12. 海洋貧酸素化，海洋酸性化，海洋貧栄養化

見延　庄士郎（海洋気候物理学研究室）

本日の内容

- これまでは，ほぼ純粋に物理的な気候変動・変化を扱ってきた．
- しかし，物理的な気候変動・変化は，物理領域にとどまらず，生物地球化学そして生態系にも重要な影響を与える．
- 本日は，地球温暖化がもたらす３つの重要な海洋の物理領域にとどまらない変化，すなわち，海洋貧酸素化，海洋貧栄養化，海洋酸性化について説明しよう．

第11回まとめ，その１

- 温帯低気圧発生の基本的なメカニズムは，[　　]不安定である．
- この場合，東西風速に[　　]の速度差があり，また 温度風の関係から，南北に[　　]差が生じている．
- 傾圧不安定は，この南北の温度差を小さくする働きがあり，すなわち地球の南北[　　]輸送に重要な役割を担っている．
- 傾圧不安定のエネルギー源は，南北温度差に伴う[　　]エネルギーである．
- 低気圧が発達する時点では，上空の気圧の谷が地表の低気圧の[　　]側に位置する．

第11回まとめ，その２

- 水蒸気の凝結加熱も，気圧低下に寄与することがあり，特に[　　]低気圧について研究がなされている．
- その水蒸気を低気圧に供給する気流として，暖気側からの気流である[　　]，温暖前線の東側の寒気側からの気流である[　　]が重要であると考えられている．
- 南岸低気圧は，沖合を（八丈島付近）を通過するほうが，関東に[　　]をもたらしやすいといわれている．
- 東シナ海で発生した南岸低気圧は，黒潮が[　　]すると，沖合を通過し，首都圏に[　　]をもたらしやすくなる．

塩分について

水温の次に塩分も密度に重要

Wikipedia より

- 海水の塩分の約１０倍ある，ここはどこでしょう？

塩分とは？1/2

- 塩分：
.
- つまり，H_2O以外で，海水の重さに影響する成分の質量．
- 塩分：標準液との電気伝導度の比率で表すのが，2010年までの正式な塩分の定義で今でもよく使われている．
- 塩分を高精度で測定するのかは難しい．
- 国際的な「塩分」の定義と，標準的な測定方法は，時代とともに高度化してきた．年に最新の定義が決まった（その前は1978年）

塩分とは？ 2/2

– 世界の海洋の平均塩分＝(g/kg)

- 絶対塩分はSI単位系では．単位は付けないか，国際SI単位系の質量分率(parts per thousand,).
- かつては塩分の，1000分の1を意味する(パーミル)を単位として使用していた．また，(practical salinity unit)を単位であるかのように使うこともあった．

主要な溶存物質

まず陽イオン3つの名前・化学式，
次に陰イオン3つの名前・化学式
を言ってみよう．

陽イオン			陰イオン		
名前	化学式	重量比 (g/kg)	名前	化学式	重量比 (g/kg)
イオン		10.77	イオン		19.34
イオン		1.29	イオン		2.71
イオン		0.41	イオン		0.142

海洋酸性化に重要

溶存酸素と海洋貧酸素化

酸素の生産

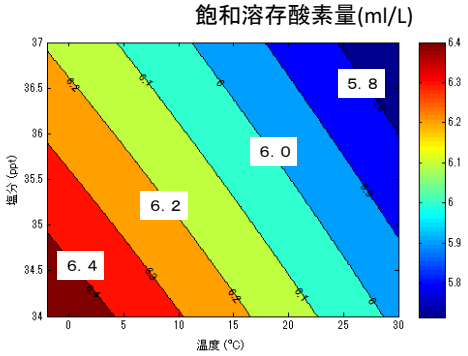
- 海洋は地球の植物による酸素の生産のおよそ，を担う．
- 海洋の酸素生産はほぼ，の光合成による．海藻の貢献はわずか．
- 光合成に必要な光は，たかだか深度mまでしか到達しない．この層をという．
- 光合成には光に加えて，栄養素（，，，）が必要で，沿岸域以外は深い層からの湧と が栄養素の供給を担う．

