

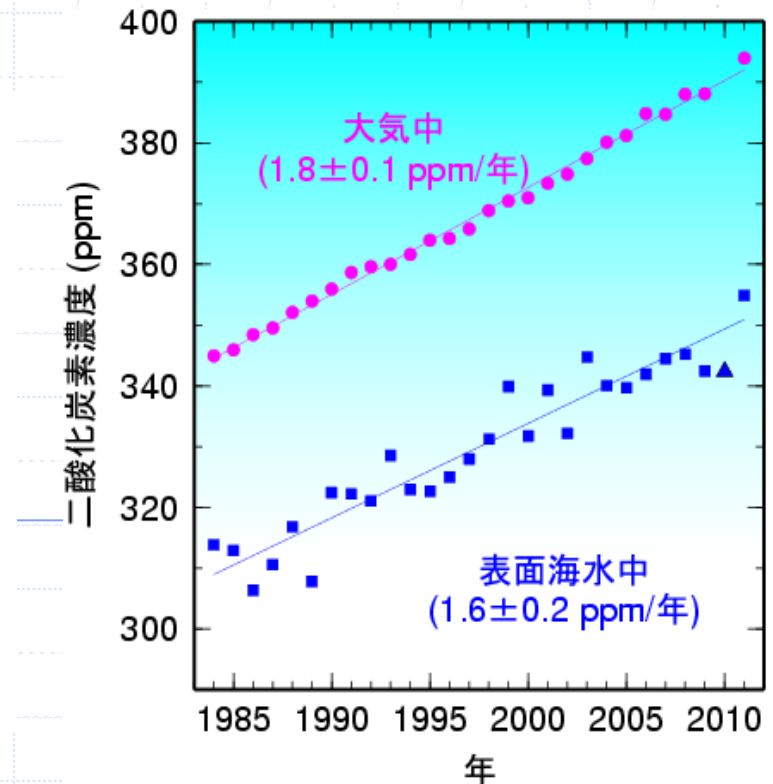
# 海洋の炭素循環

## <温暖化予測の鍵、海のCO<sub>2</sub>>

神戸海洋気象台

北村 佳照

人類が大気中に放出している二酸化炭素は、進行中の地球温暖化の主な原因であるとされている。この人為起源CO<sub>2</sub>の約3割は現在海洋に吸収されており、これによって地球温暖化が緩和されていると考えられる。しかし、海洋が同じペースでCO<sub>2</sub>を吸収し続けるかどうかは明らかでなく、地球温暖化の予測や対策のためには海洋のCO<sub>2</sub>吸収に関するより正確な科学的知見が必要である。現在理解されている海洋のCO<sub>2</sub>吸収プロセスを紹介するとともに、海洋CO<sub>2</sub>の観測体制、炭素循環を考慮した温暖化予測技術、これらの現状と課題について論じる。



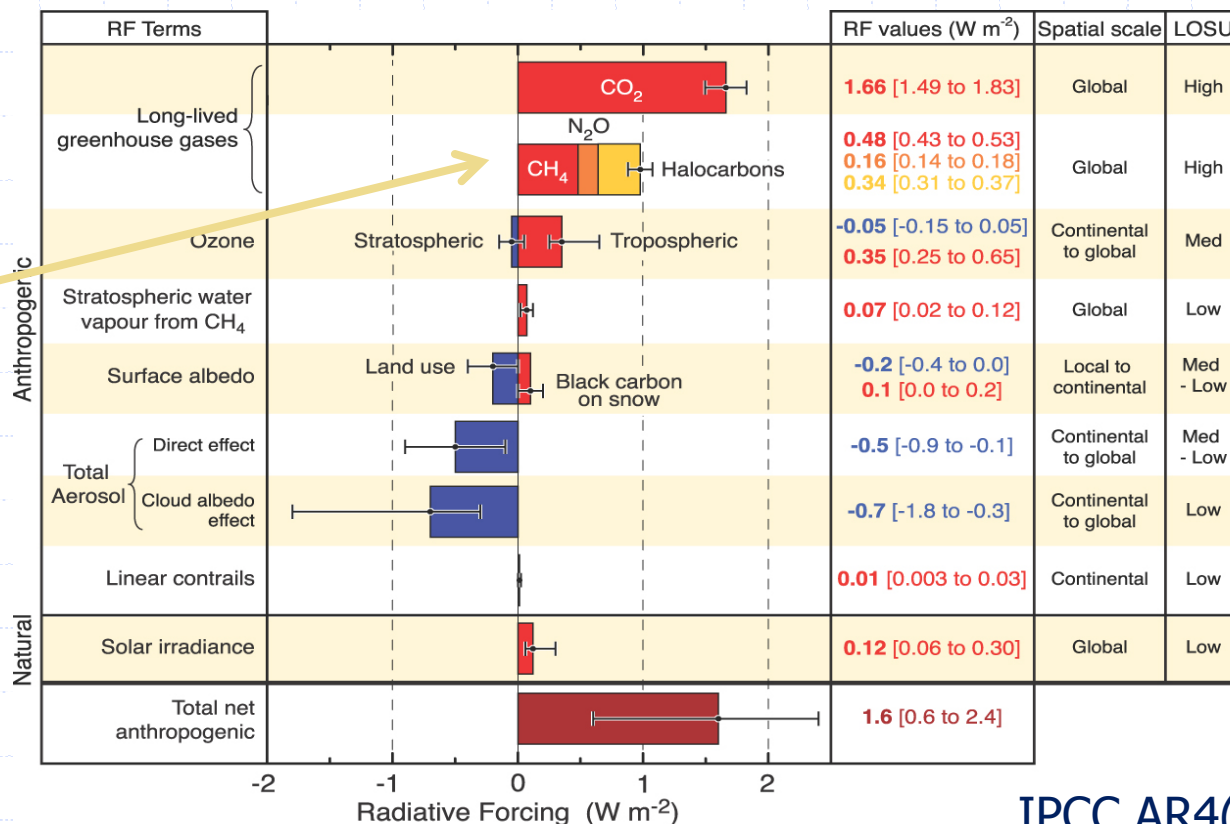
# 目次

- ◆ 何故、海の中のCO<sub>2</sub>に注目する？
- ◆ 海に吸収されるメカニズムは？
- ◆ 海の中のCO<sub>2</sub>はどうやって測る？
- ◆ 海への吸収や蓄積の現状は？
- ◆ 今後の見通しは？酸性化は？

# ◆ 何故、海の中のCO2に注目する？

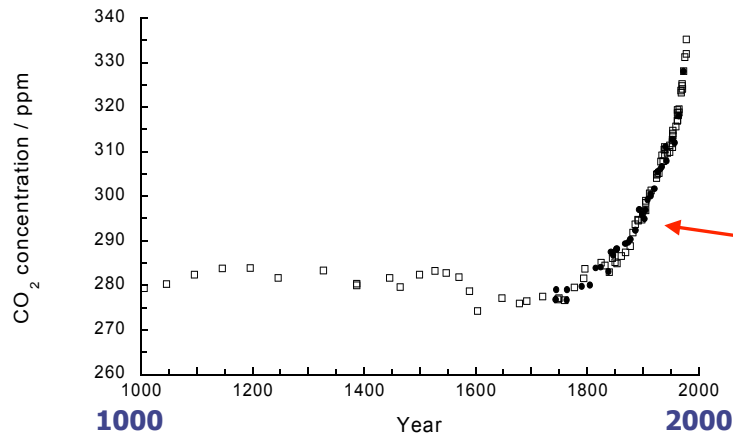
1750年以降の人間活動は、世界平均すると温暖化の効果を持ち、その放射強制力は $+1.6[+0.6 \sim 2.4] \text{Wm}^{-2}$ であるとの結論の信頼性はかなり高い (IPCC AR4)

人間活動により排出されたCO2は地球温暖化に及ぼす影響が最も大きい



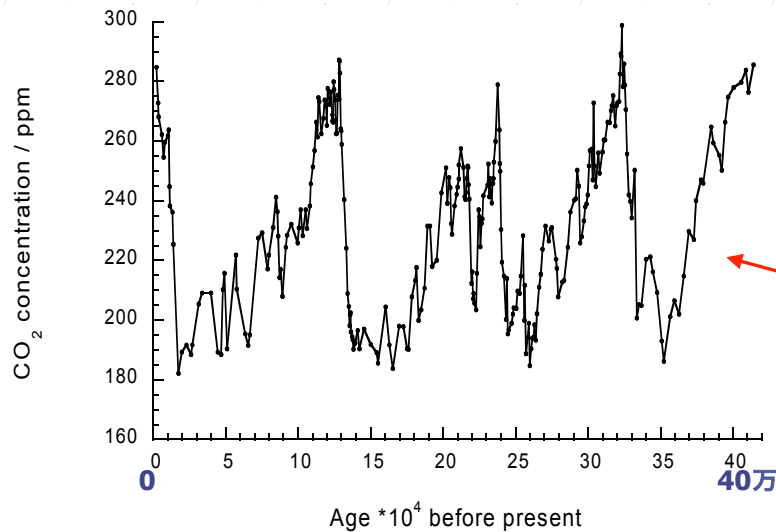
©IPCC 2007. WG1-AR4

# 南極氷床コア分析 による過去の大気中のCO<sub>2</sub>濃度



Siple とLow Domeのアイスコア分析による過去1000年のCO<sub>2</sub>濃度の変化

産業革命後の急激な増加  
過去少なくとも100万年間  
にはなかった高い濃度

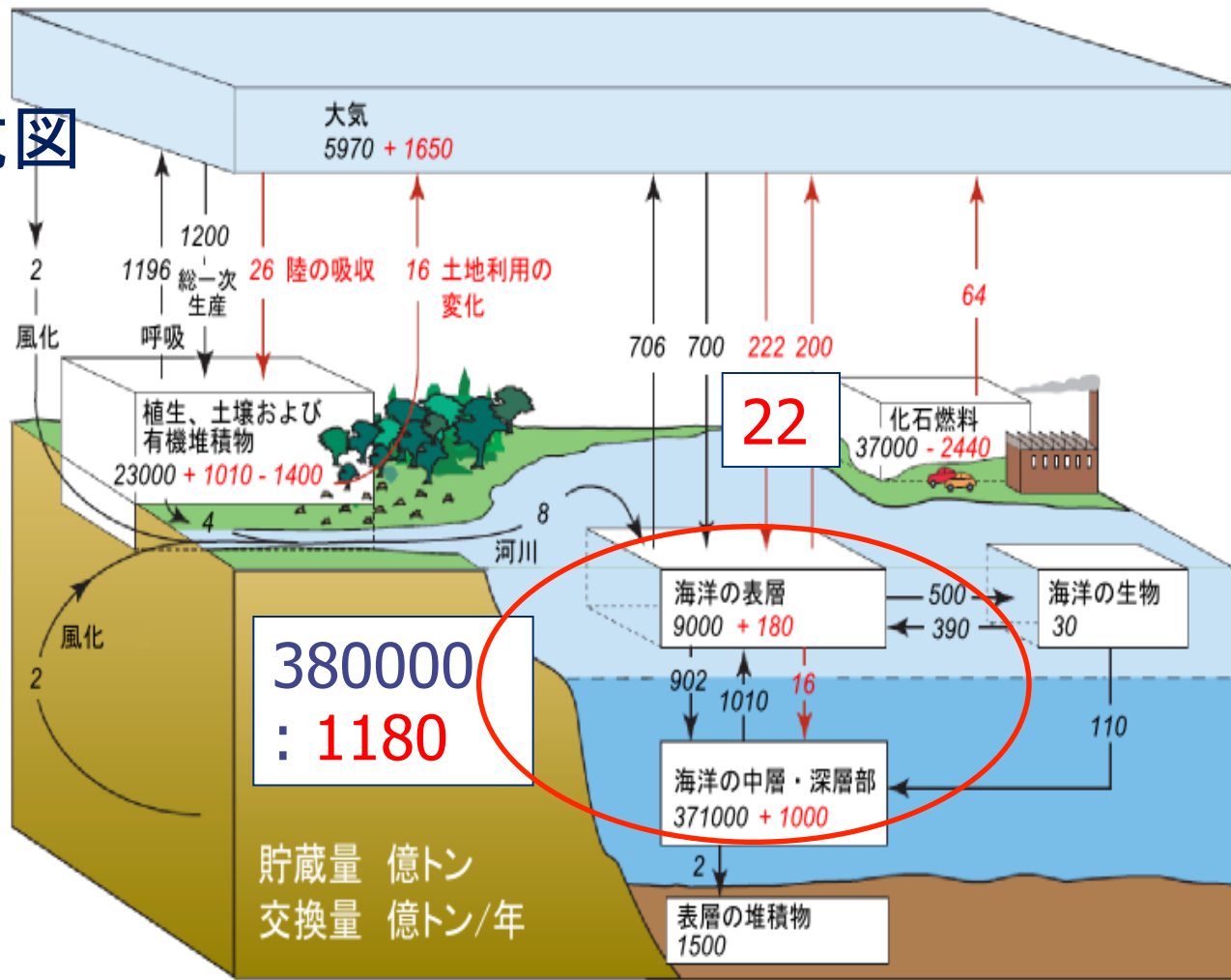


ボストークのアイスコア分析による過去40万年のCO<sub>2</sub>濃度の変化

氷期・間氷期のサイクルに応じた変化

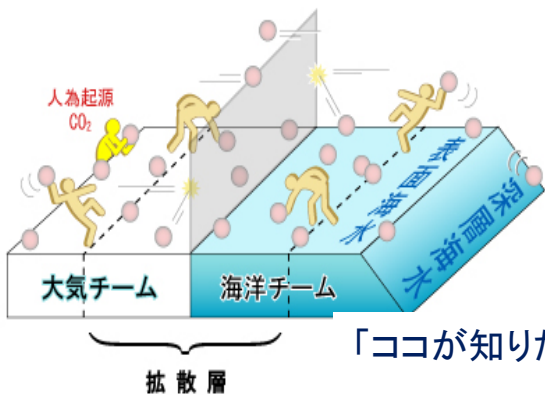
# 炭素循環：模式図

- ▶ 海洋は大気中の約**50倍**のCO2を貯蔵
- ▶ 大気-海洋、大気-陸域では絶えず大量のCO2を交換
- ▶ 現在のところ、海洋と陸域は、人間活動によって放出されるCO2の吸収源(=温暖化を緩和)
- ▶ その吸収量は海洋、陸域あわせて放出量の約半分('90年代)



黒数値：自然の循環の状態(全体で収支0)  
赤数値：人間活動の影響によって変化した量

IPCC AR4(2007)



## ◆ 何故、海の中のCO<sub>2</sub>に注目する？

### IPCC AR4「不確実性」 炭素循環に関わる部分

政策決定者向け要約(SPM)より

温暖化により、大気中の二酸化炭素の陸地と海洋への取り込みが減少するため、人為起源の排出の、大気中への残留分が増加する傾向がある。例えば、A2 シナリオでは、気候－炭素循環のフィードバックにより、2100 年には世界平均気温がさらに1°C以上上昇する。

