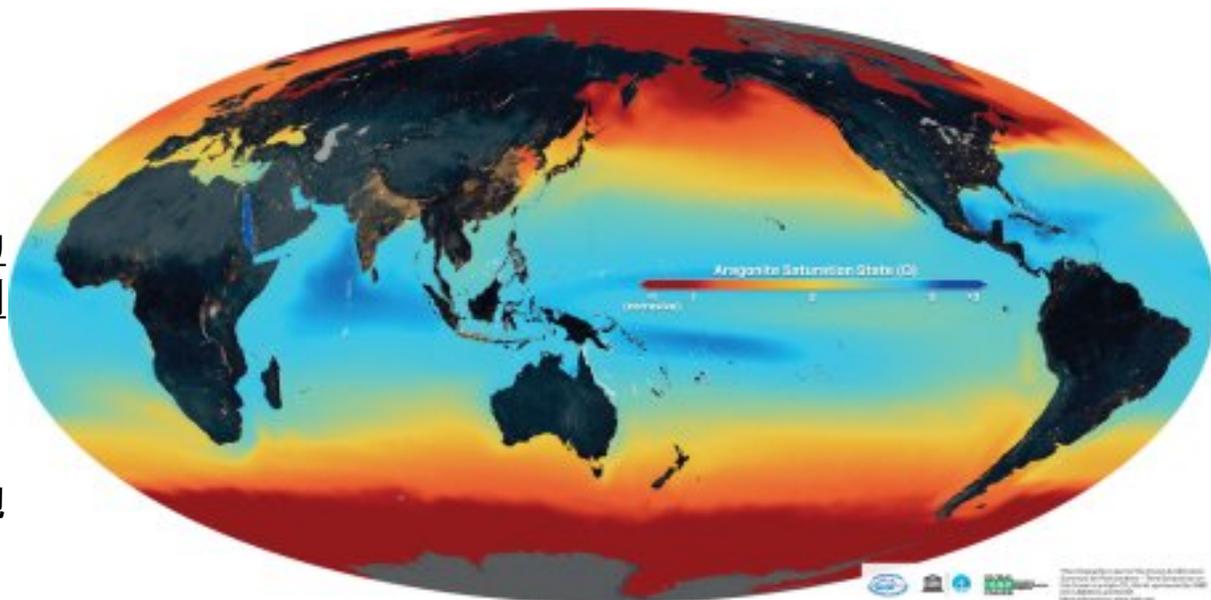
Ω Aragonite
アラゴナイト飽和度

<math><1</math> 1 2 3 >3

Ocean Acidification Summary for Policymakers 2013, IGBP

今世紀末(2100年)の海水炭酸カルシウム(アラゴナイト)飽和度予測(高CO₂排出シナリオRCP8.5)

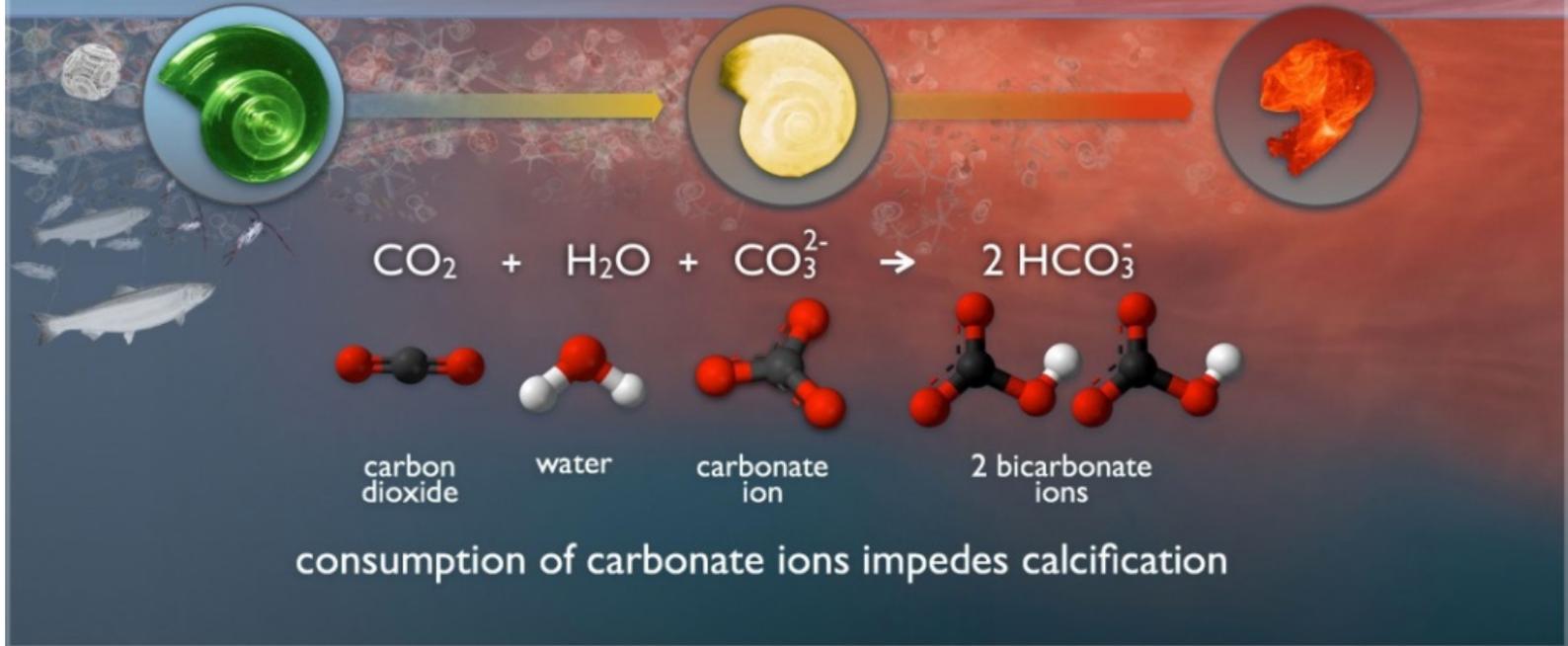
熱帯域も高緯度海域も低下する。特に、低温の両極海域では、未飽和海域が広がる



OCEAN ACIDIFICATION

HOW WILL CHANGES IN OCEAN CHEMISTRY AFFECT MARINE LIFE?

CO₂ absorbed from the atmosphere



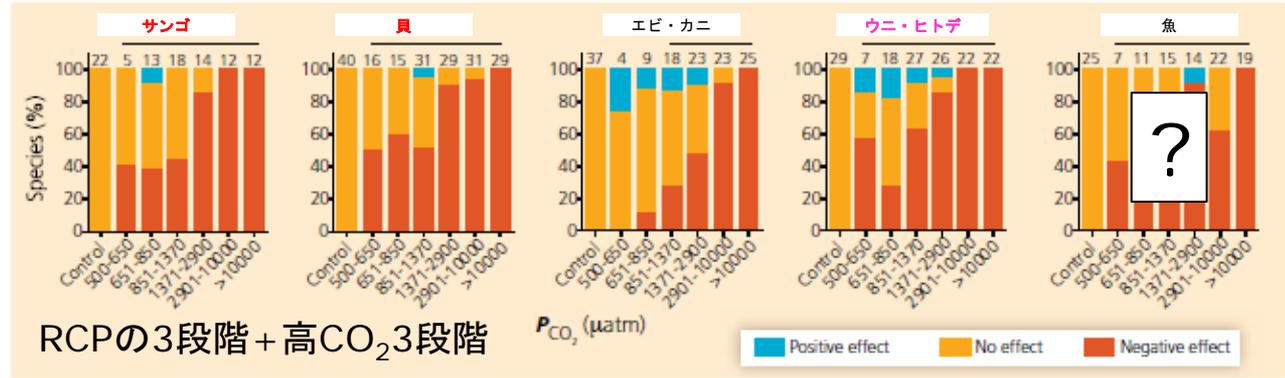
IPCC AR5 WG2では両者の影響を指摘、生物影響を分類群毎にメタ分析した。

ただし、

- ・メタ分析ができる程度に実験情報を集めたものの、影響評価された生物種・群は不十分
 - ・海洋生物の移動性と温暖化・酸性化の問題は複雑
 - ・魚類の酸性化影響評価では、中長期影響評価がされていないため不確実性が高い
 - ・生態系の影響を評価する研究はあまり進んでいない
- というような面で現状の理解は不十分で、更なる研究が必要である。