酸素の行方

- 大気の酸素は，海水に溶け，になる．
- 表面海水は，溶存酸素でしている．
- 下図から，海洋表面の飽和溶存酸素量は，まずにそして次にに依存する．

＊水温が 低 いほど，酸素が溶ける．

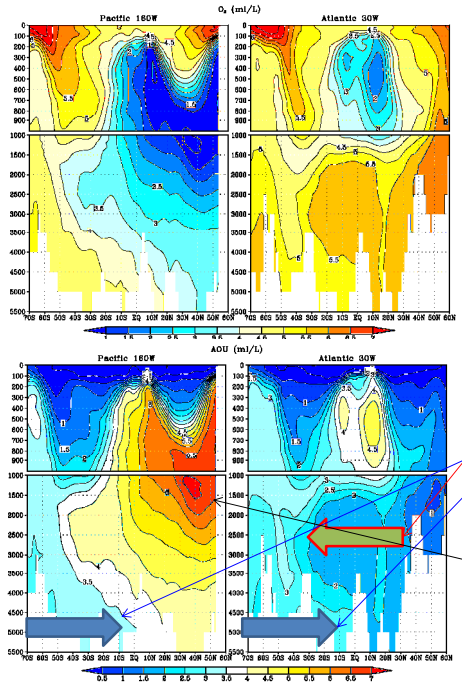
＊有光層以深では，生物活動（，）で酸素は消費されるので，時間が経つにつれて酸素はる．



AOU（エーオーユー）

- 有光層以深で酸素が時間経過とともに増えるということから，酸素の消費量を見れば，海水が [　　] を推測する手掛かりになる．
- そこで，[　　] (apparent oxygen utilization, [　　] という量を使う
- AOU= [　　]
- AOUが大きいほど，海洋表面にあった時点からの時間が [　　]，つまり古 い水である．

溶存酸素とAOUの分布



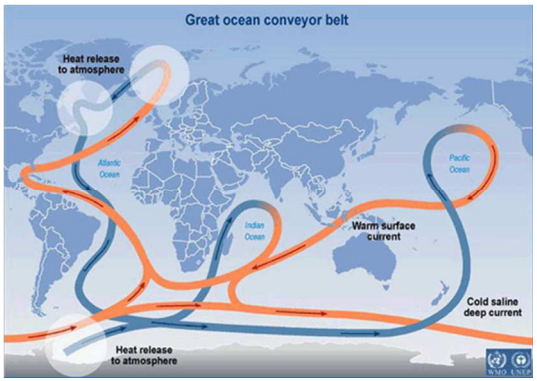
＊ [　　] 水，

＊ [　　] 水

＊ は新しい水であることがAOUで分かる．

＊ 北太平洋の中深層には [　　] い水がある．

海洋コンベヤー・ベルト

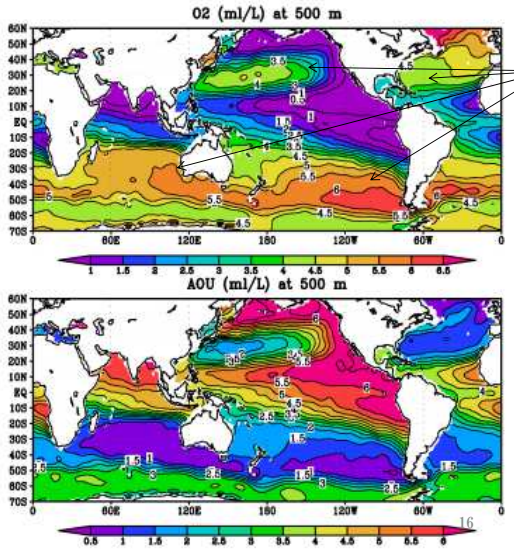


IPCC

オレンジの帯：表層の循環
青い帯：深層の循環

AOU，温度・塩分の分布などから，海洋の深層循環と表層循環との関係は，[　　] として理解されている．深層への沈み込みは，南極周辺（図には1か所しかないが3か所．），と北大西洋で，北太平洋は逆に深層から表層に湧き上がっている．