気候と炭素循環が結合することで、気候システムの温暖化につれ、大気中の二酸化炭素が増加することが予測されるが、このフィードバックの大きさは不確実である。このため、大気中の二酸化炭素濃度をある特定の水準に安定化させるために必要な二酸化炭素排出量変化の不確実性が増大する。

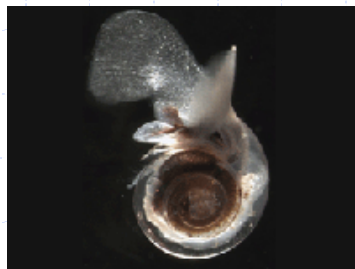
# ◆ 何故、海の中のCO<sub>2</sub>に注目する？

海洋酸性化：生態系への影響

殻を生成する生物(サンゴやプランクトンなど)に負の影響(炭酸カルシウムの殻を成長させられなくなる恐れ)



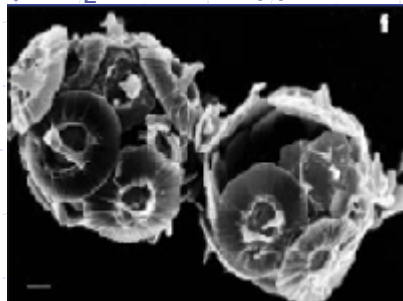
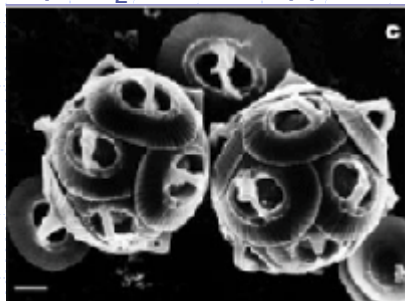
サンゴ



翼足類

pCO<sub>2</sub> 280-380 ppmv

pCO<sub>2</sub> 780-850 ppmv



CO<sub>2</sub>濃度による円石藻の変化 (Riebesell et al., 2000)  
高濃度のCO<sub>2</sub>下で炭酸カルシウム形成に有意な減少

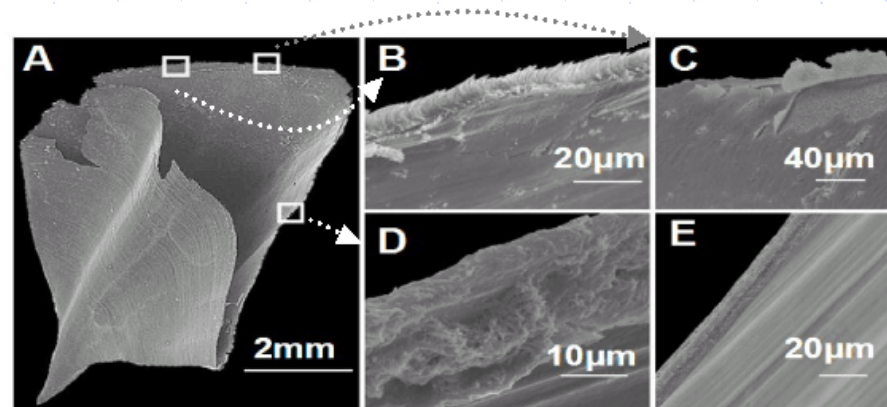


図2:ウキビシガイを48時間、酸性化した海水環境下においたときの様子  
翼足類カメガイ科の種であるウキビシガイ(*Clio pyramidata*)を48時間、酸性化した海水環境下においたときの様子(「Nature」9月29日号より一部改)。A:外殻全体(3つの白く囲われた箇所はB~Dを示す)。B~D:殻の溶解を示す拡大図(それぞれは、B:表面の結晶がささくれだった状態、C:それらがめくりあがった状態、D:溶解がすすんだ状態を示す)。E:酸性化しない通常的环境にいる時の殻の結晶状態。

# ◆ 海に吸収されるメカニズムは？

- 生物ポンプ
- アルカリポンプ
- 溶解ポンプ

海洋への吸収と蓄積には、**化学過程**、**物理過程**、**生物過程**がある

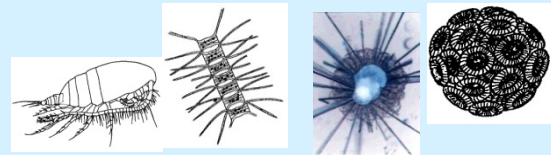
大気CO<sub>2</sub>



溶解

化学反応

もう少し詳しく



表層

溶存無機炭素

プランクトンによる  
利用

冬季の冷却による沈降

沈降

分解 溶解

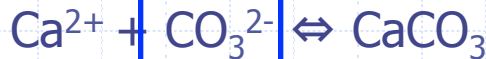
中層、深層の流れ

溶存無機炭素

中層・深層



# ◆ 海に吸収されるメカニズムは？

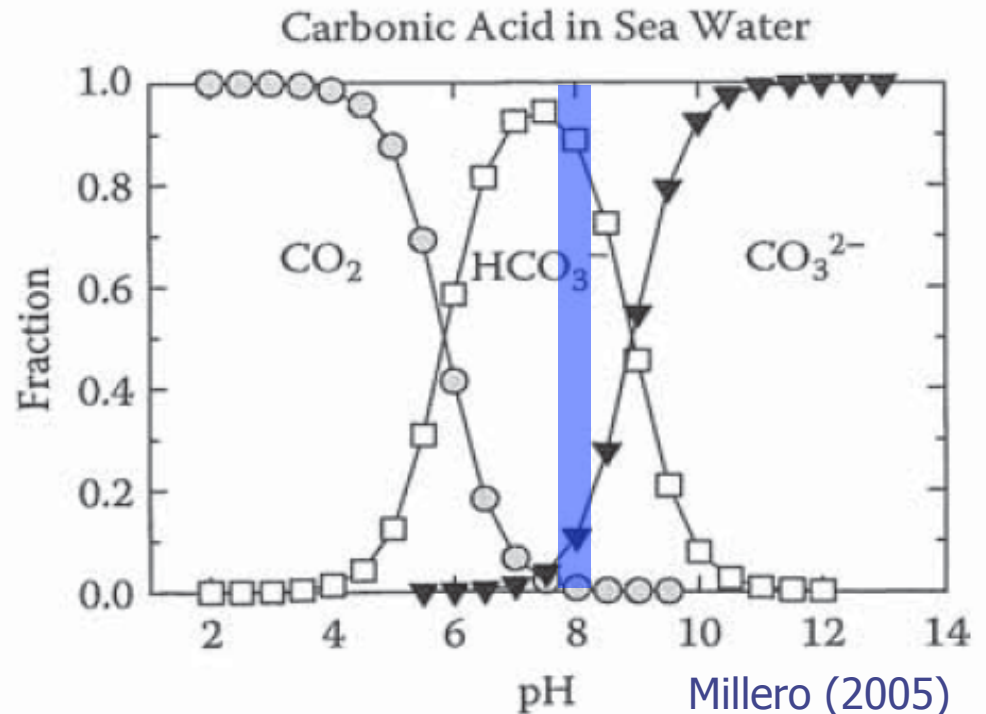


(深層で)炭酸カルシウムが溶解することにより、炭酸イオンを補給

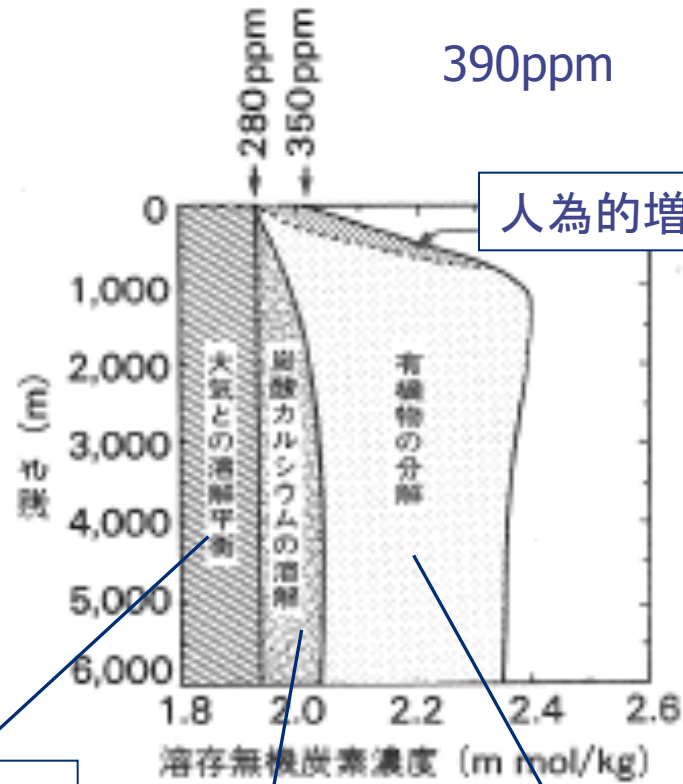
大気中のCO<sub>2</sub>と直接交換できるのはこの部分のみ

海面付近のpHは8程度  
(弱アルカリ性)  
⇒存在比はおよそ  
CO<sub>2</sub>:HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>:CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>=1:100:10

溶け込んだCO<sub>2</sub>の多くはHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>等に解離し、より溶けやすくなる



# CO2濃度の鉛直分布



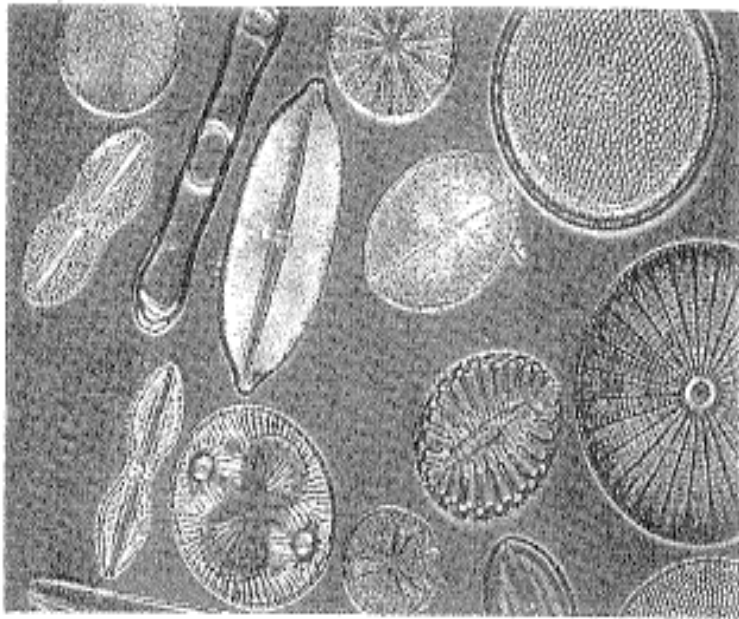
人為的増加

溶解平衡

CaCO3の溶解

有機物の分解

## 光合成



生物ポンプの担い手 植物プランクトン (J. Dymond, 1992: *Oceanus*, 35, p.63, Woods Hole Oceanographic Institution.)

## 炭酸カルシウムの殻

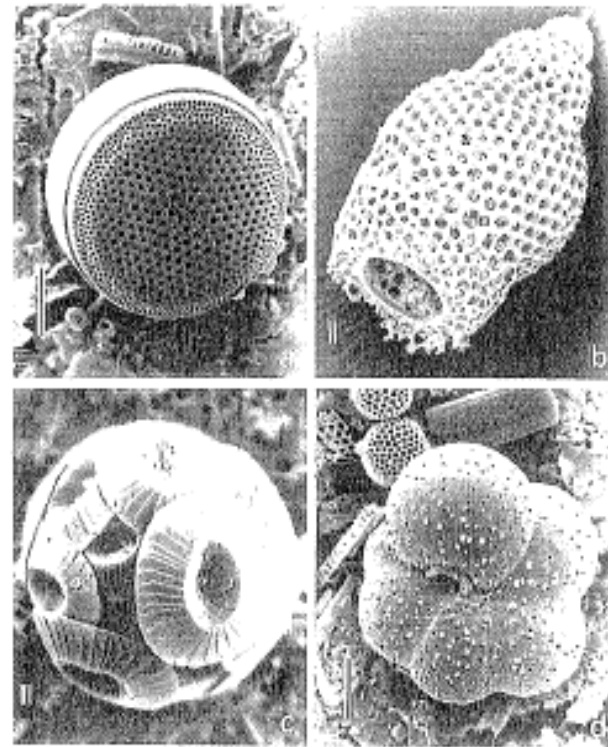
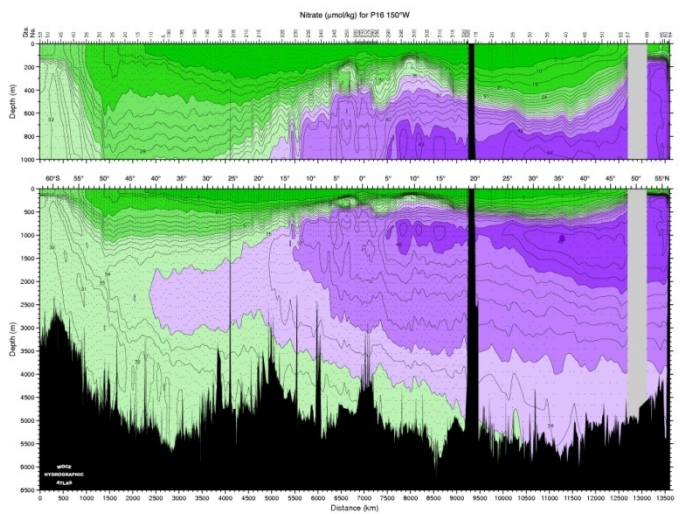
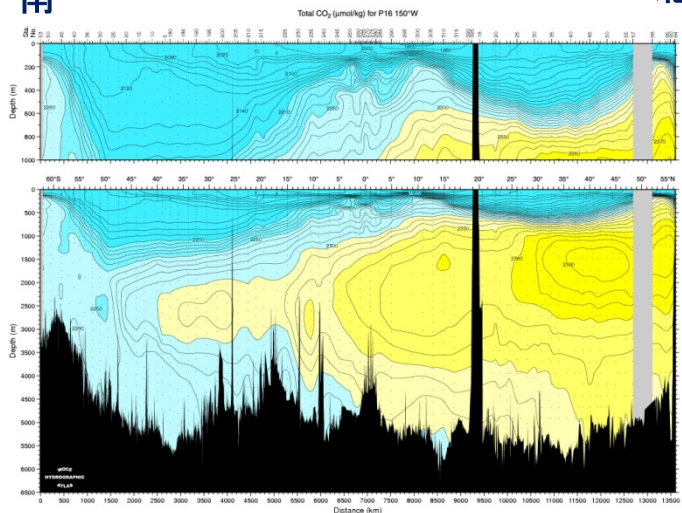


図6-14 ケイ藻、ラジオラリア、円石藻および有孔虫の形質 (北海道立大学 高橋三氏提供)  
a ケイ藻: スケールバー, 10  $\mu\text{m}$ .  
b ラジオラリア: 同, 10  $\mu\text{m}$ .  
c 石灰質ナノプランクトン: 同, 1  $\mu\text{m}$ .  
d 浮遊性有孔虫: 同, 10  $\mu\text{m}$ .