海洋酸性化影響のメタ分析 — 分類群毎の影響評価 —

Taxa	Response	Mean Effect
石灰藻 	生残	実験例不足
	石灰化	有意差なし
	成長	実験例不足
	光合成 分布域	負の効果 -28% 負の効果 -80%
サンゴ 	生残	有意差なし
	石灰化	負の効果 -32%
	成長	有意差なし
	光合成 分布域	有意差なし 負の効果 -47%
円石藻 	生残	実験例不足
	石灰化	負の効果 -23%
	成長	有意差なし
	光合成 分布域	有意差なし 有意差なし
貝 	生残	負の効果 -34%
	石灰化	負の効果 -40%
	成長	負の効果 -17%
	繁殖 分布域	負の効果 -25% 有意差なし
ウニ・ヒトデ 	生残	有意差なし
	石灰化	有意差なし
	成長	負の効果 -10%
	繁殖 分布域	負の効果 -11% 実験例不足
エビ・カニ 	生残	有意差なし
	石灰化	有意差なし
	成長	有意差なし
	繁殖 分布域	有意差なし 有意差なし 有意差なし
魚 	生残	実験例不足
	石灰化	実験例不足
	成長	有意差なし
	繁殖 分布域	実験例不足 実験例不足
コンブ・ワカメ 	生残	実験例不足
	石灰化	実験例不足
	成長	正の効果 +22%
	光合成 分布域	有意差なし 有意差なし
海草 	生残	実験例不足
	石灰化	-
	成長	実験例不足
	光合成 分布域	有意差なし 実験例不足
ケイ藻 	生残	実験例不足
	石灰化	-
	成長	正の効果 +17%
	光合成 分布域	正の効果 +12% 有意差なし



RCPのCO₂レベルで区分した海洋酸性化影響のメタ分析評価 (Wittmann & Pörtner, 2013 → IPCCAR5WG2)

RCP (Representative Concentration Pathway) IPCC AR5向けの21世紀温室効果ガス排出経路シナリオと対応する大気CO₂濃度

- 1300ppm以上では、各分類群で影響発現する種の比率が高まる
- 石灰化生物が一般により脆弱で、甲殻類は比較的耐性を持つ
- 初期発生段階における脆弱性が高い例がある
- 低レベルで影響発現する種がある ← CO₂増加が生態系の種遷移を誘起
- 魚類は行動影響に限り確認、実験例不足で中長期的な影響が不明

分類群別にみた種レベル海洋酸性化影響評価の現状 (Kroeker et al., 2013から日本語化)

海洋酸性化研究

— 環境研究総合推進費による国内共同研究 —

2008～2010年度 海洋酸性化が海洋生物に与える影響予測の 実験的研究

国立環境研究所・京都大学・琉球大学・水産総合研究センター・産業技術総合研究所

主なねらい 飼育実験による近未来の酸性化影響把握
近未来に予測される海水CO₂濃度(分圧)での影響評価
精密な室内飼育実験向け制御系
沿岸性の動物を中心に脆弱と考えられる初期発生、幼生を対象

2012～2014年度 海洋生物が受ける温暖化と海洋酸性化の複 合影響の実験的研究

国立環境研究所・産業技術総合研究所・海洋生物環境研究所・電力中央研究所

主なねらい 温暖化と海洋酸性化の海洋生物への複合影響を予測評価
海洋生物資源や海洋が果たしている炭素循環に及ぼす影響を評価
新規実験系として大型水槽のCO₂濃度制御、温度との複合制御
世界の研究で不十分な、魚類の再生産への複合影響評価
我が国沿岸で特異にみられる北上サンゴ種への複合影響評価

海洋酸性化研究

— 科学研究費補助金(科研費)による国内共同研究 —

2011～2013年度 沿岸海洋底性生物が受ける海洋酸性化影響の精密な評価(基盤A)

国立環境研究所・京都大学・琉球大学・水産総合研究センター

主なねらい 現場海洋CO₂分圧変動を実計測する

日周変動など実海域のCO₂濃度(分圧)変動を含む海洋酸性化影響を評価

沿岸底生生物種を中心とする精密な海洋酸性化影響評価

2014～2018年度 海洋酸性化の沿岸生物と生態系への影響評価実験(基盤S)

国立環境研究所・京都大学・琉球大学・岡山大学・常葉大学・沖縄高専・水産総合研究センター・産業技術総合研究所・海洋生物環境研究所

主なねらい 種レベルの海洋酸性化影響評価を最新のCO₂制御系

これまでに実験例のない魚類再生産への影響評価

屋外水槽で種の加入・定着への海洋酸性化影響を見る生態系実験

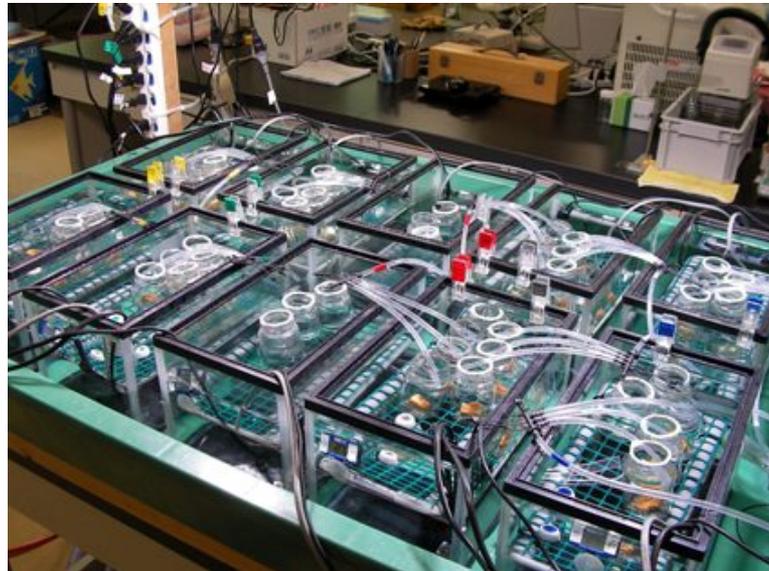
国際分担すべき西部太平洋域の沿岸生物と生態系への酸性化影響を評価

室内型飼育装置による実験研究

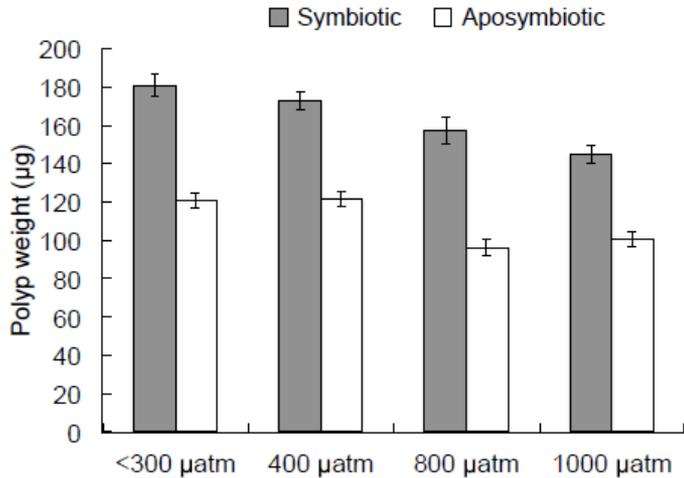
— 小水量のCO₂調整、幼生・小型生物の飼育に適する —

・瓶・水槽スケールの飼育実験を効率よく進められる、
ただし小流量 → 幼生・小型生物の種レベル影響評価
実験に利用

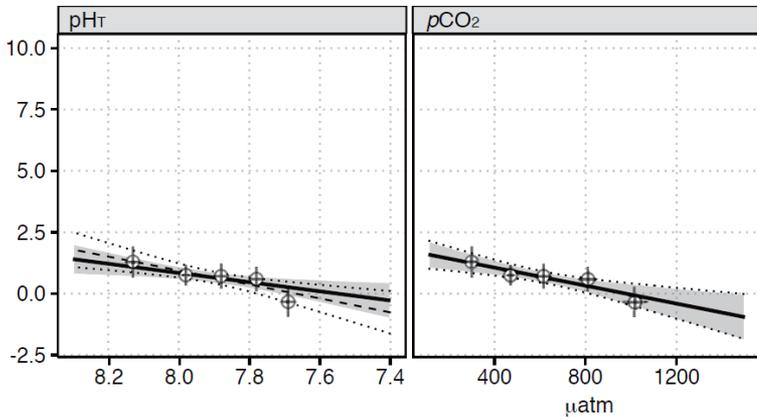
・精密に低いCO₂分圧が制御できる：
- 100ppm, control, +200~600ppmの5段階制御
→ 21世紀に予測される変化
・日周変化を模擬する飼育試験が可能