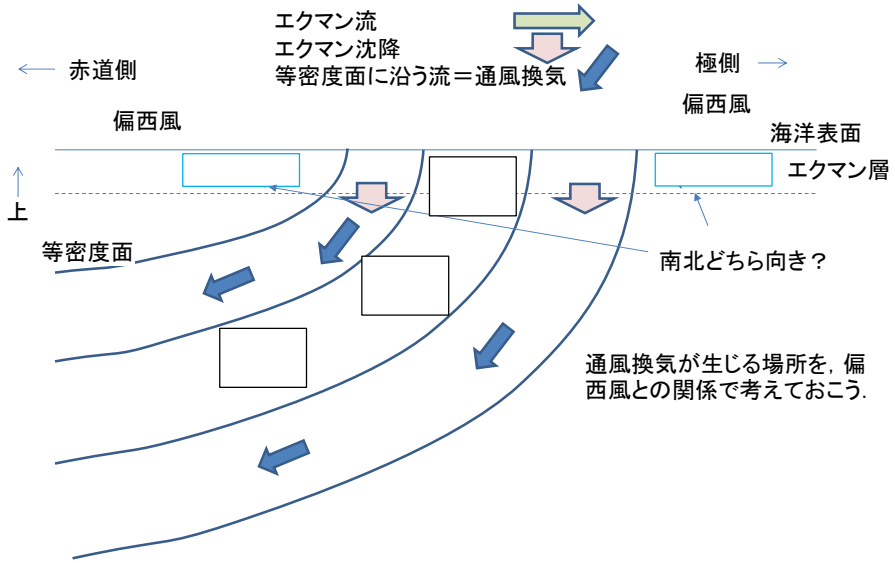
亜表層の通風換気



＊ 表面よりちょっと深い亜表層（水深数百m)に，酸素が比較的多く，AOUが小さいつまり [　　] 海水がある．

＊ これは表面から比較的速く，そこに水が送り込まれていることを意味する．これを [　　] ([　　])という．

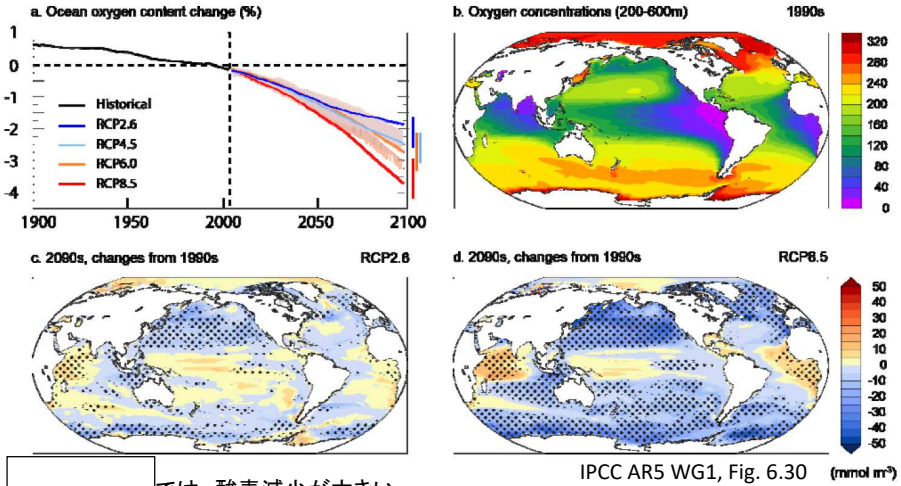
亜熱帯循環域に通風換気をもたらすメカニズム



Ocean deoxygenation

- 地球が温暖化すると，海洋中の溶存酸素濃度は全体として，[　　]することが予想されている．これを，ocean [　　]直訳は，海洋[　]酸素化，普通は海洋[　　]と訳される）と言って，現在非常に注目されている．
- そうなる理由は大きくは二つある．考えてみよう．
- [　　]