# 太平洋 (P16) 150W

南

北



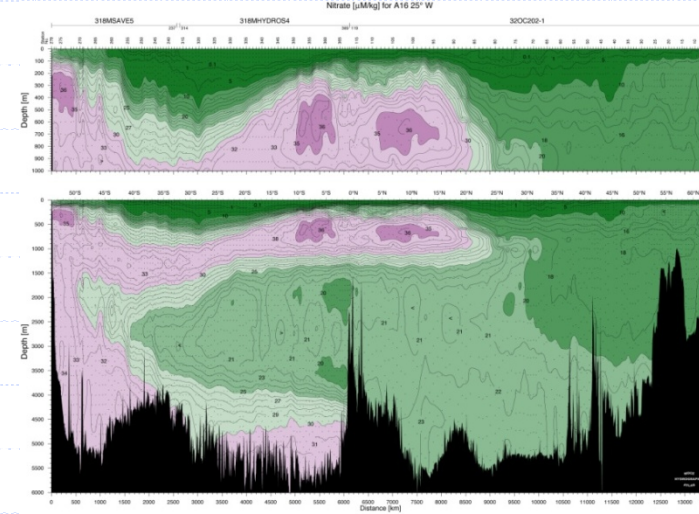
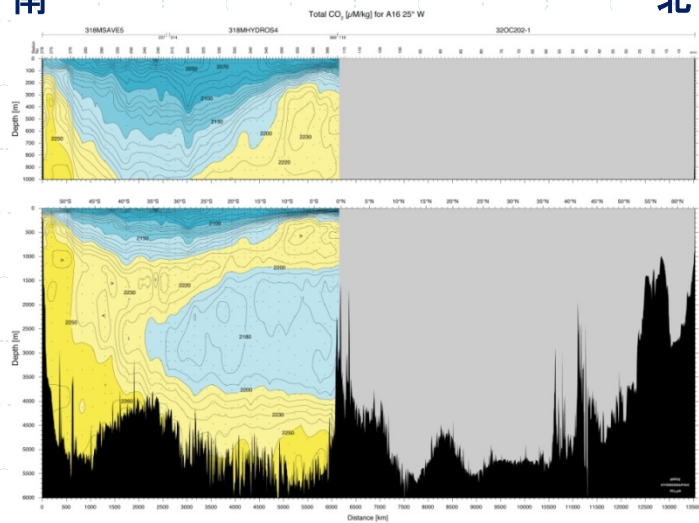
全炭酸

栄養塩  
(硝酸塩)

# 大西洋 (A16) 25W

南

北



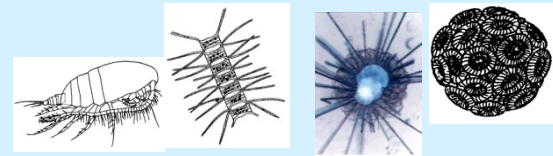
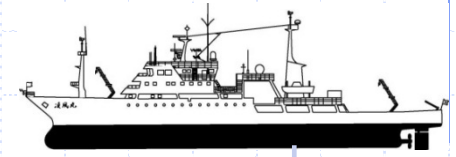
# ◆ 海の中のCO2はどうやって測る？

大気CO<sub>2</sub>



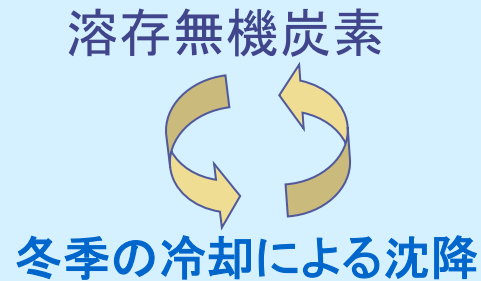
溶解

化学反応



表層

プランクトンによる  
利用



沈降

分解 溶解

中層、深層の流れ

溶存無機炭素

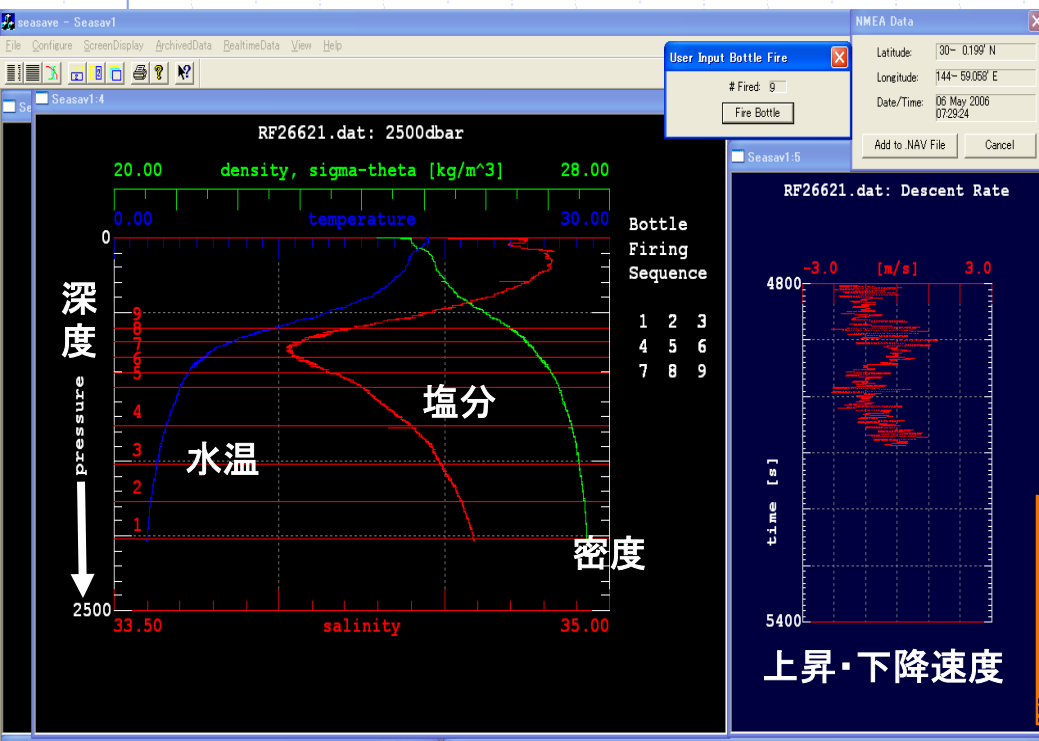


多筒採水器

中層・深層

- 水温
- 塩分
- 栄養塩
- 溶存無機炭素
- アルカリ度
- フロン
- 海面CO<sub>2</sub>濃度
- クロロフィル
- pH

# CTD観測・採水



センサーを海中に投入し、船上で監視しながら連続データを取得する。  
空中総重量は1トン。

採水



塩化マンガン水溶液、ヨウ化ナトリウム-水酸化ナトリウム水溶液をそれぞれ加え、褐色沈殿を生成させる



(数十分)



硫酸を加え沈殿を溶かす



## 溶存酸素分析の様子

遊離したヨウ素を試薬(チオ硫酸ナトリウム水溶液)の滴定により、遊離したヨウ素を測ることで酸素量を求める。(ウィンクラー法)



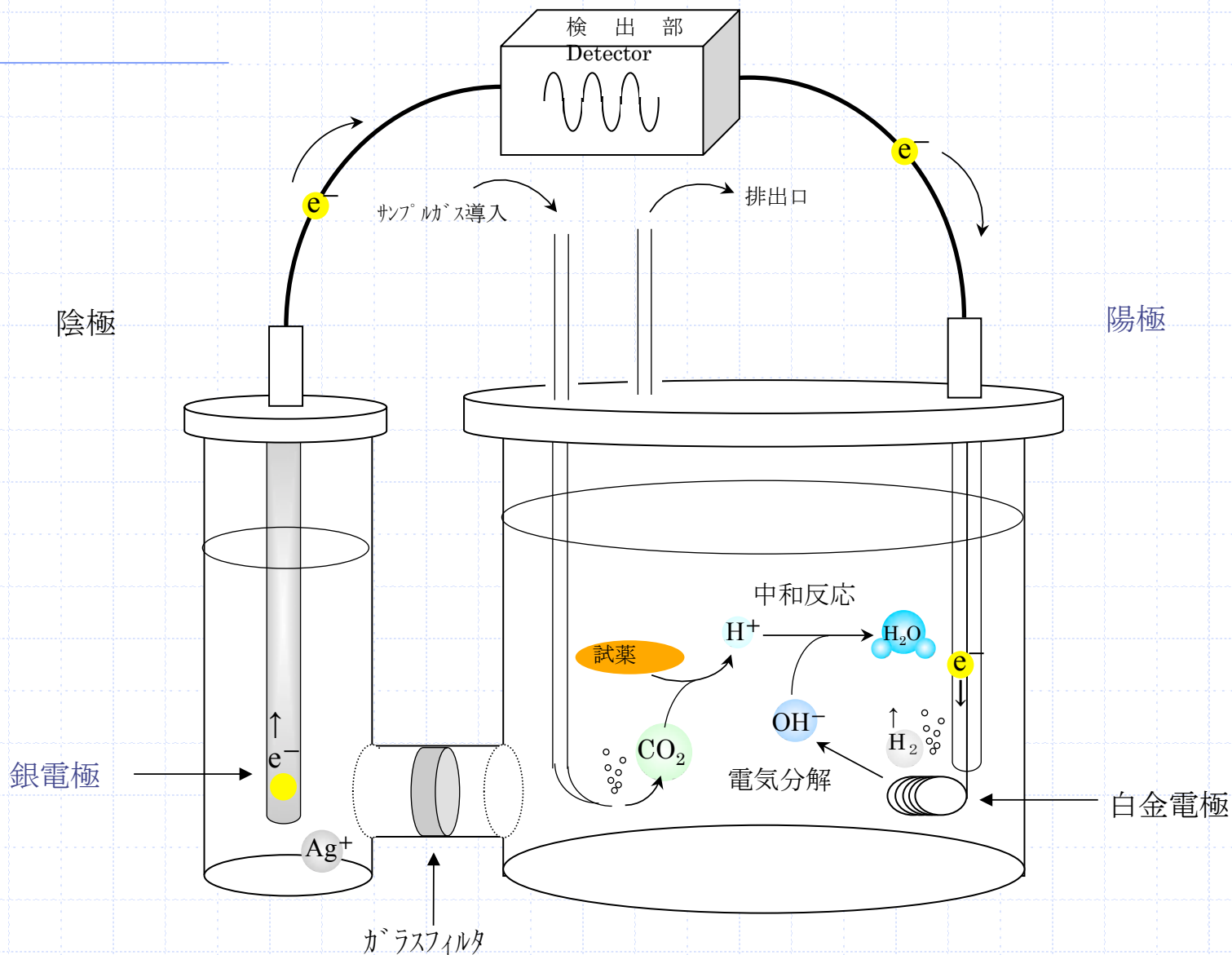
## 溶存無機炭素の測定

海水資料にリン酸を加えて強酸性にすることで、溶存無機炭素は全てが気体のCO<sub>2</sub>となる。これに窒素ガスを通すことで、海水から追い出すことができる。

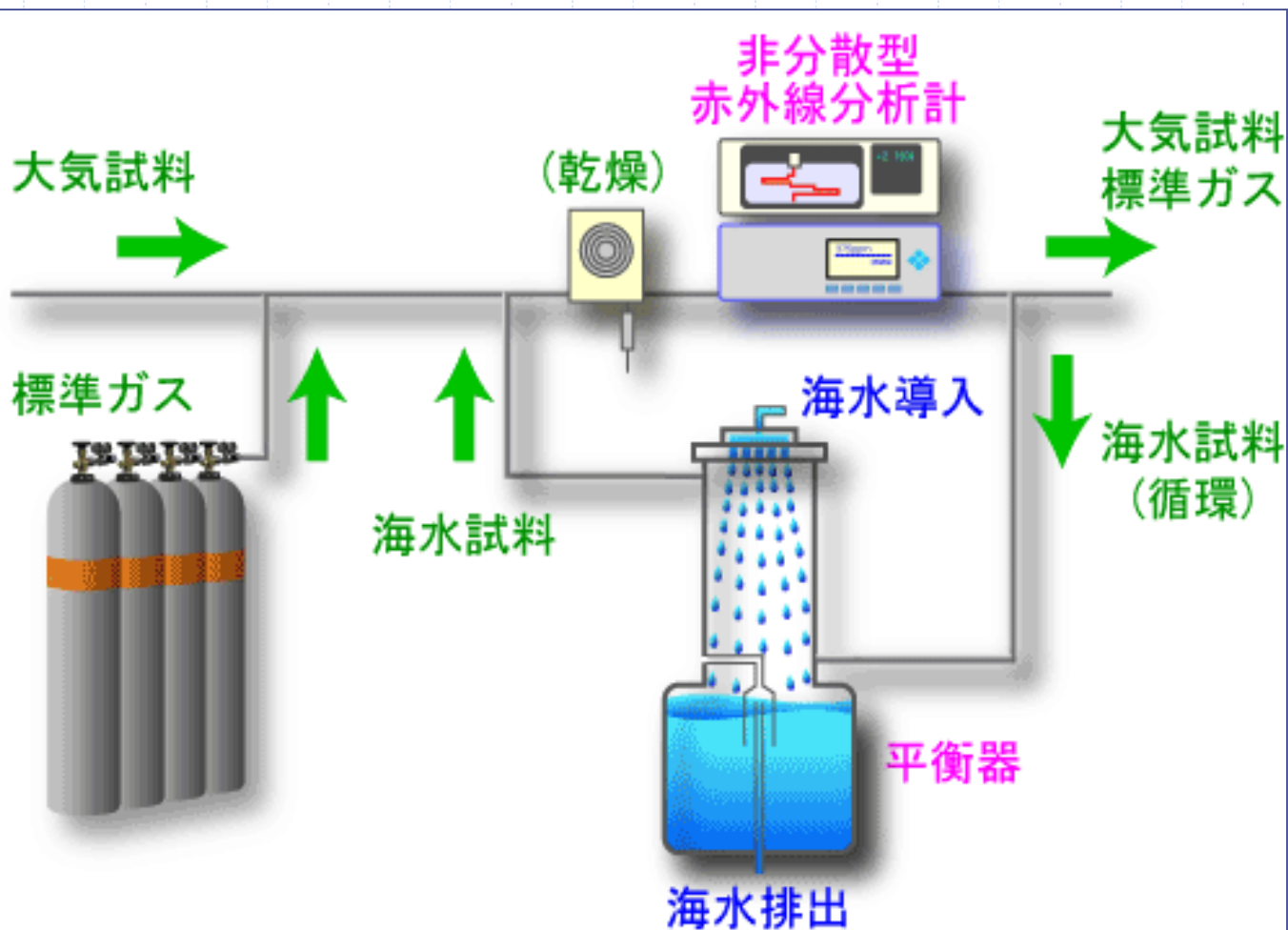
この窒素ガス中のCO<sub>2</sub>を電気分解の原理を応用した「電量滴定」法で測定する。