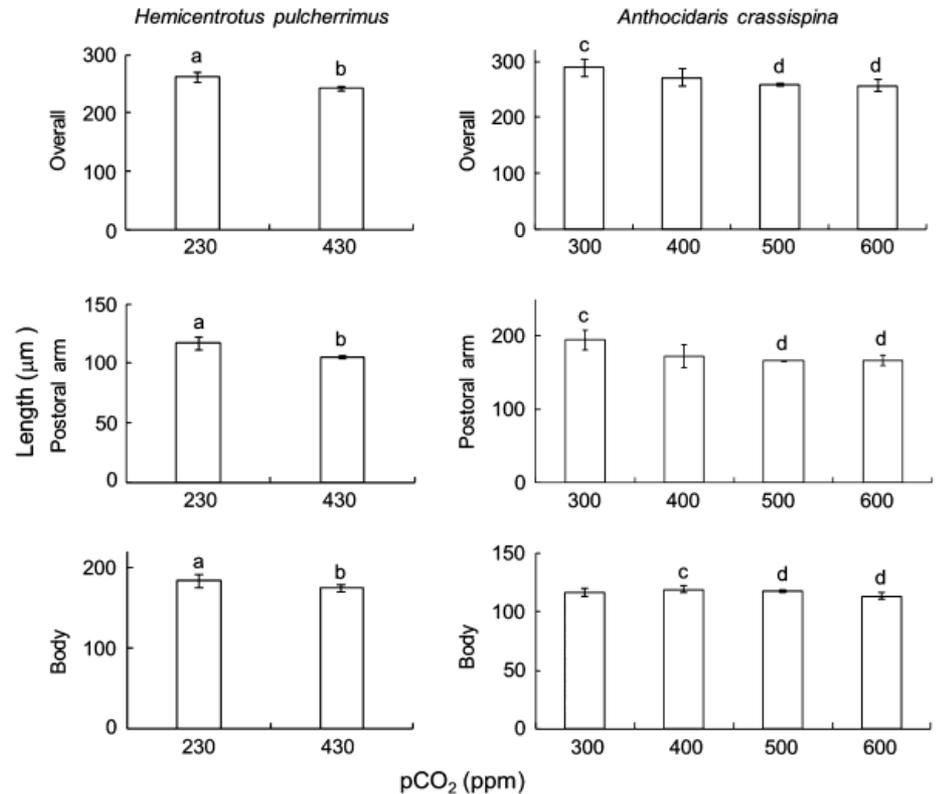
比較的低レベルから石灰化に影響が発現 — サンゴポリプ、ウニ幼生 —



サンゴ幼ポリプ(コユビミドリイシ)の石灰化へのCO₂影響は低濃度から発現 琉大・産総研・環境研
Ohki et al., *Biogeosciences*, 2013



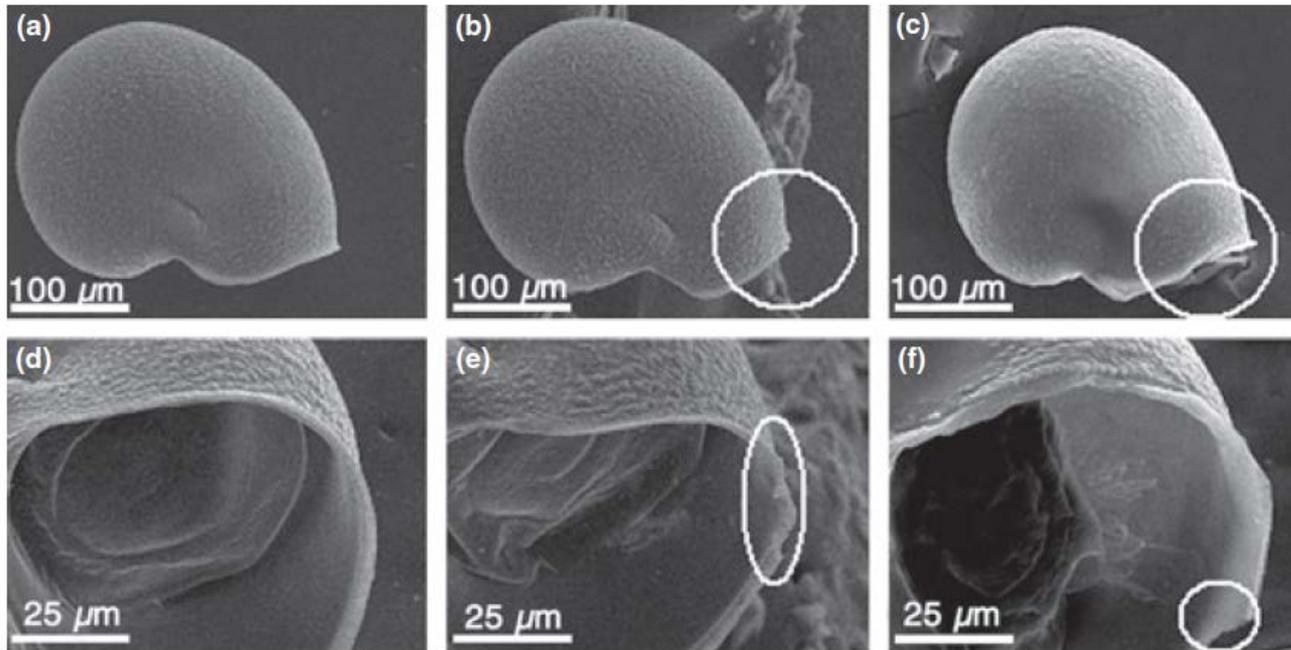
サンゴ幼ポリプ(ハマサンゴ)の石灰化へのCO₂影響は低濃度から発現 沖縄高専・琉大・産総研・環境研
Iguchi et al., *Marine Pollution Bulletin*, 2014



ウニ幼生(バフンウニ、ムラサキウニ)の石灰化へのCO₂影響は低濃度から発現 京大・環境研
Suwa et al., *Marine Ecology*, 2013

現在のCO₂濃度でも既に石灰化に影響を受けている生物種がある可能性、近未来のCO₂濃度増加程度でもより影響を受ける種が増える可能性が指摘される。

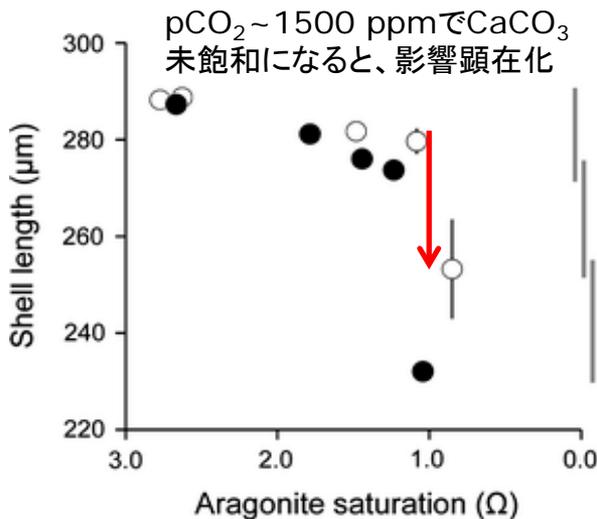
巻貝の影響発現はアラゴナイト飽和度と関連 — エゾアワビ、サザエの稚貝 —



エゾアワビ稚貝の石灰化へのCO₂影響は、1000μatm以上で有意に発現

左: コントロール濃度450μatm
中: 影響発現濃度1050μatm
右: 影響顕著濃度2150μatm

水研センター・環境研
Kimura et al., *Fisheries Oceanography*, 2011



サザエ稚貝の石灰化へのCO₂影響は1500μatm以上のアラゴナイト飽和レベルで有意に発現
→無機化学的溶解度がティッピングポイントになりうる 水研センター・環境研
Onitsuka et al., *Marine Biology*, 2014

二枚貝への高CO₂影響が、アメリカ北西岸のカキ養殖事例で現れているものの、わが国水産重要種であるアサリなどの研究例がない → 今後の実験対象として検討中

北上サンゴ種を対象とする — 酸性化 + 高水温の複合ストレス影響評価実験 —

北限種(北限にいる種、縁辺種)

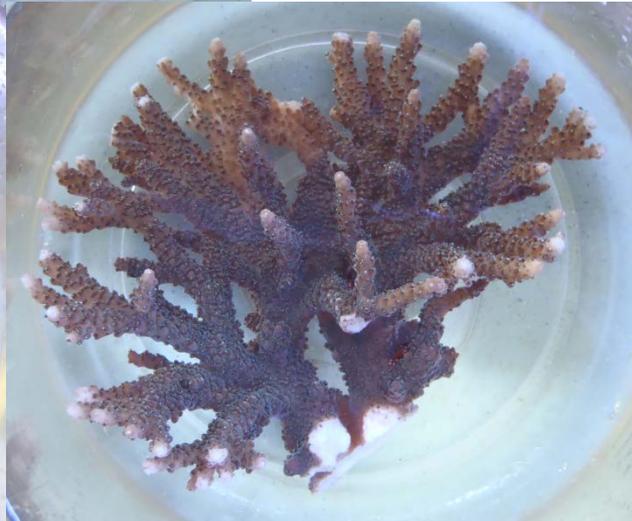


ヒメエダミドリイシ
Acropora pruinosa

北上種(急速に北上中)