酸素の将来



IPCC AR5 WG1, Fig. 6.30

[　　]では，酸素減少が大きい．

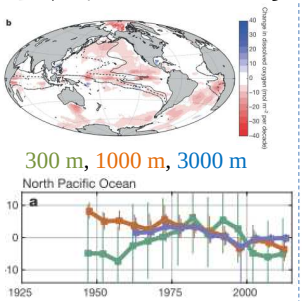
溶存酸素が飽和している表面の酸素減少は，ほとんど温度変化で決まる．亜表層では海洋の循環や通風換気も重要．

酸素の過去50-60年の変化

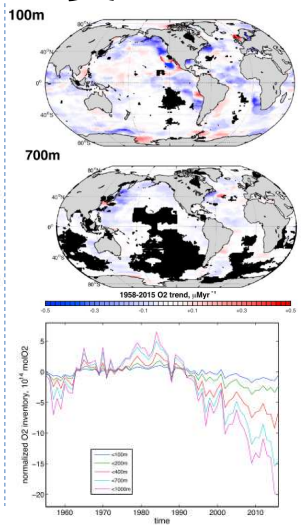
Table 1 | Oxygen content and change per basin

Basin	Oxygen content (Pmol)	Oxygen change (Tmol per decade)	Change as percentage of global change	Volume as percentage of global ocean volume
Arctic Ocean	4.7±0.2	−73±30	7.6±3.1	1.2
North Atlantic	26.9±0.1	−9±19	0.9±1.9	8.5
Equatorial Atlantic	15.9±0.0	−72±20	7.5±2.1	5.7
South Atlantic	22.4±0.1	−119±27	12.4±2.8	7.8
North Pacific	24.5±0.1	−173±40	18.0±4.2	16.3
Equatorial Pacific	25.5±0.4	−210±125	21.9±13.0	16.3
South Pacific	33.1±0.1	−71±37	7.4±3.9	14.3
Equatorial Indian Ocean	10.7±0.1	−55±49	5.7±5.1	6.6
South Indian Ocean	26.1±0.1	−27±34	2.8±3.5	10.2
Southern Ocean	37.6±0.1	−152±47	15.8±4.9	13.1
Total	**227.4±1.1**	**−961±429**	**100**	**100**

Trends that are more significant than two standard errors are marked in light grey. See Extended Data Table 1 for an extended version of this table.



Schmidtko, Stramma, Visbeck (2017 Nature)



Ito, Minobe, Long, Deutsch (2017 GRL)

- 2017年に出版された二つの論文で過去50-60年にすでに統計的に有意な減少が生じていたことが明らかになった．
- 減少が大きい北太平洋の，深度100 mでは[　]部北太平洋で，700 mでは[　]部北太平洋で大きな減少を示す．

過去の酸素減少の見積もりは，研究グループで大きく違う

IPCC2019特別報告書
変化する気候における海洋と雪氷圏

Table 5.2 | Observed oxygen changes for the period 1970–2010 for 6 different layers within the ocean. The changes are shown as percentage change of global averages. The layers are depths 0–100, 100–600, 0–1000, and 600–bottom are in metres. The oxygen minimum zone (OMZ) is defined as the ocean volume change that is less than 80 mmol L^{-1}. The estimates and confidence intervals are based published papers (Schmidtko et al. 2018, Ito et al. 2017 and Helm et al. 2011). The assessed change is the average of the available estimates and the 90% Confidence Interval (CI) combines the confidence as their standard deviation with two degrees of freedom.