# 電量滴定法による全炭酸分析原理

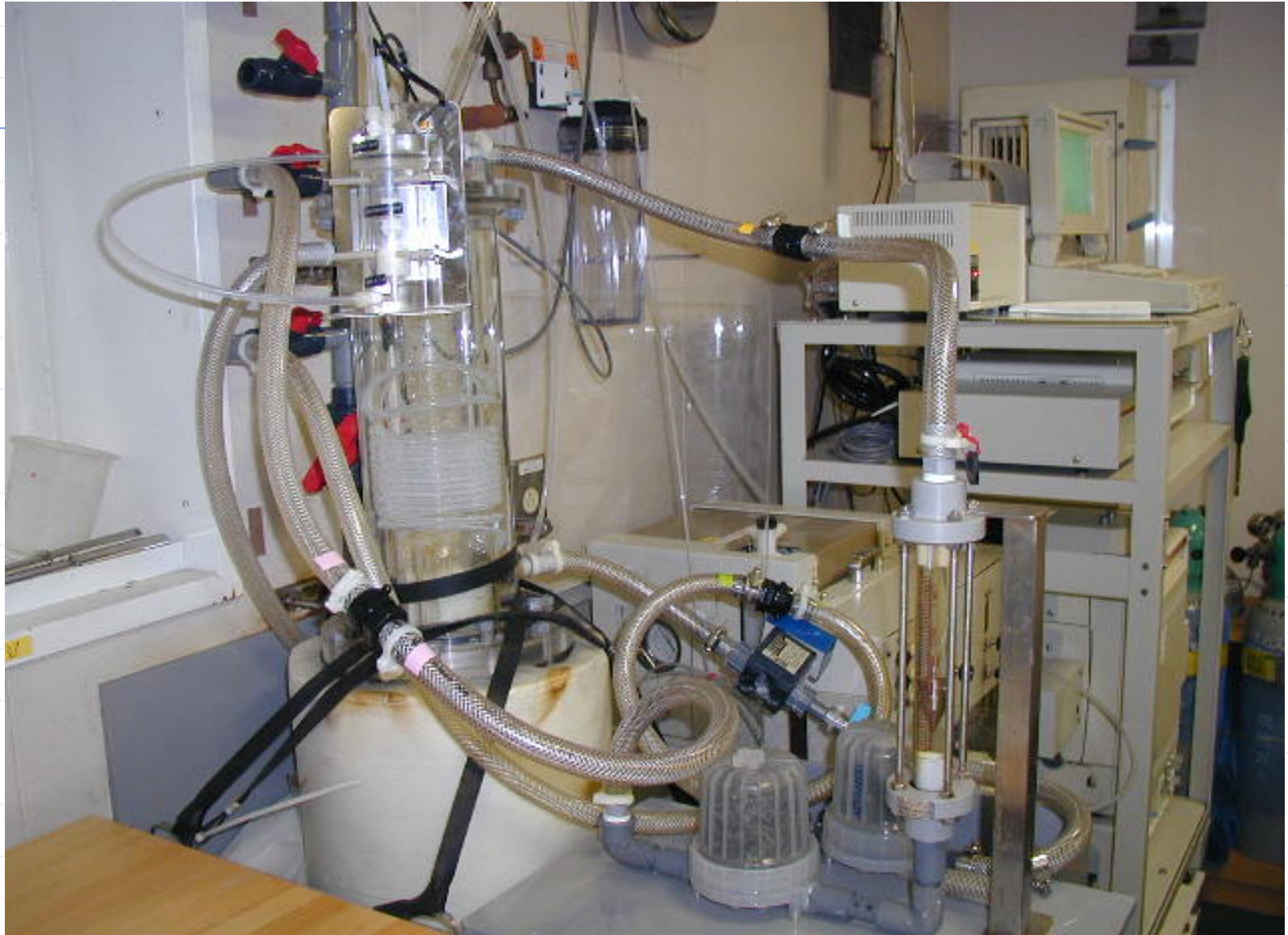


# 海面における二酸化炭素分圧(濃度)の測定



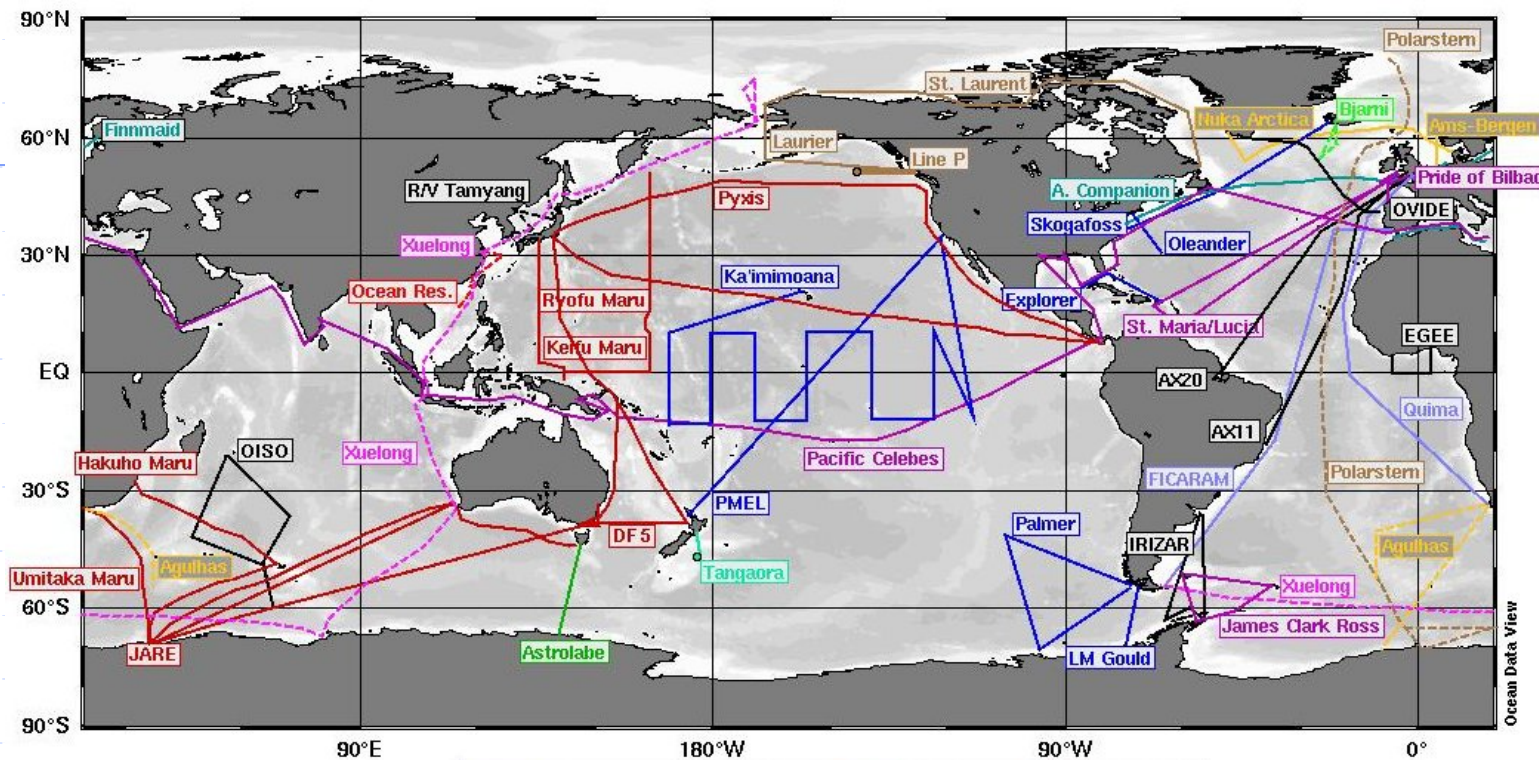
二酸化炭素には特定の波長の赤外線を吸収する性質がある。この吸収量は二酸化炭素の濃度に対応するので、標準ガスと試料ガスについて、吸収量を比較することで、試料ガス中の二酸化炭素濃度を測定できる。

# 平衡器 (凌風丸)



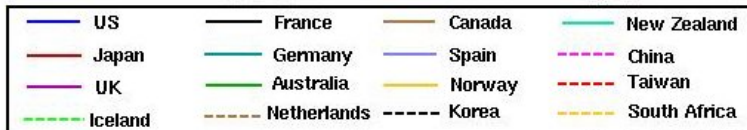
# 海面CO2濃度の観測網

海中に比べると、データ量が多い。

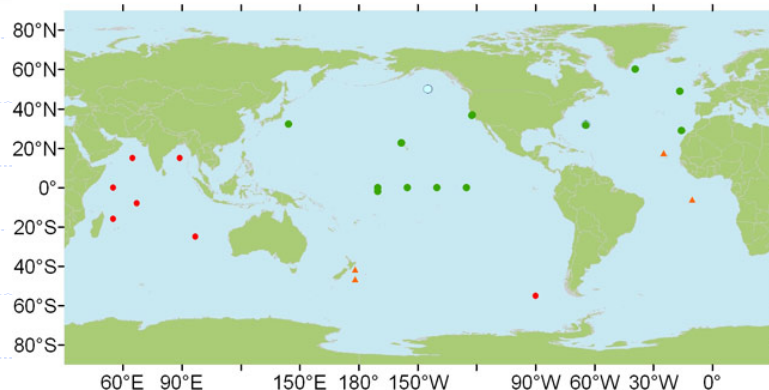


観測船やVOSによる定期的観測網

データ量 4000/月



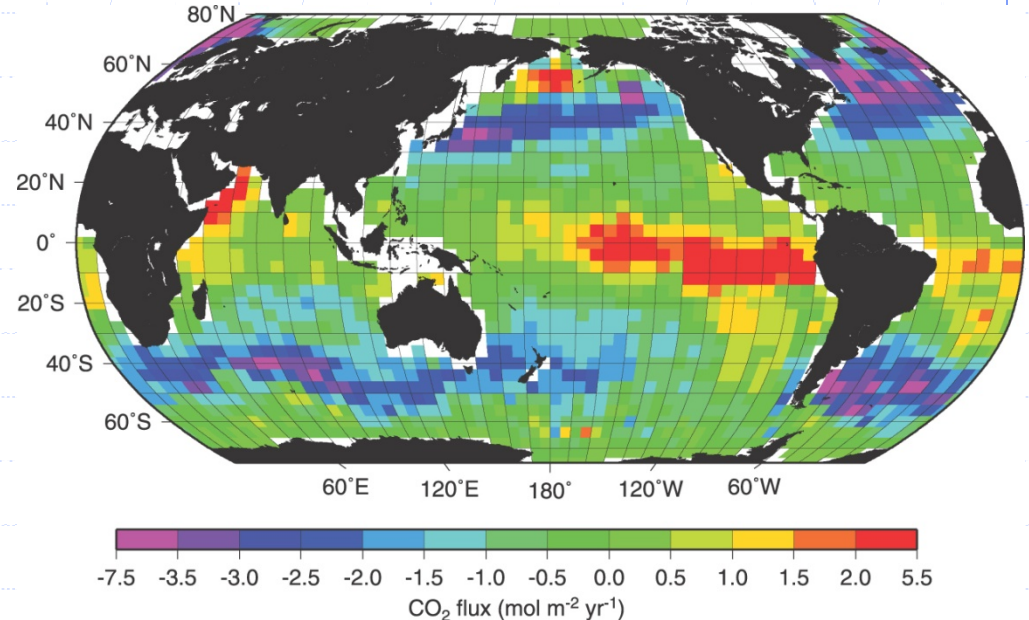
定置ブイによる連続観測



## ◆ 海への吸収や蓄積の現状は？

太平洋は赤道付近等での放出が多いため、面積(全海洋の5割弱)に対して吸収量は少なく、全海洋の約3割

大気-海洋間のCO<sub>2</sub>交換量の分布 IPCC AR4



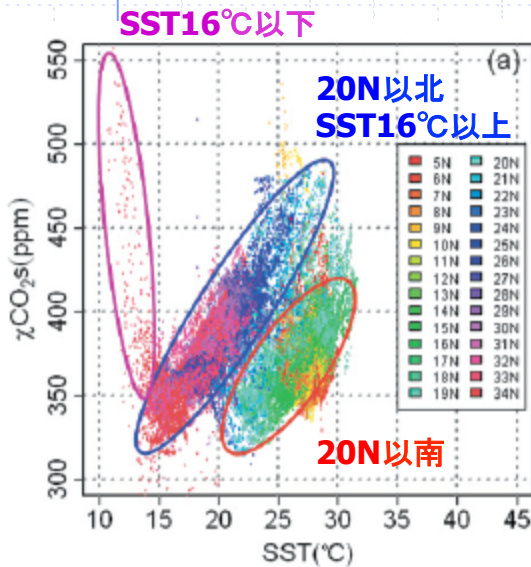
- ▶ 赤道域: 湧昇により表層のCO<sub>2</sub>濃度が高い→放出域
- ▶ 亜熱帯域: 主に海面水温の影響を受けてpCO<sub>2</sub>が季節変動、冬季に吸収量が多く、夏季に少ない
- ▶ 亜寒帯域: 冬季には強い鉛直混合のためpCO<sub>2</sub>が高く放出域、春季から秋季には生物活動が盛んになり、表面海水中のCO<sub>2</sub>が消費されて吸収域

## 大気-海洋間のCO2交換量の分布

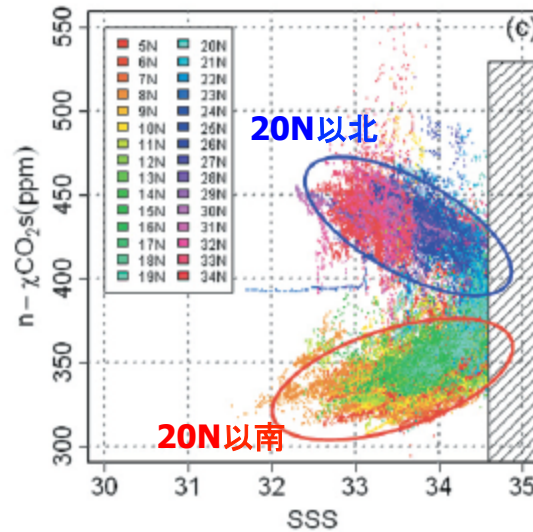
太平洋域のpCO<sub>2</sub>は、水温、塩分、クロロフィルと相関関係あり