エンタクミドリイシ
Acropora sp.2



ソリタリエンシス
Acropora solitaryensis

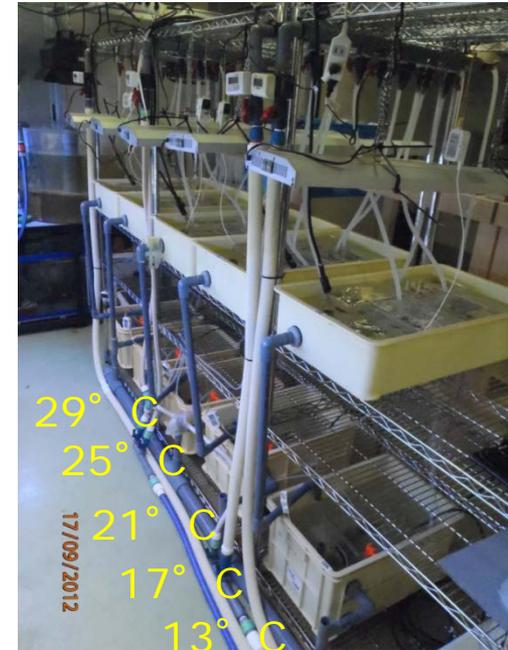
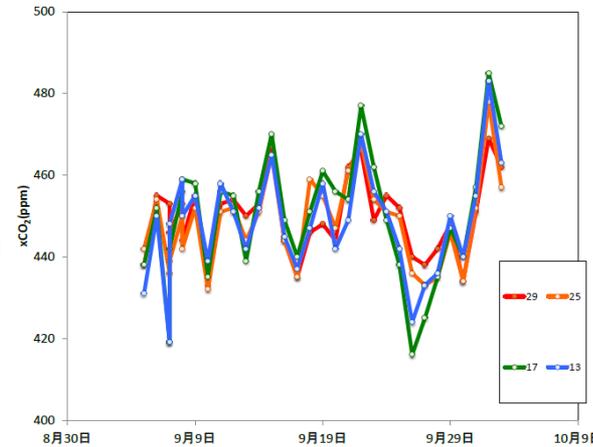
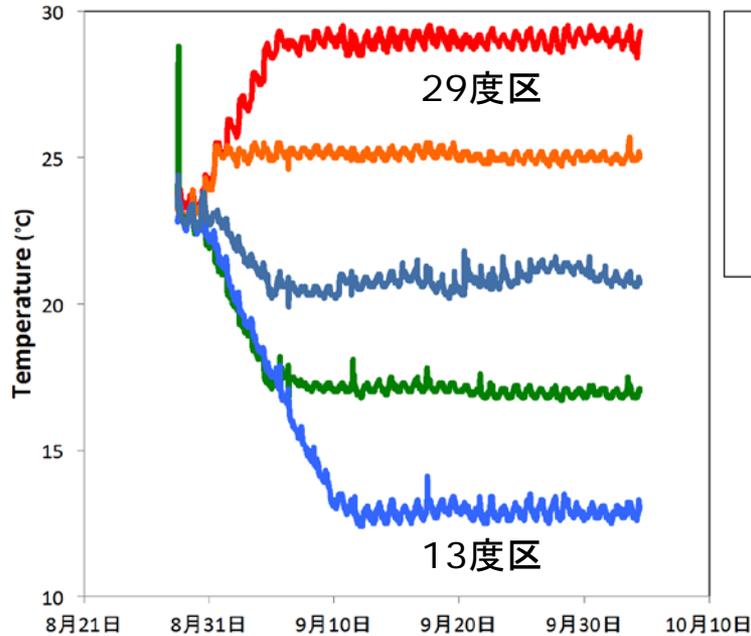
柏崎施設
(海洋生物環境研究所)



北上・北限サンゴ種は、西伊豆、串本で許可を得て採取

柏崎施設で二酸化炭素分圧6系統同時連続計測装置を用いて飼育実験

二酸化炭素分圧一定での北限・北上サンゴ種の飼育実験 水温を変化させてもpCO₂を一定に保つ←従前のシステムでは困難



これまでのサンゴの水温影響評価実験でpCO₂を制御している例はないが、実際は水温変化はpCO₂変化を同時に起こす。

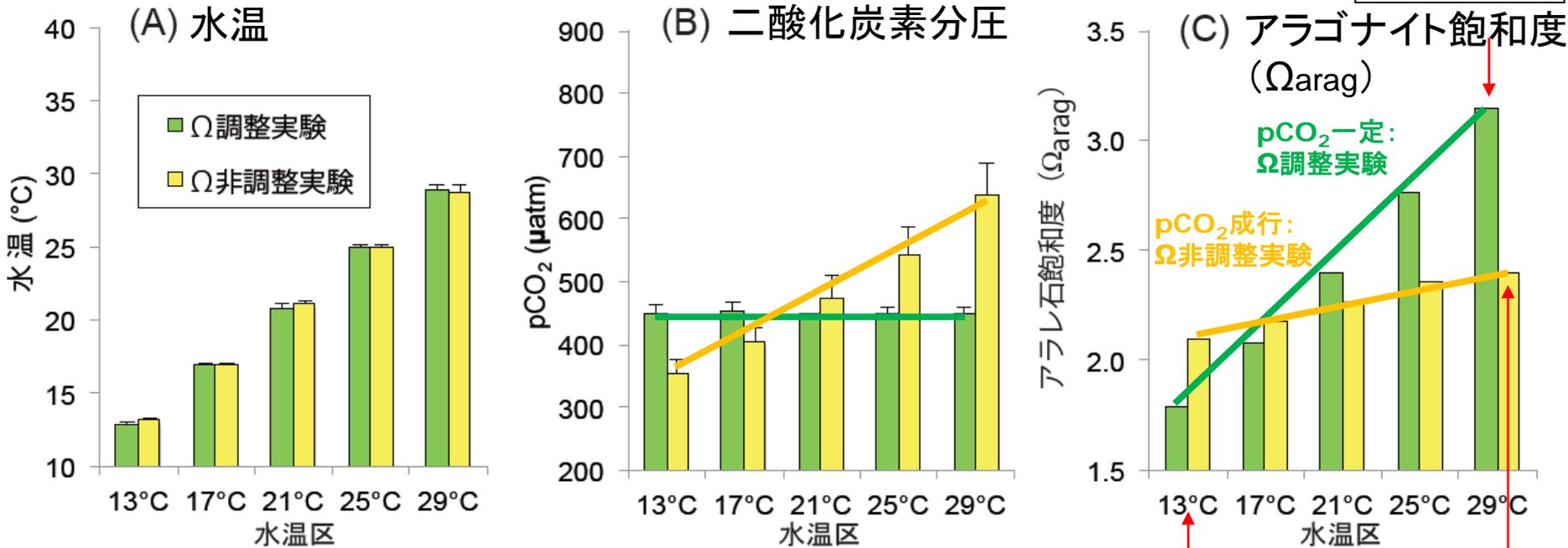
実験の目的は、水温影響とCO₂影響を分離すること。

長期にわたりpCO₂を450μatm一定に制御した。

一方、単純に海水温を変化させると、pCO₂は水温低下で低下、水温上昇で上昇する(成り行き)pCO₂変化。

西伊豆及び串本産ミドリイシサンゴの飼育実験

- ・ 5段階の水温飼育実験: 13, 17, 21, 25, 29 °C
- ・ 2通りの飼育実験: 「 Ω 調整実験」と「 Ω 非調整実験」
- ・ 6週間の飼育実験、光量 $\sim 200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
- ・ (1) 生残率、(2) 水中重量法による骨格成長量、(3) 白化率を評価