		Schmidtko		Ito		Helm		Assessed Change	
Layer	Period	Change	90 CI	Change	90 CI	Change	90 CI	Change	90 CI
0–100	1970–2010	−0.38%	±1.06%	−1.65%	±0.63%	−1.30%	±0.54%	−1.11%	±0.95%
100–600	1970–2010	−1.06%	±1.36%	−3.17%	±1.34%	−2.04%	±0.60%	−2.09%	±1.42%
0–1000	1970–2010	−1.35%	±1.38%	−2.70%	±1.30%	−1.74%	±0.54%	−1.93%	±1.39%
600–bottom	1970–2010	−1.51%	±0.62%	n.a.	n.a.	−0.81%	±0.57%	−1.16%	±0.84%
OMZ	1970–2010	6.33%	±2.52%	6.10%	1.2%	4.49%	±2.25%	5.64%	±2.66%
Global	1970–2010	−1.43%	±0.70%	n.a.	n.a.	−0.87%	±0.53%	−1.15%	±0.88%

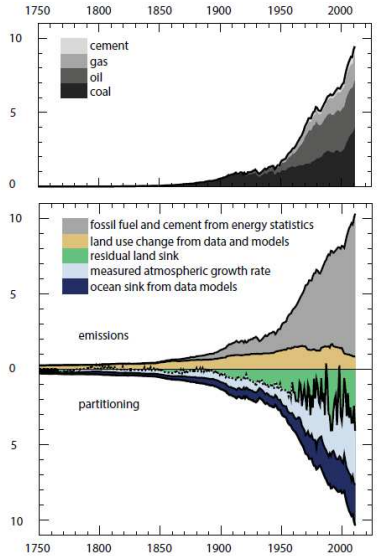
- 100-600 m, 1970-2010年の酸素の減少率は，研究グループで3倍違う．最も大きな減少は，Ito, Minobe らのデータセットで見いだされ，あるいは観測値が無い領域の推定における取り扱いの違いがこの問題を生んでいるようだ．
  - このデータを作ったMinobeがアホな間違いをしたという可能性もちょっとある．

二酸化炭素と海洋酸性化

海洋酸性化の謎

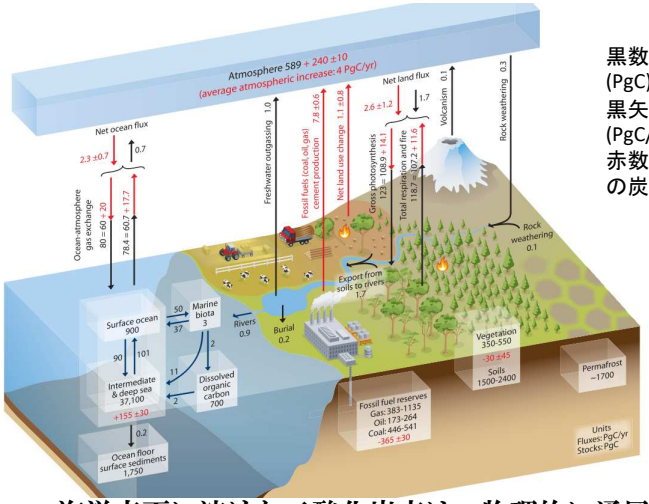
- 二酸化炭素が海に溶けると，酸性化が進み，珊瑚や貝の骨格や殻が作りづらくなって大変なことになるかもしれない，というのが海洋酸性化なのだが．．．
- なぜ，二酸化炭素が海に溶けると酸性化になるのか？
- なぜ，酸性化になると，珊瑚や貝の骨格や殻が作りづらくなるのか？

人為起源二酸化炭素の行方



IPCC AR5 WG1

- 人為起源の二酸化炭素のうち，だいたい［　　］が大気に 残り，［　　］が海洋に吸収され，ほかは陸上植物に吸収されていると考えられている．



黒数字は産業革命以前の貯蔵量(PgC)
黒矢印は産業革命以前の交換量(PgC/yr)
赤数字は2000-09年の人為起源の炭素量とその交換量 (PgC/yr)

- 海洋表面に溶けた二酸化炭素は，物理的に通風換気と対流で深層水や中層水に沈み込むほかに，光合成で有機物となり，生物の死骸・糞・殻などとなって沈降しつつ分解される．この生物を介した，表層から中深層への炭素の輸送を，[　　]ポンプという．

酸と塩基

※　下の4つの四角には酸か塩基が入ります.