⇒ 重回帰式により推定可能

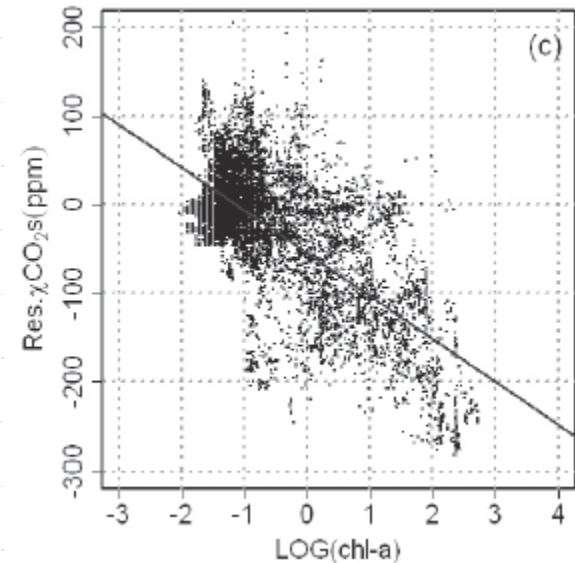
CO<sub>2</sub>交換量: 交換係数(海上風) × 分圧差



北太平洋亜熱帯域における  
SST-pCO<sub>2</sub>, SSS-n<sub>χ</sub>CO<sub>2</sub>の関係



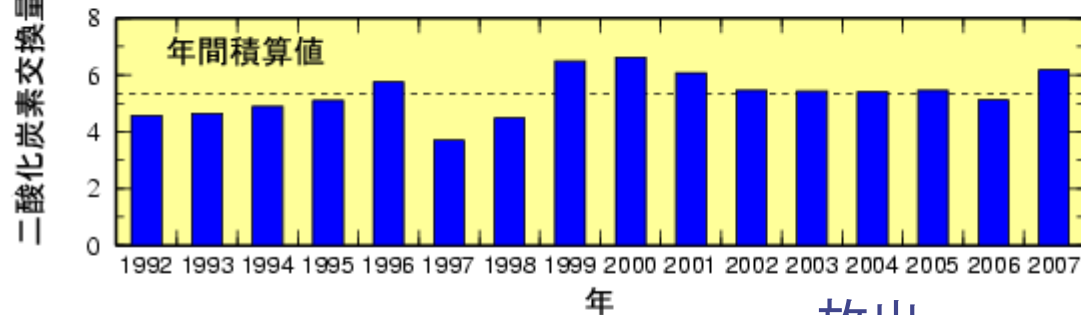
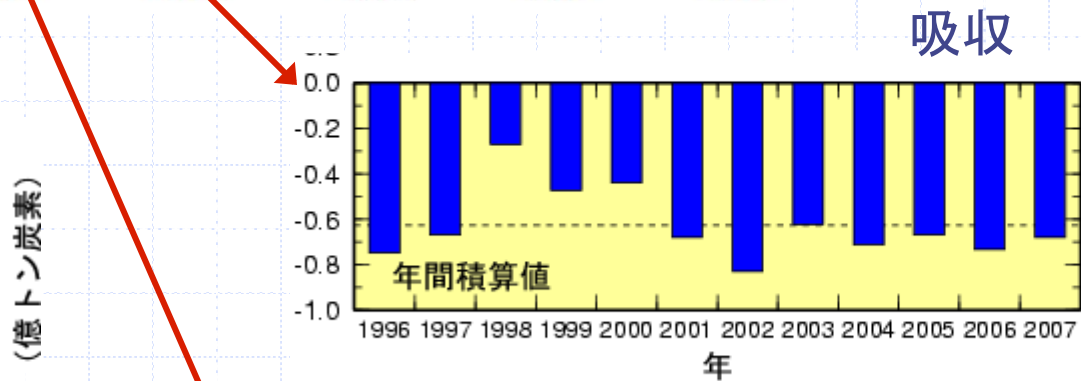
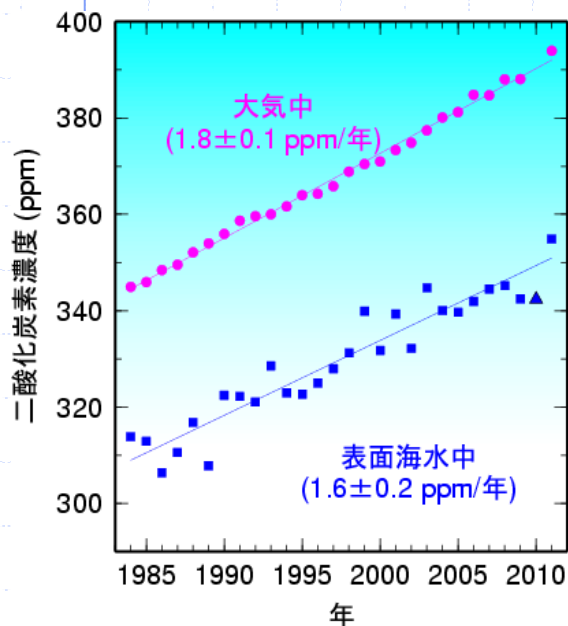
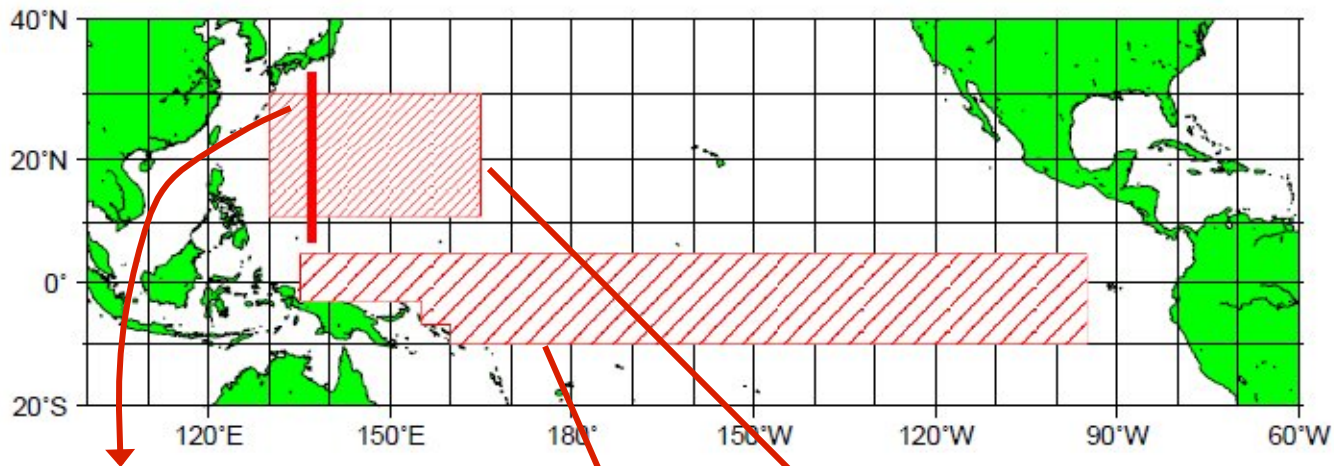
杉本・平石(2009)



北太平洋亜寒帯域における  
Chla-pCO<sub>2</sub>残差の関係

杉本・平石(2010)

# 海面CO2交換量の年々変化(気象庁)



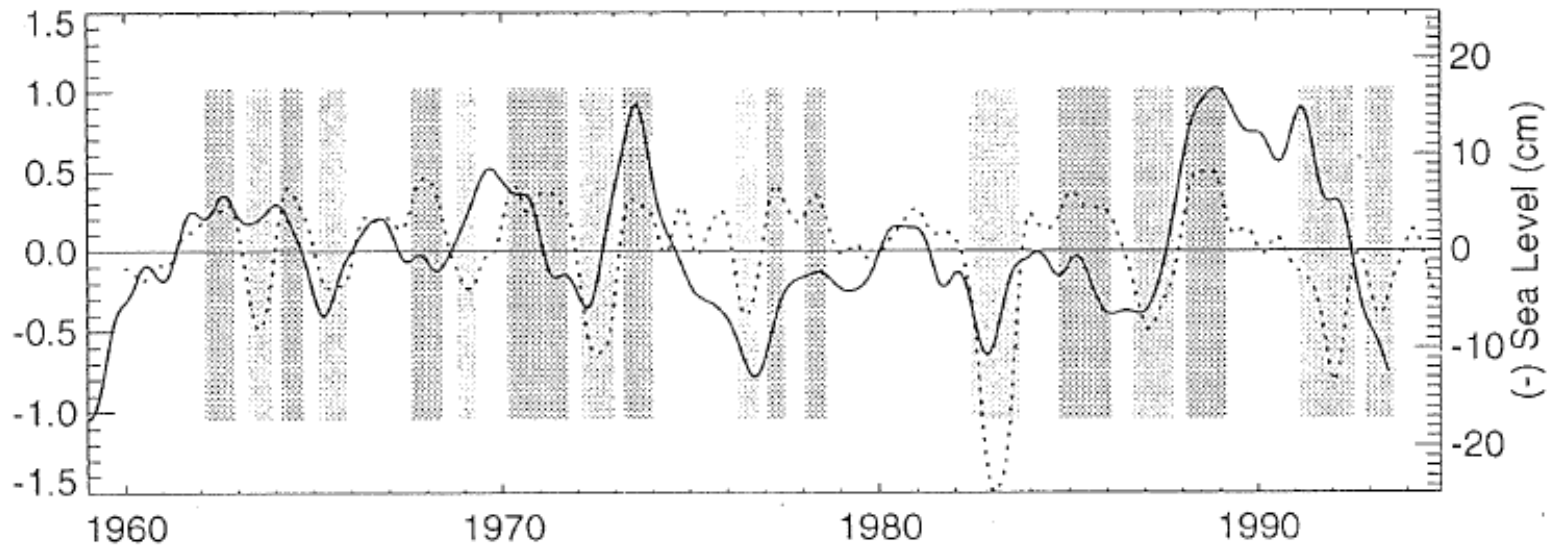
137度線における大気と海面のCO2濃度

吸収

放出

# 大気CO2へのエルニーニョの影響

赤道湧昇の弱まり ... 海からの放出減  
陸上植生の光合成の弱まり .. 陸への吸収減

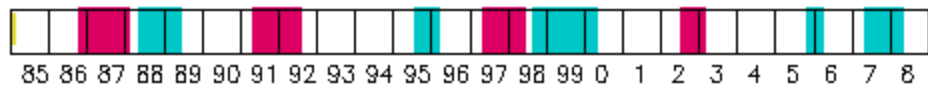


実線 水位  
破線 大気CO2

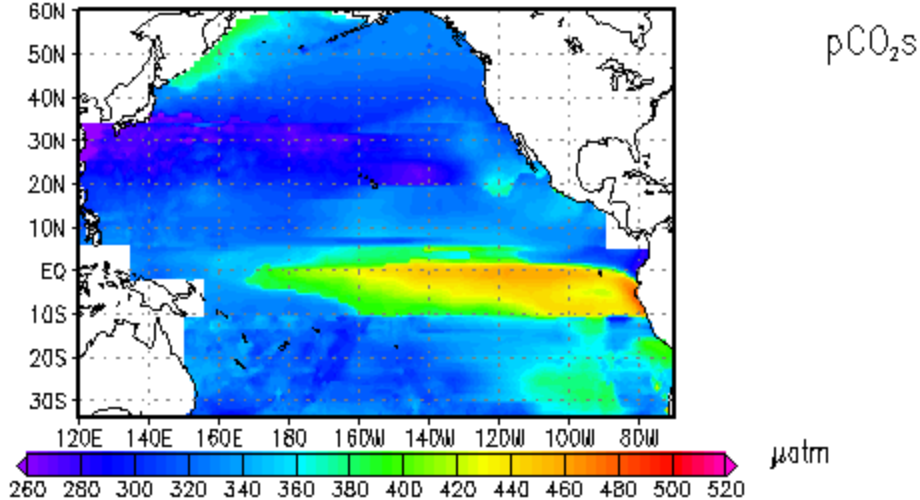


# 太平洋での交換量の年々変化

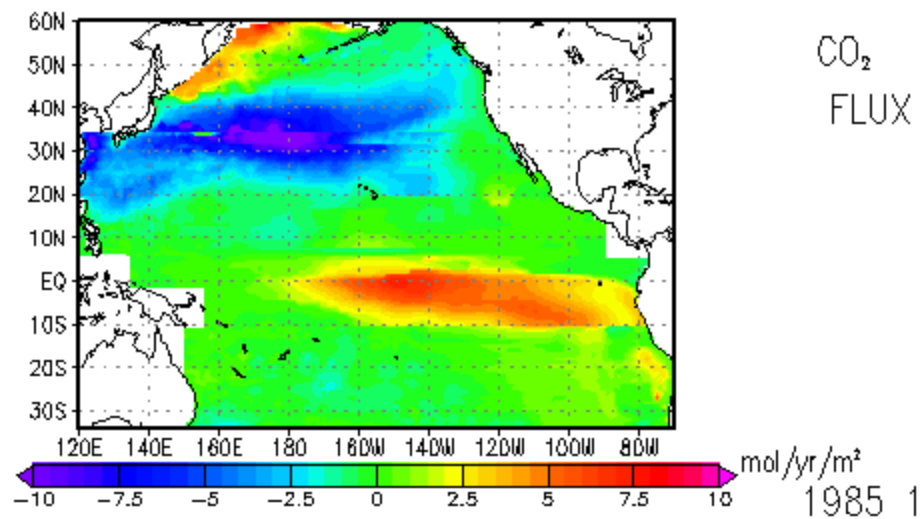
(気象庁・暫定版)