CO₂が高くな
らずに温暖化だ
けなら石灰化
に至適

2回の5段階水温実験における期間中の水温、CO₂分圧とアラゴナイト飽和度 (Ω_{arag})。誤差棒は実験期間中の変動を示す。

サンゴに
不適な
低水温

CO₂が高まり
石灰化に不利な
将来温暖化環境

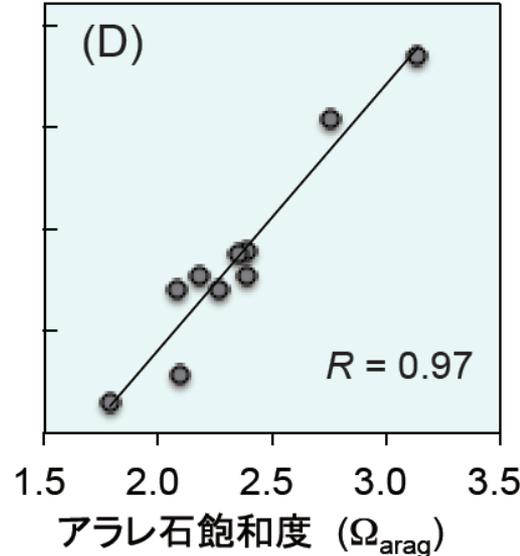
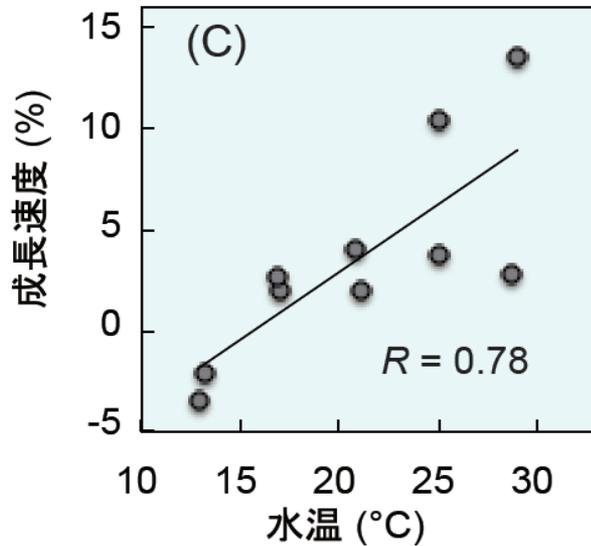
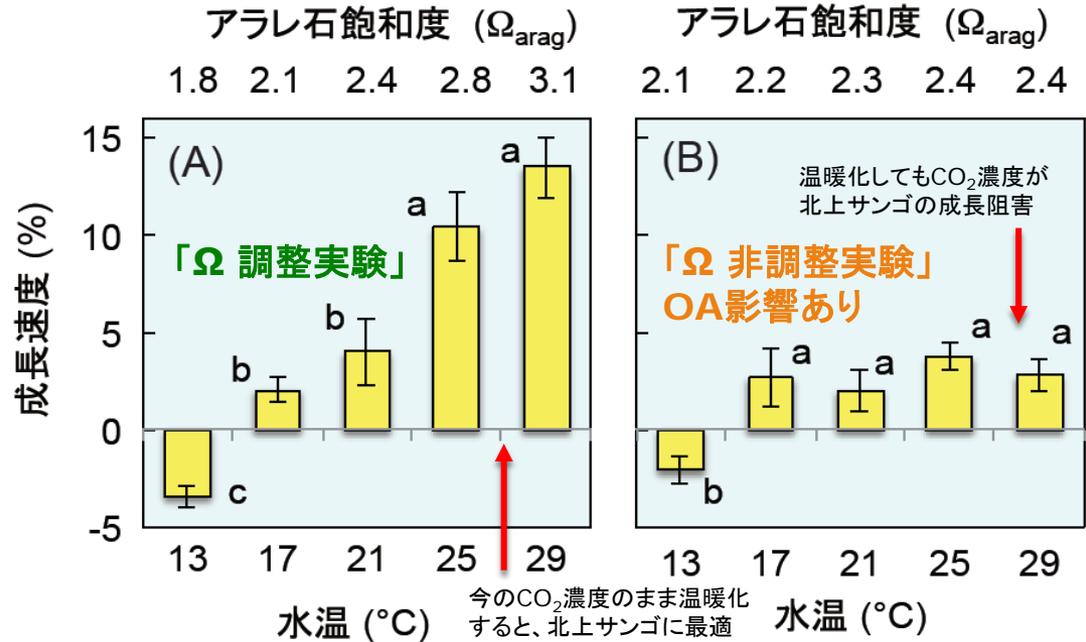
アラゴナイト飽和度調整・非調整実験によれば、CO₂増加を伴わない温暖化は北上サンゴ種に至適な状況になりうるが、CO₂増加は北上種の拡大を抑制する可能性がある

骨格成長の Ω 依存性: 北上種エンタクミドリイシの例

北上種



エンタクミドリイシ
Acropora sp.2



骨格成長量は
 Ω アラゴナイトと
よく相関



温暖化下でのサンゴ
の成長の鍵を握るの
は Ω アラゴナイトか！

大容量海水槽のCO₂調整 — 魚類の再生産へのCO₂の影響評価 —

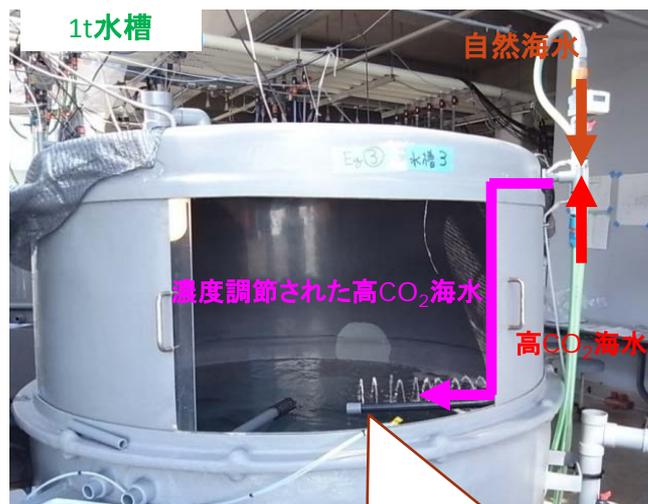
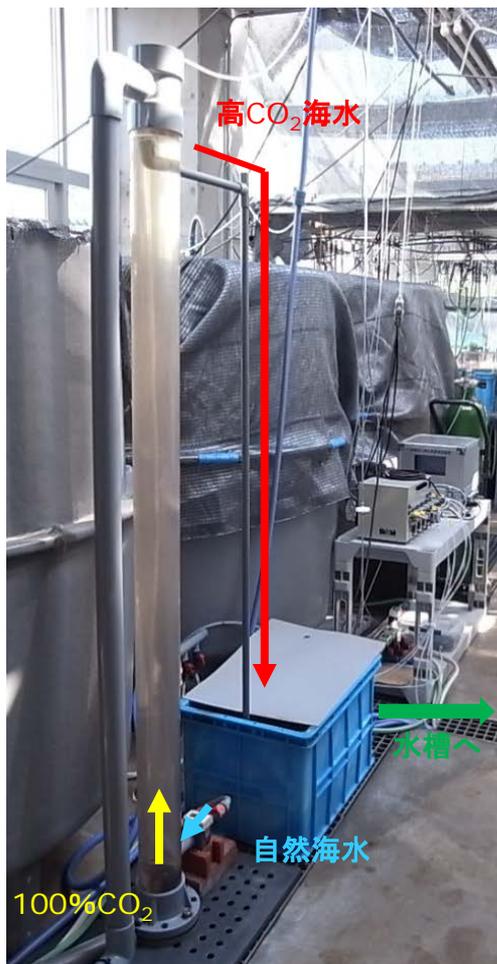
自然海水と高CO₂海水の混合比率を変えることでCO₂濃度を制御