- アレニウスの定義(1884年)：水(H2O)に溶けて，水素イオン(H+)を出す物質を[　　]，水酸化物イオン (OH-)を出す物質を[　　]という．
- ブレンステッド・ローリーの定義(1923年): H^+ を与える物質が[　　]、H^+ を受け取る物質が[　　]である。

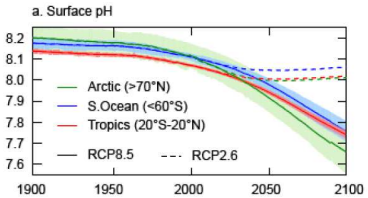
pH

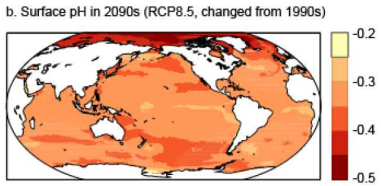
- pH=[　　] [H^+]は水素イオン濃度 (mol/L)
- pHが１増えると，水素イオン濃度は[　　]倍になる
- pH<7[　　]性，pH>7[　　]性
- 海洋表層のpHは，産業革命以前から1994年にかけて，pH=8.25から8.14に減少
- 水素イオン濃度は，$10^{-8.14}/10^{-8.25}$=1.28なので，約[　　]%増えた．

酸性化アルカリ性か

- 次の物質は酸性ですか，アルカリ性ですか？
- ビール [　　]
- コーラ [　　]
- 食塩 [　　]
- コーヒー [　　]
- 緑茶 [　　]
- アルカリイオン水 [　　]

pH変化





IPCC-AR5-WG1 report, Fig. 6. 28

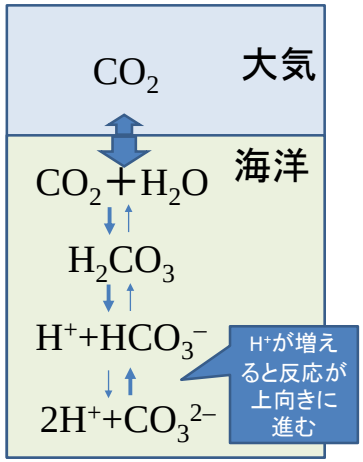
- RCP8.5シナリオの下で，将来海洋が酸性にな[ ].
- 海洋のpHは酸性の方向に進[ ]

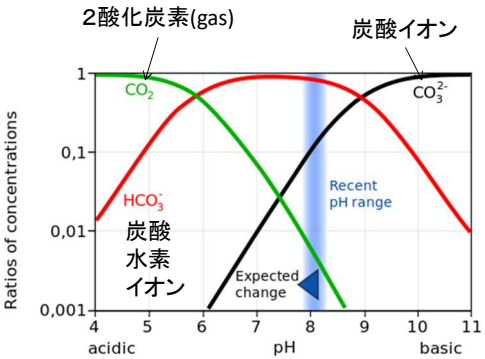
化学平衡の基礎問題

- 化学反応
  - $A + B \rightleftarrows C + D$
- が化学平衡状態にあるとする．化学成分A, B, C, Dのモル濃度を[ ]で書けば，
  - $K = \frac{[C][D]}{[A][B]}$
- の関係がある．ここでKは平衡定数である．
- 今，化学反応 $A + AB \rightleftarrows 2A + B$ において，Aが増加した場合に反応は，左右どちらにすすむか？なおこの式中でABとは，化学成分AとBが結合した成分である．

pH変化

温暖化によって生じる変化を，太い矢印で描いている．





＊ 二酸化炭素分圧が増えると，H+が[ ] pHが[ ]る．

＊ すると 炭酸イオンが[ ]