分圧差

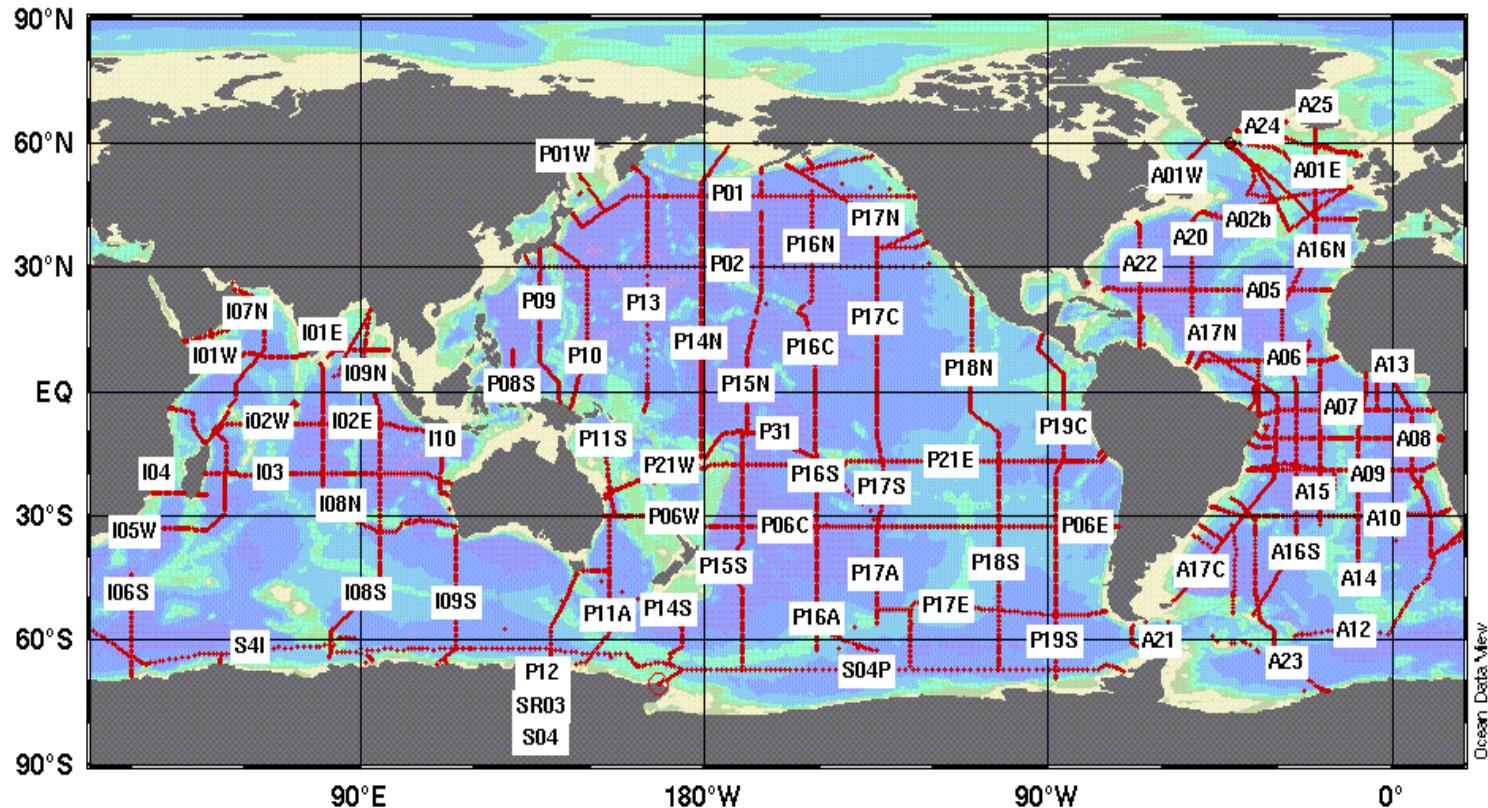


交換量



# 「海洋内部溶存無機炭素の蓄積」を把握する観測プロジェクト

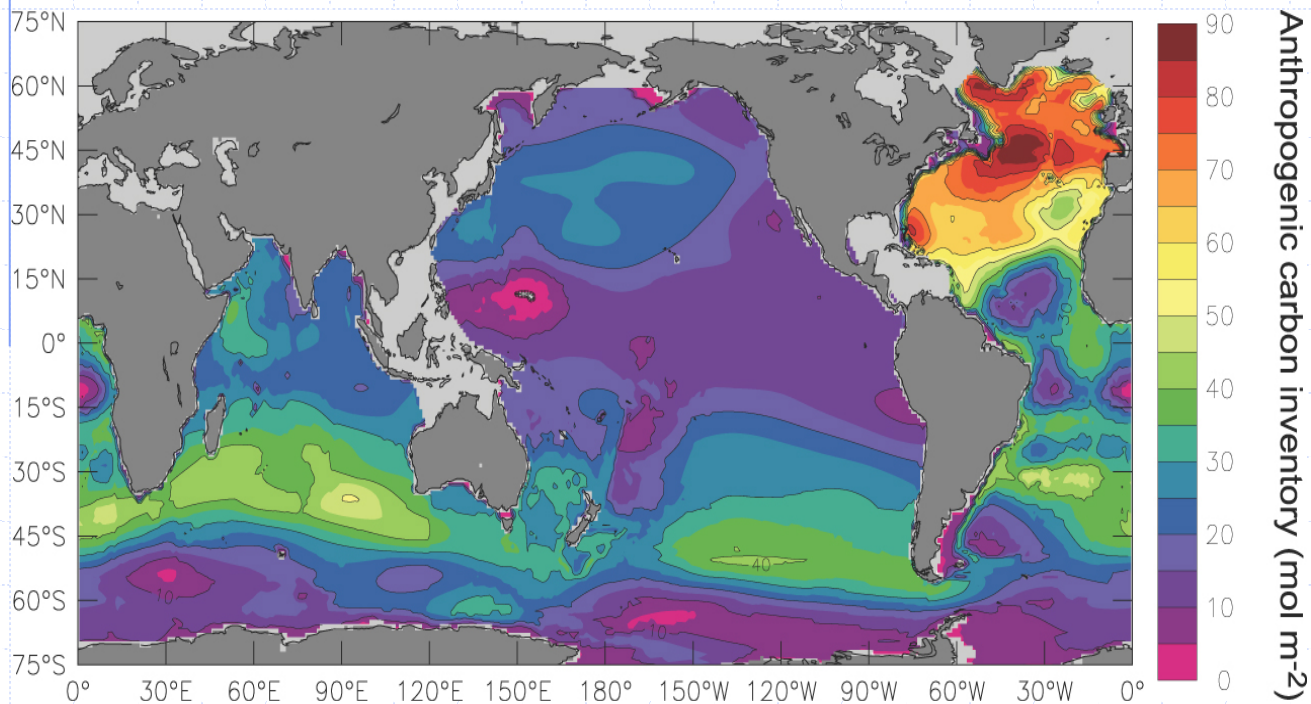
1990年代のWOCE(世界海洋循環実験計画)で海洋CO<sub>2</sub>関連物質が観測された測線



米国エネルギー省の二酸化炭素情報分析センター(CDIAC)  
によるデータアーカイブ 測点数 約5000

## ◆ 海への吸収や蓄積の現状は？

### 海洋内部への蓄積量の分布(水平分布) IPCC AR4

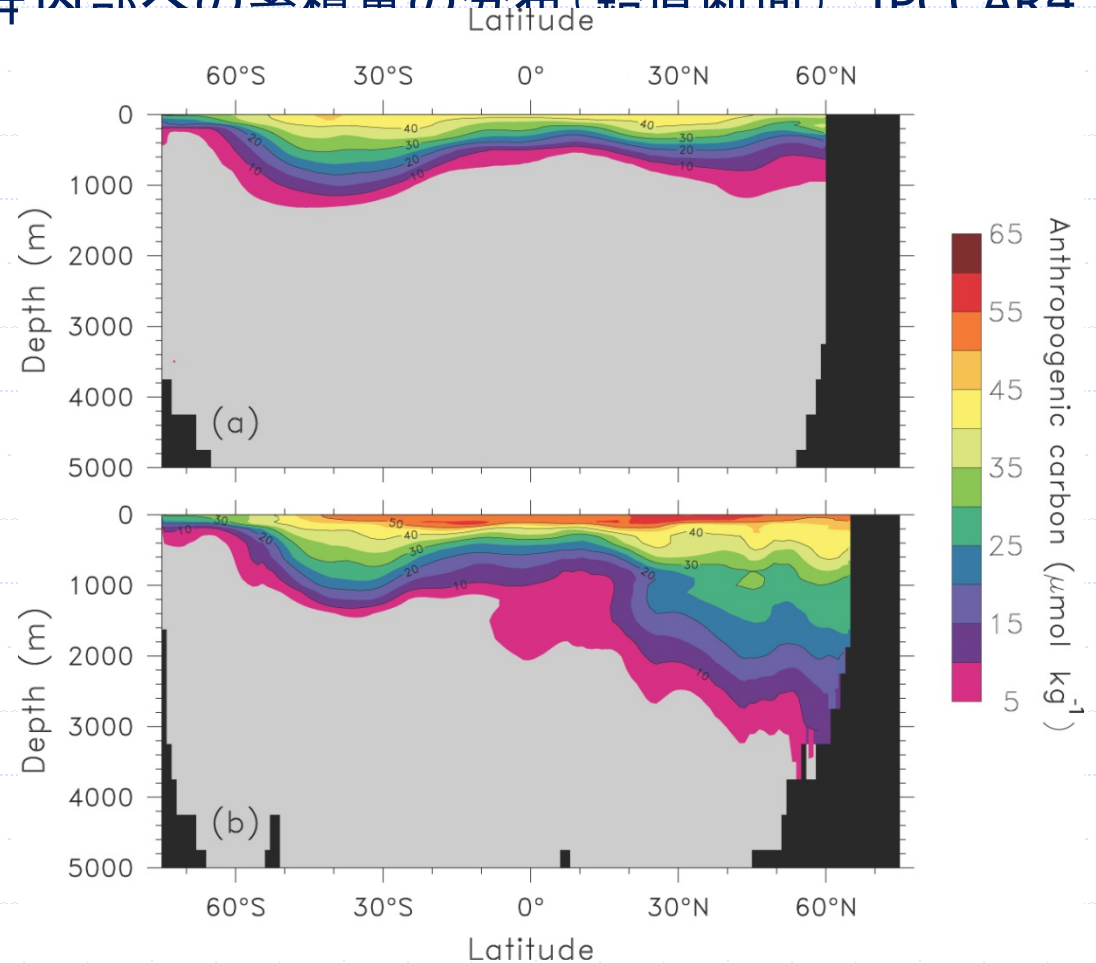


海洋全体で約1180億トン炭素 … 90年代まで  
(1750年以降の人為活動によるCO<sub>2</sub>排出量の約4割)

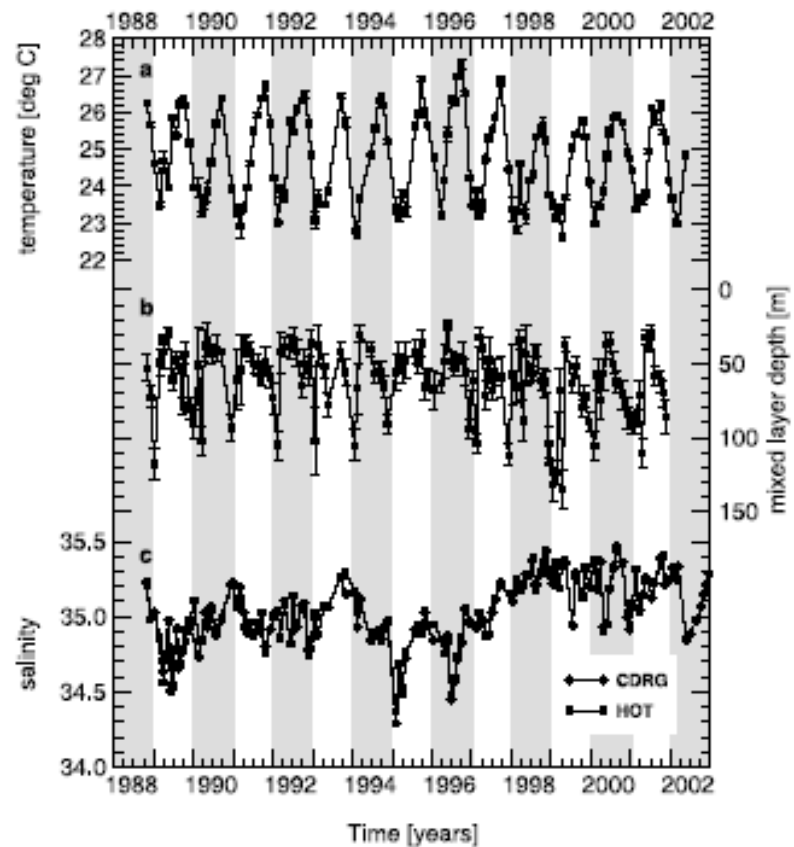
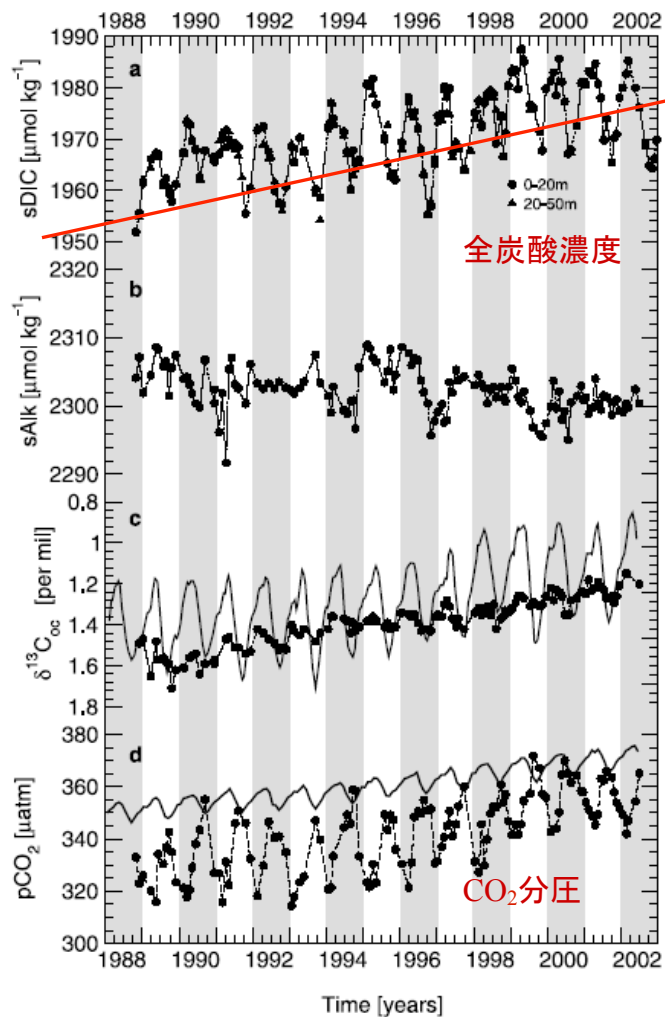
# ◆ 海への吸収や蓄積の現状は？

- ▶ 太平洋では今のところ表層(1000m深程度)まで人為起源CO<sub>2</sub>が蓄積
- ▶ 北大西洋では深層まで蓄積←深層水形成域(物理ポンプ)

海洋内部への蓄積量の分布(鉛直断面) IPCCAR4



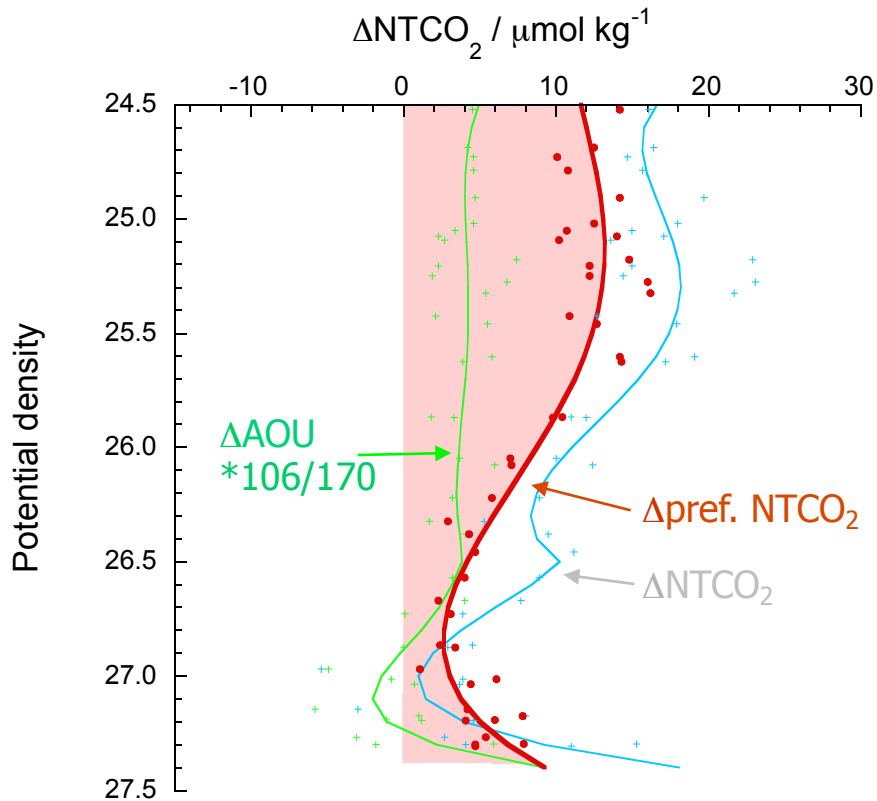
# ハワイ近海の定点ALOHAにおける表面水のCO<sub>2</sub>濃度の増加傾向