これまでは、現状CO₂濃度で発生飼育
⇒ある段階になったらCO₂曝露

将来条件と違う  将来の温暖化条件

産卵段階から一貫して高CO₂濃度で
再生産過程を追う世界初の試み

必要な大容量水槽のCO₂調整法開発



シロギス(成魚)と孵化直後の稚魚、稚魚の耳石

6チャンネル同時測定
CO₂分圧計測装置

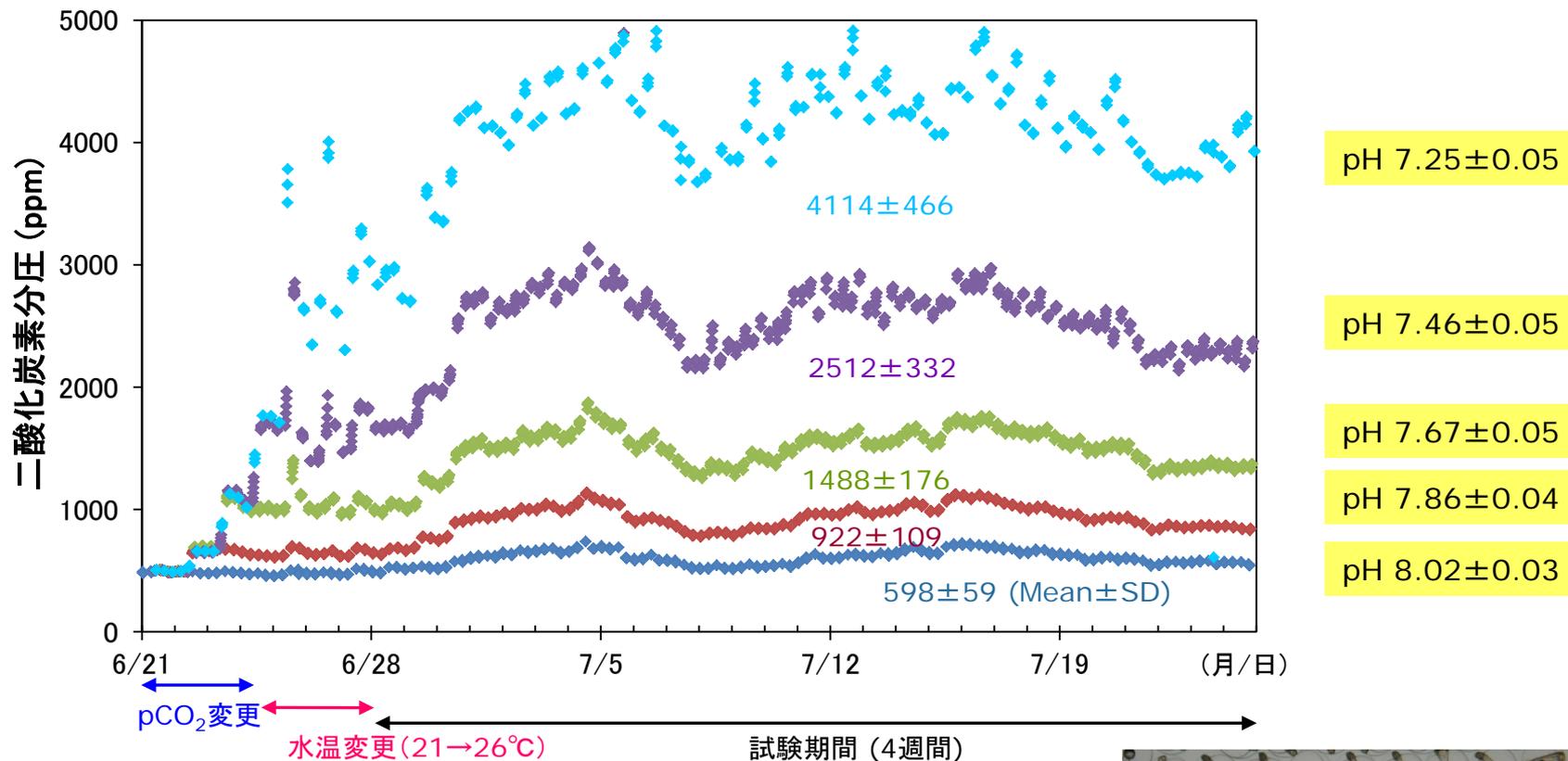


研究展開として、10t水槽
を用いるマダイの再生産実
験に取り組んでいる



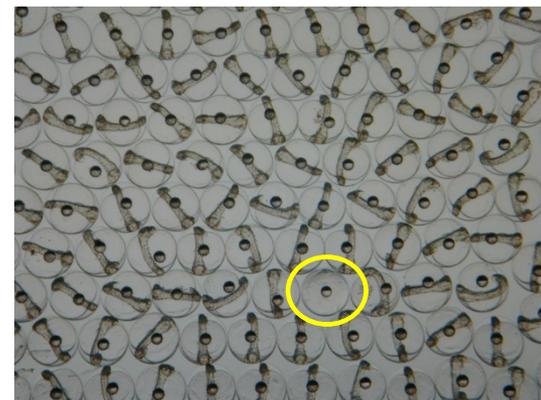
実験期間における二酸化炭素分圧の実測値

- 1tの大型水槽で正確な濃度制御, リアルタイムで高分解能な測定を実現 -



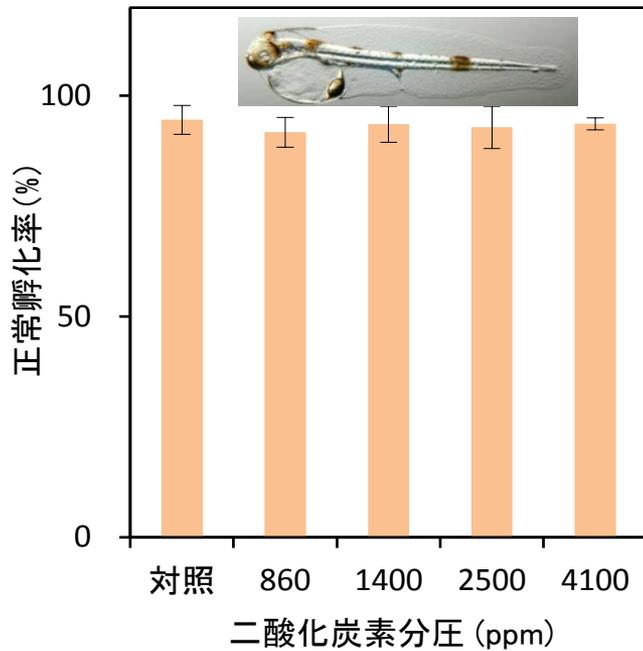
左: 浮上卵, 沈下卵, 正常発生卵の計数

右: 浮上卵(正常発生)中の未発生欄(円内)



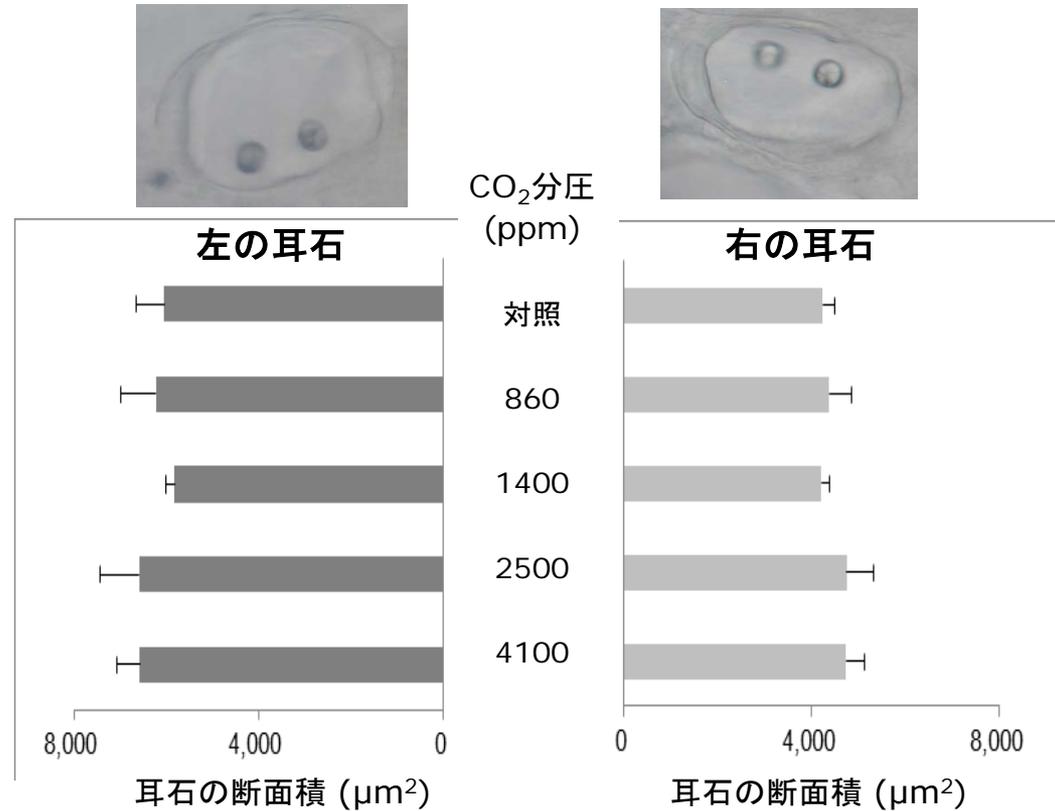
シロギスの孵化と耳石形成に及ぼす高pCO₂の影響

- 正常孵化率と耳石の大きさは対照区と高pCO₂区で同等 -



シロギス受精卵の高pCO₂下における正常孵化率

各濃度区間で有意差は認められない($p > 0.05$, 各濃度で5回繰り返し)



高pCO₂下において産出された後に発育したシロギス仔魚の耳石の大きさ

左右の耳石について各濃度区間で有意差は認められない($p > 0.05$, 各濃度で5回繰り返し)

初期生活段階のみならず、産卵・放精から受精に至る生殖過程においても、高pCO₂に対する適応性を有する (4100 ppmでも対照区と同等に産卵し、産出された卵は正常発生した後に正常孵化)