炭酸イオンと炭酸カルシウム

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \Leftrightarrow CaCO_3$$

- 炭酸 イオンが減れば，炭酸カルシウムは[ ].
- 炭酸カルシウムは，産業革命以前は，多くの海水中で過飽和であり簡単に析出したが，炭酸カルシウム濃度が減って，未飽和になれば，析出させることは難しくなる．つまり，生物が固体の炭酸カルシウムを利用することが，不可能または困難になる．

$CaCO_3$

Aragonite
http://staff.aist.go.jp/y.iida/Photos/pa20720.jpg

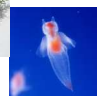
calcite

- 石 Aragonite
- 石 Calcite
- これらを50%以上含む堆積岩が 岩．ドーバー海峡の白亜（チョークchalk）．ライムストーンという石材として使われる．
- それが熱変性を受けたのが， 石。

アラゴナイト以外の写真はwikipediaより.

海洋生物の$CaCO_3$の利用

- あられ石 Aragonite（アラゴナイト）：
  - の骨格
  - の貝殻
  - の幼生の殻
- 方解石 Calcite（カルサイト）：
  - のとげ
  - や の貝殻の大部
  - 大西洋に多い植物プランクトン， 藻 の殻



飽和度Ω

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \Leftrightarrow$$ （いくつか前に既出）

$$\Omega \equiv \frac{[CO_3^{2-}][Ca^{2+}]}{[CO_3^{2-}]_{sat}[Ca^{2+}]_{sat}}$$

定義の記号

実際の濃度

飽和状態の濃度

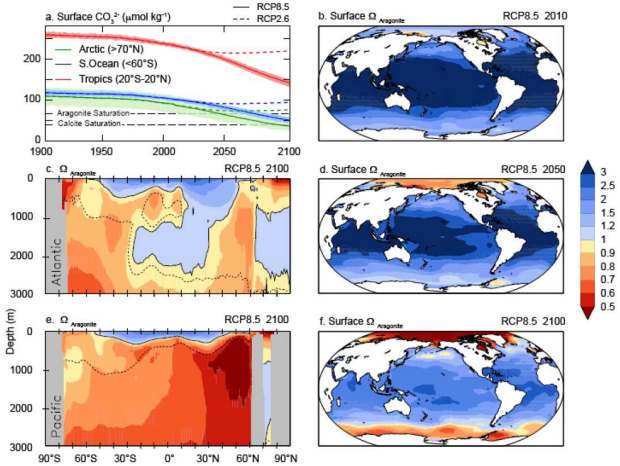
過飽和: Ω 1

飽和: Ω = 1

未飽和: Ω 1

アラゴナイトの方がカルサイトよりも未飽和になりやすい.

21世紀末のアラゴナイト飽和度



未飽和になりやすいのは，．．．

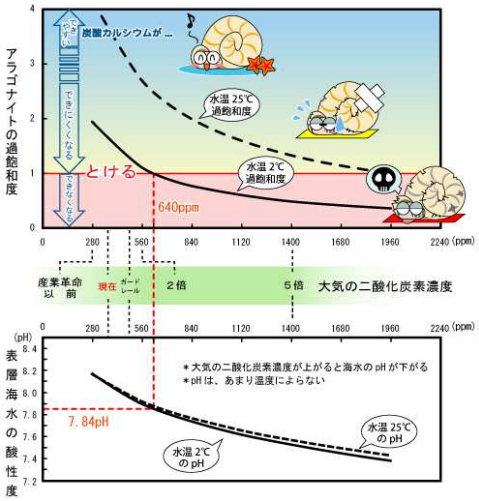
緯度については，

緯度

深さについては，

層

国立環境研のかなり分かりやすい解説



国立環境研：
http://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/6/6-1/qa_6-1-j.html

海洋酸性化は，温度上昇にはよらないので，

問題と言われる.

AOUと二酸化炭素

- 生物ポンプで，表層の二酸化炭素が有機物となって中深層に運ばれ，そこで分解される.
- この分解の際に，酸素が消費される.
- したがって，AOUは中深層に溶けている無機炭素量のよい指標である.