# 海洋各層における全炭酸濃度の増加

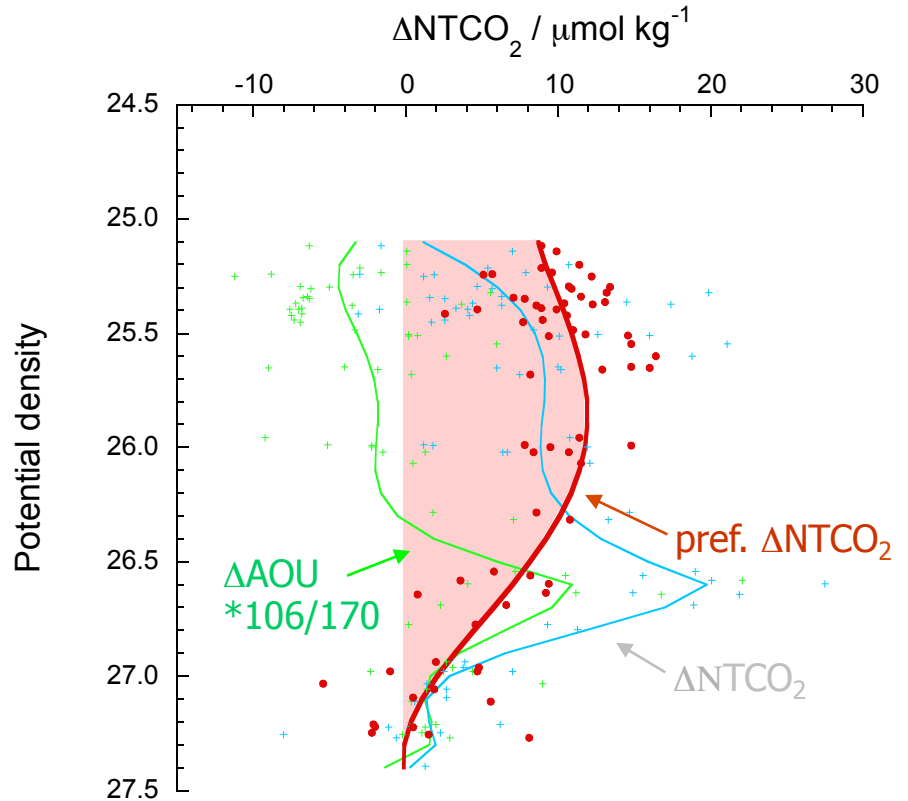
酸素の消費量(AOU)から海中の経過時間、全炭酸の変化量を計算、補正する。

137°E, 20°N-30°N



2003年 - 1994年

165°E, 24°N-34°N

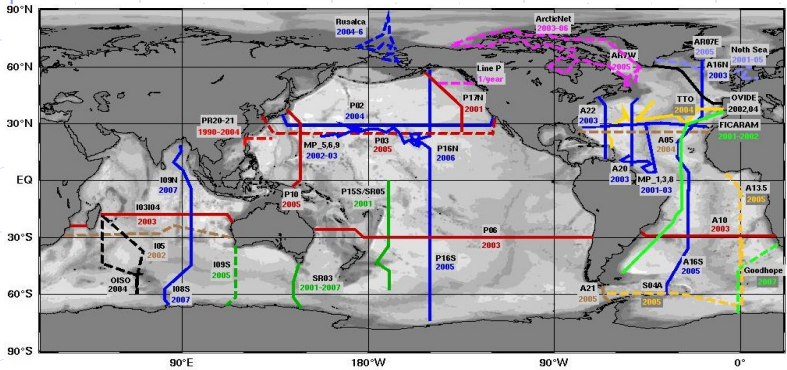


2003年 - 1992年

東経137度、東経165度ともに、海洋内部でも全炭酸濃度の顕著な増加が検出された。

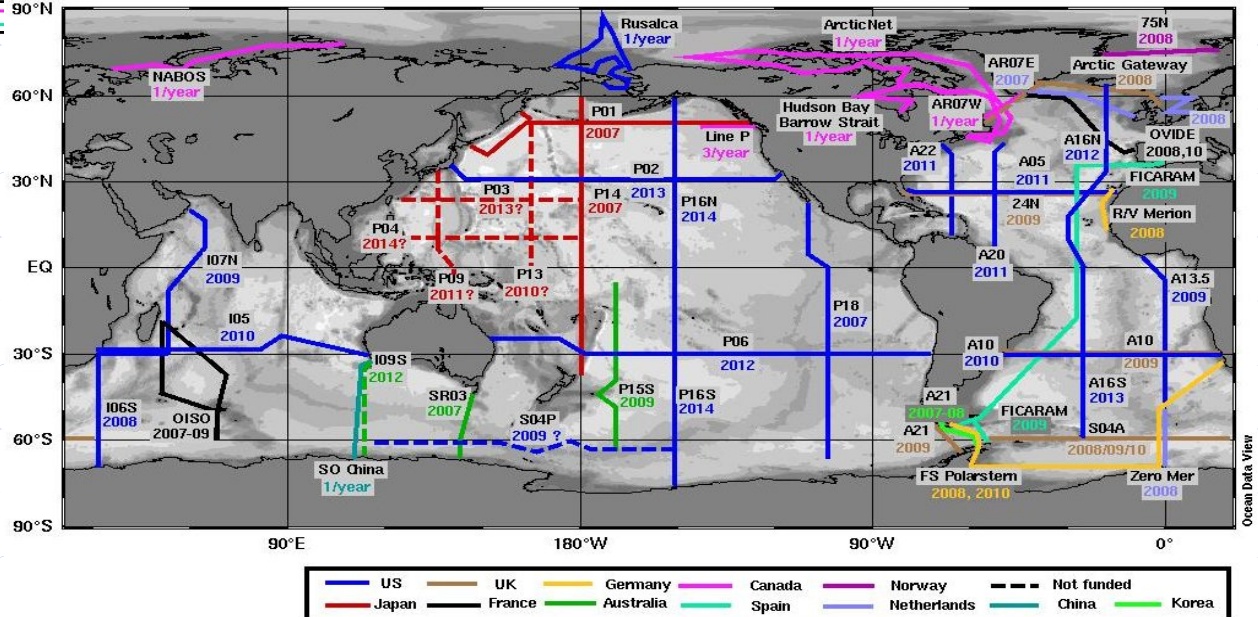
# 2000年代 WOCEライン再観測の国際共同 (IOCCP:国際海洋炭素調整プロジェクト:2002~, IOC, SCOR)

人為起源CO2蓄積量の増加、吸収能力の変化がターゲット



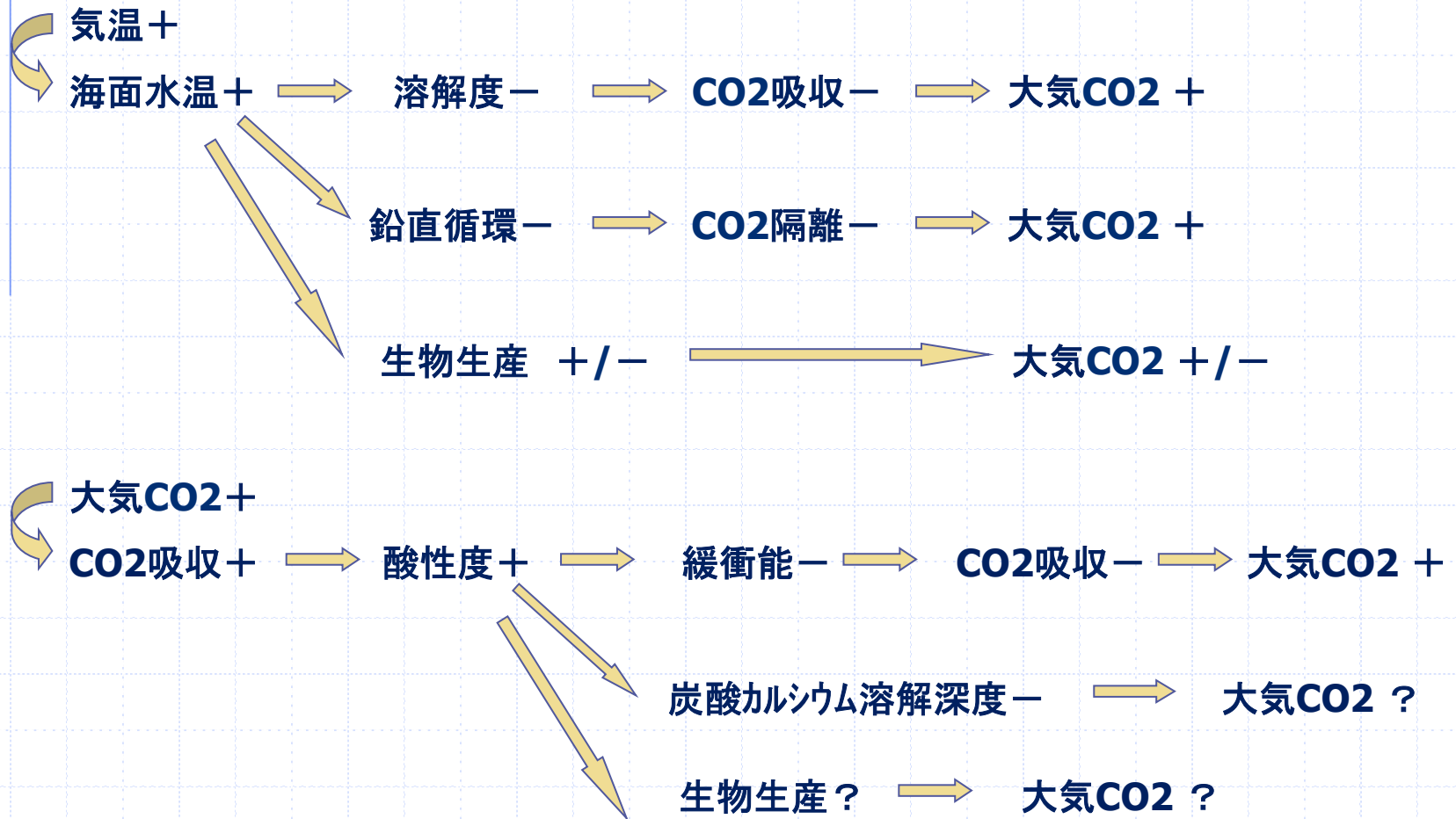
2001~07実績

2007年以降の  
各国の計画



# ◆ 今後の見通しは？

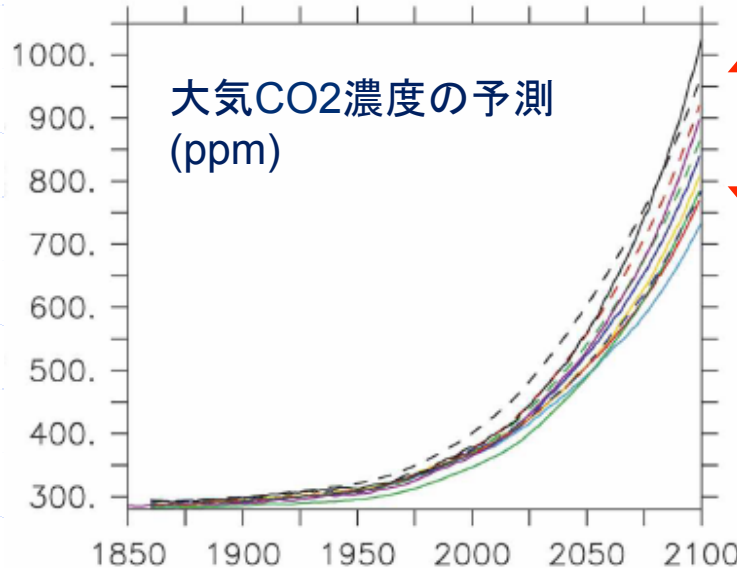
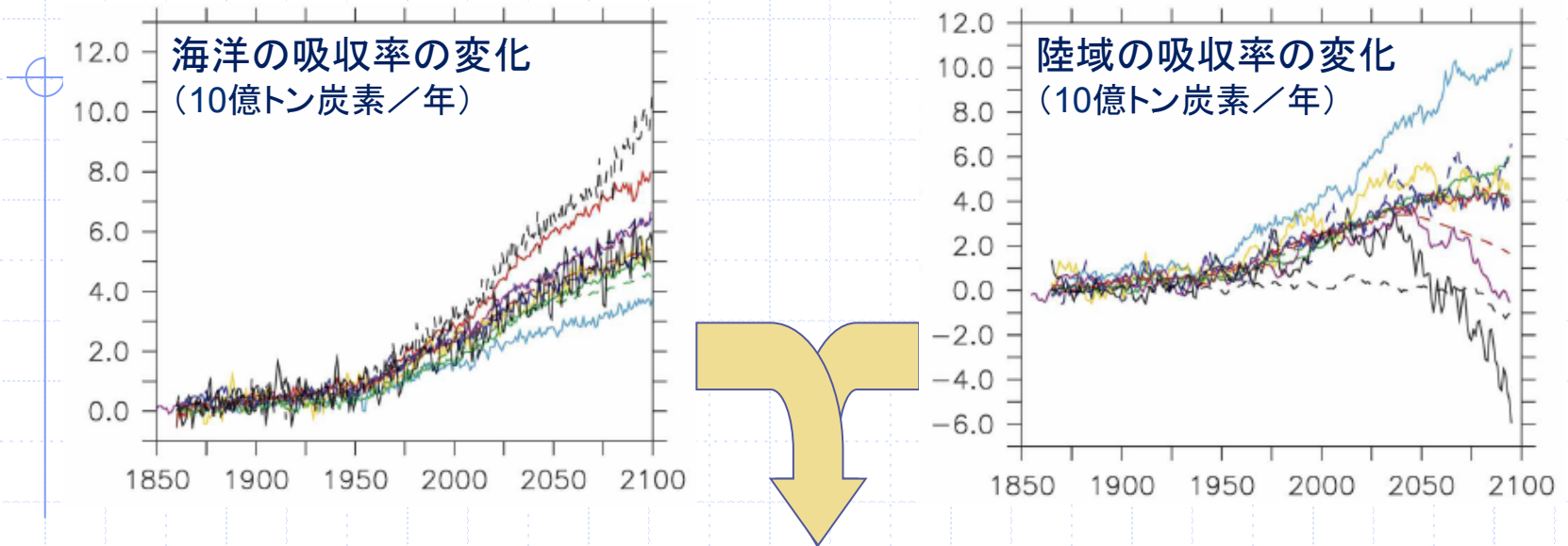
## 大気CO<sub>2</sub>の増加と温暖化による海洋炭素循環のフィードバック





# 気候－炭素サイクル結合モデル比較実験(C<sup>4</sup>MIP)の結果

世界中の11モデルによる、A2シナリオのCO<sub>2</sub>排出を使った予測計算(1850～2100年)