屋外水槽のCO₂制御への展開

— 屋外光条件下でCO₂調整下での長期飼育実験 —

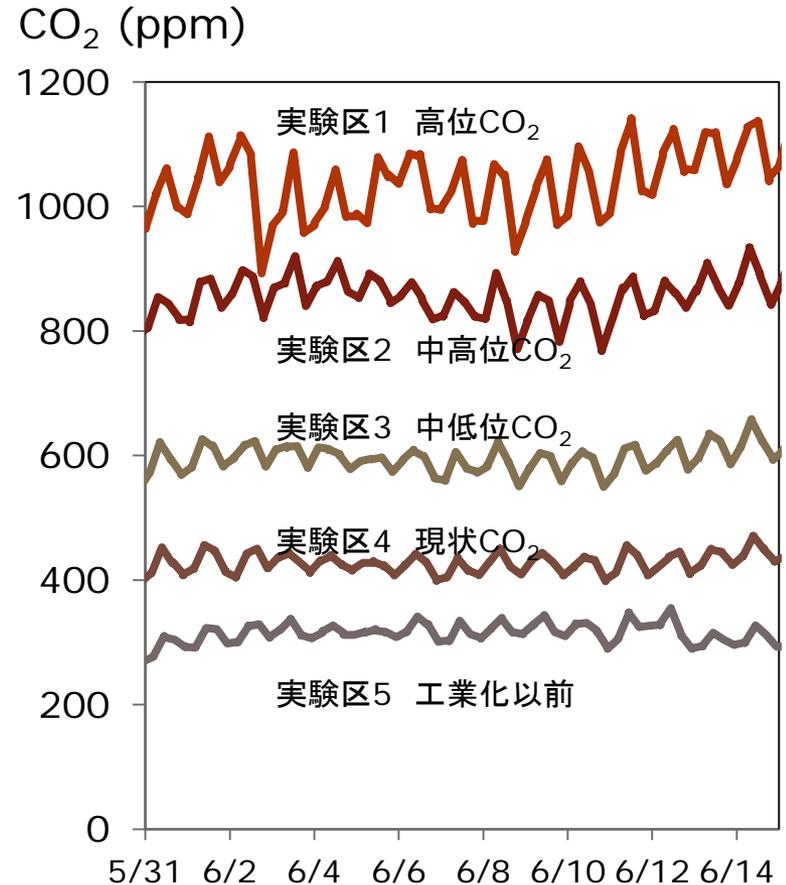


大容量の海水を用いた飼育実験が可能
多種の生物を別々の区画で**同時に飼育**できる
屋外光量下で飼育可能



琉球大学
 瀬底研究施設(沖縄県)

平衡器自動切替器、送液ポンプ



2014年からの科研費課題参画機関の臨海施設



柏崎施設



海生研(柏崎)
飼育(大容量・温暖化)・加入



東北水研(宮古)
飼育(内・外)・加入

京都大学(白浜)
飼育(内・外)・加入

琉球大学(瀬底)
飼育(内・外)・加入



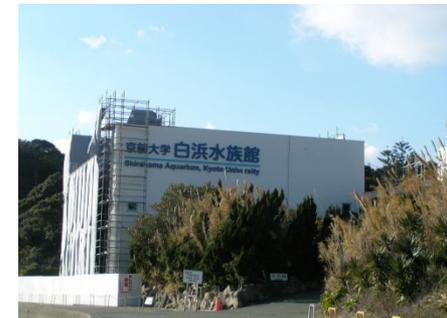
宮古の新施設



琉球大学瀬底(野外水槽)

わが国沿岸を広くカバーし、亜寒帯(宮古)～
亜熱帯(瀬底)の多様な沿岸生物種の酸性化
影響評価実験を実施する研究体制を構築

京都大学白浜改修終了



屋外型CO₂制御装置による生態系実験 — 加入種の種組成、石灰化生物率を見る —

屋外水槽に見られる外界から侵入した様々な石灰化生物
CO₂制御なしで試験的に実施した加入実験例(琉球大瀬底)



屋外水槽群



少ない先行事例のひとつ、ハワイ大学 Kuffner et al. (2008)はpHを変化させた加入実験を実施、低pHで石灰藻比率が低下、ただし、ビーカースケールで生物相は単純

大型水槽を使う研究例や地域間の相違を調べる研究例はない



ゴカイ類



二枚貝類



ヒザラガイ類



巻貝類



コケムシ類



石灰藻類

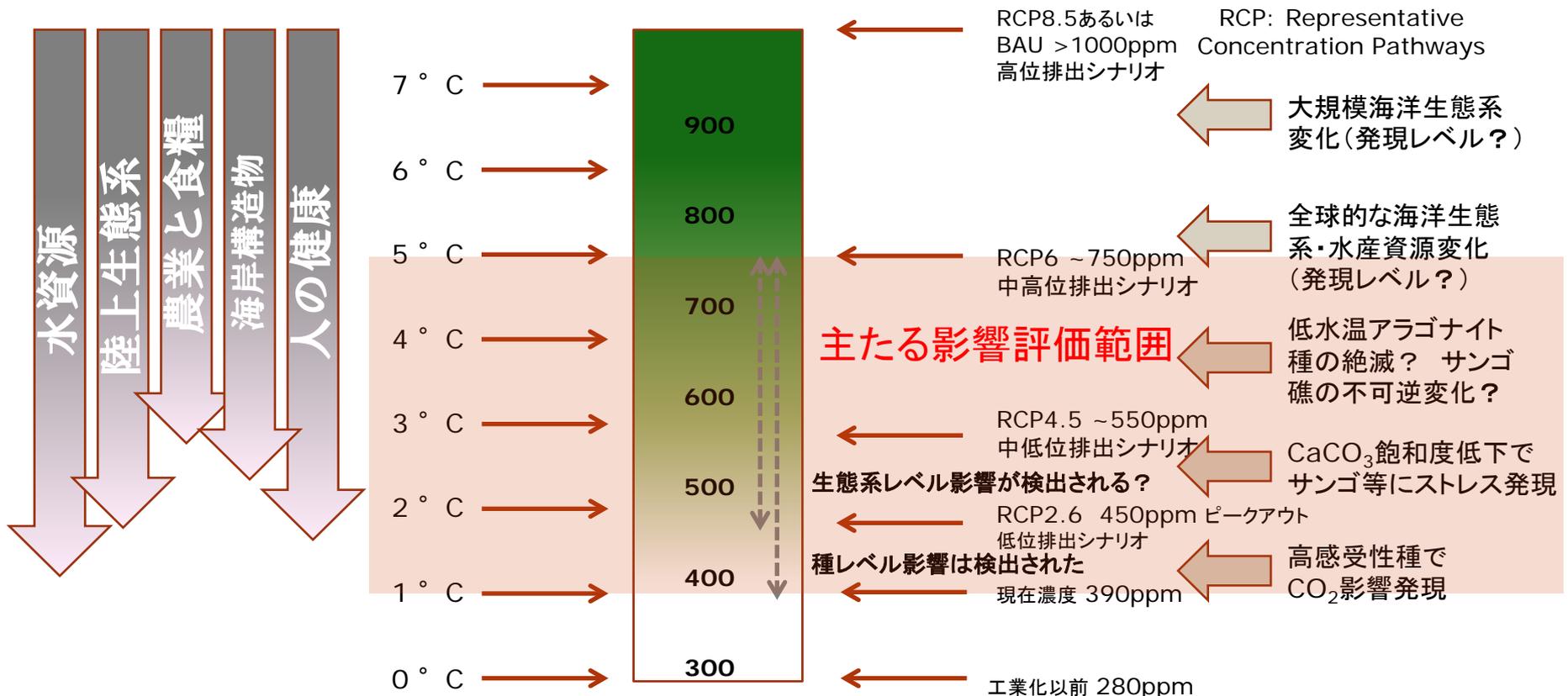
CO₂制御下で生態系観察(加入・定着)実験を計画

外AICAL型装置を活用(飼育実験と並行して実施可能)

対照区と影響区の水槽に、人工基盤を設置し、底面には生物を取り除いた砂を敷く。石灰質の骨格を形成する腹足類、固着性多毛類、石灰藻などを対象に、岩に付着する生物と砂中に生息する生物両方の加入・生育状況を比較する。

→ 高CO₂環境下で種組成変動・石灰化生物の比率を観察する日本沿岸(亜寒帯～亜熱帯区)の多くの臨海施設で実施する計画

気候変動と海洋酸性化の地球規模影響の概念 — 他セクターへの影響と海洋酸性化影響の比較 —



他セクター温暖化影響 IPCC AR4 (多くは昇温に対応して発生)
 大気CO₂(ppm)とおよその平衡(~2300年)気温上昇
 既知・未知の海洋酸性化影響

- ・近未来のCO₂濃度範囲としてRCP4.5~RCP6の範囲の影響が最も知りたい(IPCC AR5 WG2では、RCP濃度区分で報告例をメタ分析したが、低レベルの評価実験が不足)
- ・CO₂による海洋酸性化評価実験は、種の多様性と国際分担を踏まえて西部太平洋(亜寒帯~亜熱帯)の多くの種で行うべき
- ・生態系影響評価は方法論(観察・実験を含む)から考える必要