300ppmもの差

プラスされる温度上昇量の  
予測もばらつく

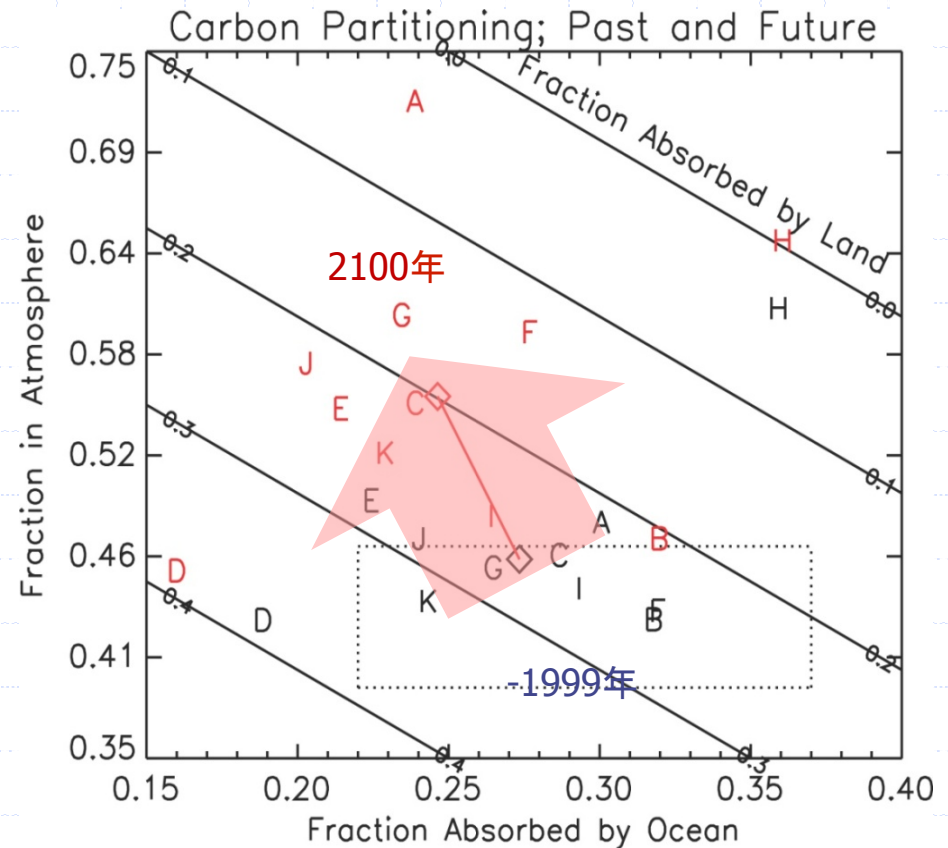
0.1～1.5°C

Friedlingstein ほか  
28名(2006)

## ◆ 今後の見通しは？

- ◆ 気候-炭素サイクル結合モデル比較実験(C4MIP)の結果は、どのモデルも大気中への残存率が増加すると予測している
- ◆ 海洋の吸収率低下は、主にCO<sub>2</sub>増加に伴う緩衝能力の低下による

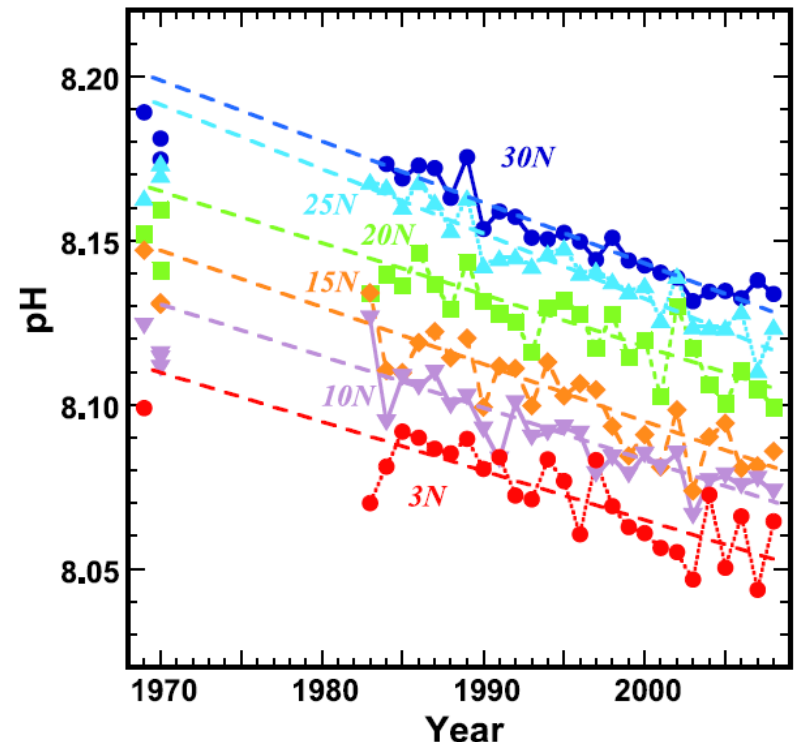
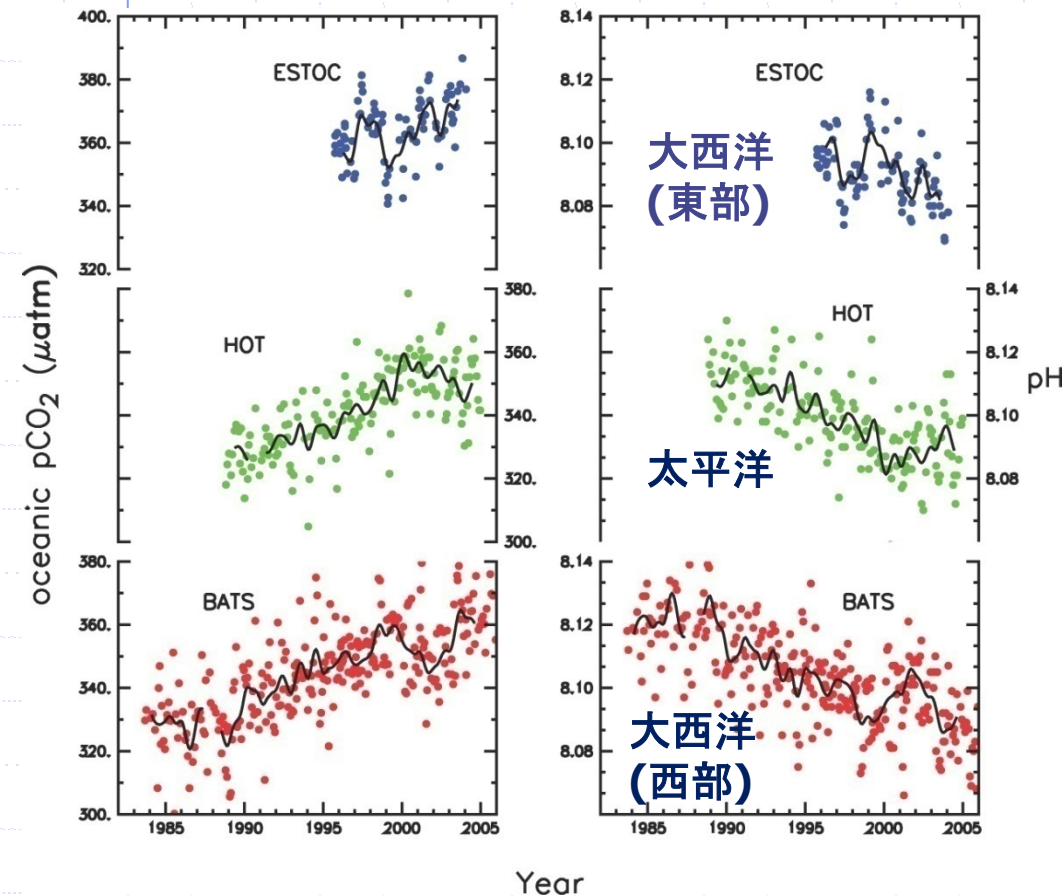
IPCC AR4



各文字はモデルの別を表す

# 酸性化は？ : pHの長期変化

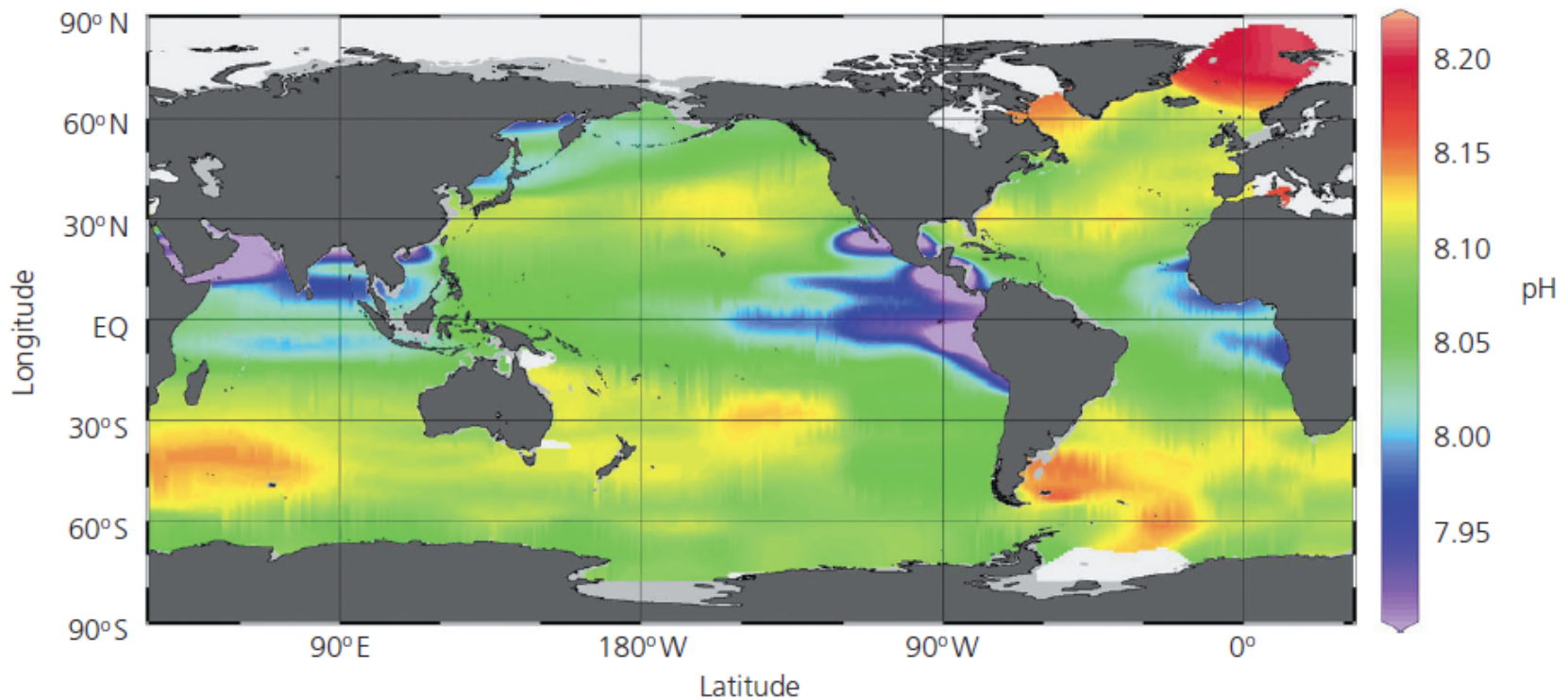
pCO<sub>2</sub>の上昇に伴いpHが低下 (~0.02/10年)



137E線でのpHの変化  
(Midorikawa et al., 2011)

# 酸性化は？

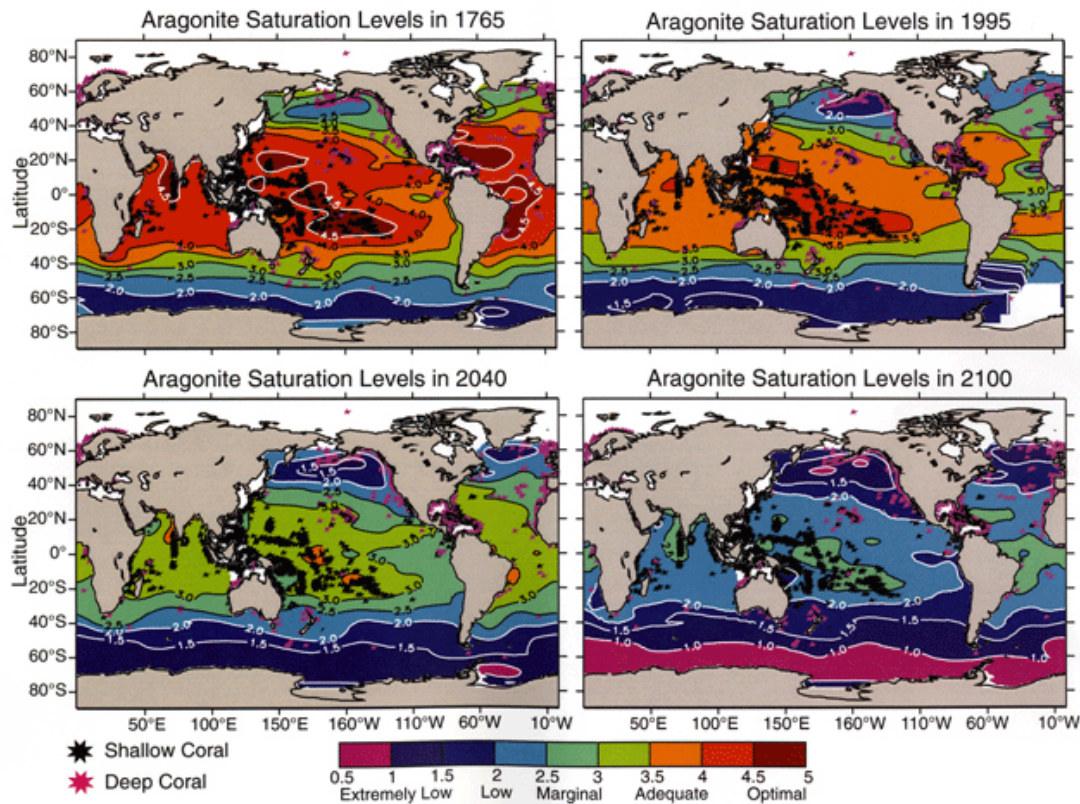
海洋のpHは湧昇域で低く、一次生産の活発な海域で高い



混合層内(海面から50m深)でのpHの分布(1994年に正規化) IPCC AR4

# 酸性化

2100年には南大洋、亜寒帯域で飽和度がかなり低下



Feely et al. (2006)

## おわりに

- ◆ 炭素循環における海洋の役割大(最大の貯蔵庫)
- ◆ 海のCO<sub>2</sub>観測では観測船による海洋観測が主役。  
物理・生物・化学過程が混在し採水による精密測定が必要。
- ◆ 海洋は人為起源のCO<sub>2</sub>を吸収・蓄積している
- ◆ 海洋のCO<sub>2</sub>吸収能力は、温暖化に対し正のフィードバックがあると予想されている
- ◆ 海洋のCO<sub>2</sub>吸収＝海洋酸性化⇒緩衝能力(＝吸収能力)の低下、生態系への影響懸念