気候変動と海洋酸性化の地球規模影響の概念 — 他セクターへの影響と海洋酸性化影響の比較 —

【メッセージ】

- ・「海洋酸性化」は大気CO₂濃度増加という共通の原因による「地球温暖化」と同時進行する全球的な問題である。
- ・高位排出シナリオ(2100年 > 950ppm)あるいは中高位排出シナリオ(600~700ppm)の大気CO₂濃度は、「地球温暖化」で多くのセクターに深刻な影響を及ぼす(高い確信度)。
- ・中高位排出シナリオ程度のCO₂増加が引き起こす「海洋酸性化」影響は、まだ明らかでない。排出削減目標設定に「海洋酸性化」を考慮すべきかどうかを考えるには、この濃度レベルで海洋生物・海洋生態系に及ぶ影響を明らかにする必要がある。
- ・中高位あるいは中低位排出シナリオ(500~600ppm)程度でCO₂排出を抑制できた時、「海洋酸性化」影響が海洋生物・海洋生態系に深刻な影響を及ぼさないとしても、顕著な影響を受ける海洋生物・生態系がありうる(特定の種や生物群が高感受性)。
- ・海洋生物・生態系の将来変化は、「海洋酸性化」だけでなく、同時に起こる「地球温暖化(水温上昇)」および「海洋無酸素化」、さらに他の変化するストレス要因(栄養塩供給、紫外線量、沿岸開発、その他)の複合影響を評価して考えなくてはならない。

国際研究連携組織づくり

Symposium sponsors



OCEAN ACIDIFICATION

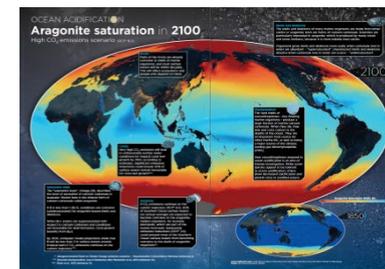
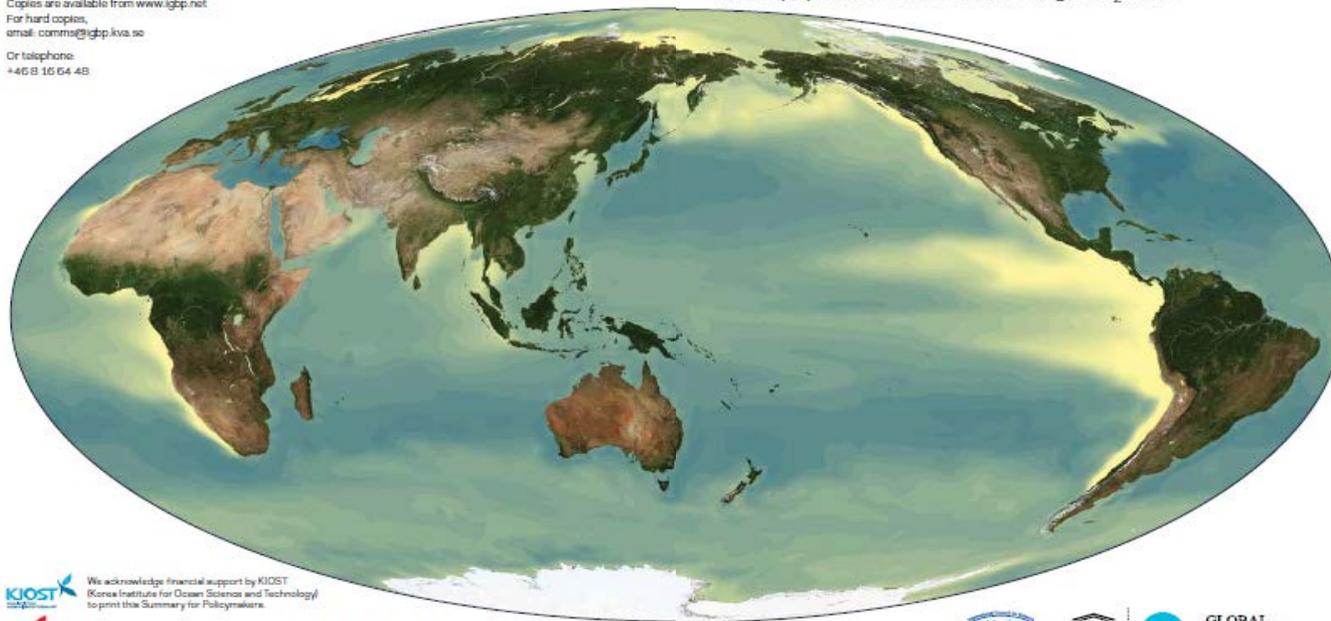
Summary for Policymakers
Third Symposium on the Ocean in a High-CO₂ World

An extended version of this summary for policymakers is available online with further scientific background information and references.

Copies are available from www.igbp.net

For hard copies, email: comms@igbp.kva.se

Or telephone: +46 8 16 64 48



Scientific research shows the vulnerability and sensitivity of commercially and ecologically important marine species to ocean acidification at elevated levels of CO₂ (adapted from Turley and Box, 2017¹, and Wittmann and Pithon, 2017²)

Group	Maldives	Echinoderms	Crustaceans	Flatfish	Coral
Species	Clams, scallops, mussels, oysters, pteropods, abalone, conchs and nauplii, beak, cuttlefish and squid	Sea urchins, sea cucumbers, starfish	Shrimp, prawns, crabs, decapods, amphipods, blue crabs, etc.	Small herring, cod, plaice, sole, turbot, halibut, etc.	Brain and cold water coral
Ecological role	Molluscs and pteropods are an important food source for fish, including salmon (lingcod). Molluscs and pteropods provide habitats for other organisms.	Kelp and pteropods are important food sources for fish. Starfish are important predators.	Zooplankton such as copepods are a critical link in a food web, connecting primary producers to higher predators.	Major role in the balance of ecosystems as top predators or in controlling important trophic levels.	Important ecosystem engineer, provides a habitat for a wide range of marine species, many of which are dependent on living in coral reefs.
Current estimated global commercial value*	\$24 billion Locally important. Deep-sea fisheries are important in some regions.	\$0.7 billion Locally important. "Lobster" fisheries are important in Chile and traditional medicine.	\$57 billion	\$60 billion Significant proportion of human food, fish oil, medicines and fish meal. Locally important dependence for food and income in some areas.	\$20-375 billion ³ The backbone of marine biodiversity production, direct source and support services.
Vulnerability	Adults and juveniles have shown reduced growth and survival. Some species may become locally extinct.	Few species studied. Vulnerability to early life stages. Some species may become locally extinct.	Less affected than other groups. Thermal tolerance may be affected with acidification.	Indirect effects due to changes in prey and loss of habitat and food. Some direct effects on behavior, growth and larval survival.	Reduced calcification, increased mortality, genetic effects and acidification.
Sensitivity (percent of species affected)⁴	0% to 100% (mostly 0-20%)	0% to 100% (mostly 0-20%)	0% to 100% (mostly 0-20%)	0% to 100% (mostly 0-20%)	0% to 100% (mostly 0-20%)
Effect	Positive	None	None	None	Negative

* Commercial value for fisheries represents the sum of organic fisheries and aquaculture in 2010 in US dollars⁵

³ Today's estimated value of global goods and services provided by coral reefs, such as coastline protection, tourism, biodiversity and food⁶

⁴ Adapted from Wittmann and Pithon, 2017². These data are for business-as-usual temperature (CO₂) levels.

We acknowledge financial support by KIOST (Korea Institute for Ocean Science and Technology) to print this Summary for Policymakers.

This document was produced with the financial assistance of the Prince Albert II of Monaco Foundation. The contents of this document are the sole responsibility of IGBP, SCOR and IOC and can under no circumstances be regarded as reflecting the position of the Prince Albert II of Monaco Foundation.



欧米先進国では、市民・水産者・教育界などで海洋酸性化問題への関心が高まる
IGBPから発信した政策決定者向け解説

- ・OA-ICC (Ocean Acidification International Coordination Center, 国際原子力機関が支援)など、GOA-ON (Global Ocean Acidification Observation Network)など国際研究連携組織が発展中であり、わが国のより積極的参画が必要となっている
- ・国際研究連携組織は精力的にアウトリーチ活動を行っており、その国内向け発信が必要