考えよう

- 問題：三つ前のスライドの左列で，大西洋よりも太平洋の中深層で，アラゴナイトの飽和度が低いのはなぜかを，AOUの断面図と照らし合わせて答えよ.
-

海洋貧栄養化

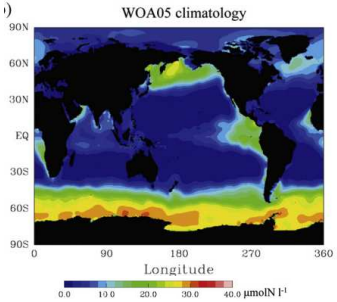
海洋貧栄養化メカニズム　1/2

- 地球温暖化によって，海洋の植物プランクトンが利用できる栄養分が減少することが懸念されている．これを [　　] と呼ぼう．
- 植物プランクトンが利用するには，栄養分が表面から100～200mまでの 有光層 に供給されなくてはならない．
- しかし，地球温暖化は海洋を表面から暖めるので，表面は海洋数百 m深度よりも 速く 暖まり，表面付近の成層が 強く なる．
- このため，湧昇および鉛直混合が弱まって，有光層への栄養供給が減少する可能性が高い．これが第一のメカニズムである．

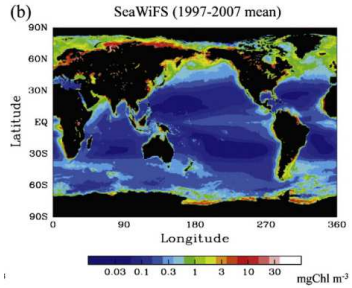
海洋貧栄養化メカニズム 2/2

- もう一つのメカニズムは，熱帯が拡大して風系も極側に拡がって，その結果栄養分に乏しい亜熱帯循環が拡大し，特に亜熱帯循環と亜寒帯循環の循環境界付近で栄養塩が大きく減少することである．

現在の平均的な0-110mで平均した硝酸塩の濃度分布.



衛星観測から推定される海洋表面でのクロロフィル濃度.



亜熱帯は海の [　　]

すでに生じているのか？

- 解像度が低い気候モデルでは，滑らかに熱帯の拡大そして海洋循環の極側への移動が生じるが，現実の海洋では狭く強い海流や，数十 kmの中規模渦と呼ばれる大気の高低気圧に対応する渦が，複雑にふるまう．
- 近年の日本付近での暖水系の魚の勢力拡大と，冷水系の魚の縮小は，亜熱帯循環の拡大によっているのかもしれない．
- また海洋中の高温偏差は，[　　][　　] として，2019年出版のIPCC特別レポート「海洋と雪氷圏」，をはじめ国際的にも注目を集めつつある．
- 水温上昇と海洋生態系の変化は今後も注目されていくだろう．

第12回まとめ1/2

- 海水の主要な陽イオンは化学式で [　　]，[　　]，[　　]，陰イオンは [　　] [　　] [　　] で，それぞれ３つ目が海洋酸性化に重要である(名称も聞くこと)．
- 海洋の酸素生成は， 光合成を行う [　　] によって行われ， 地球の植物による酸素の生産のおよそ [　　] を担う．光合成が行われるのは，表面付近の，[　　] 層である．
- 見かけの酸素消費量を，英語３文字で [　　] という．
- 生物ポンプで運ばれた有機物が分解すると，見かけの酸素消費量は増加 する．
- 海洋の酸素が減る海洋 [　　] 化（ocean deoxygenation）が予想されている．これは 表面 [　　] 上昇と，中深層水形成 [　　]，亜表層での [　　] (ventilation)の弱化による．

第12回まとめ2/2

- 海洋中の二酸化炭素濃度が増加すると，pHは［　　］し水素イオン濃度は［　　］する．これを海洋［　　］化(ocean acidification)という．
- その際，海水中に溶けて生物の骨格や殻に使われる，［　　］を減らし，その飽和度の減少や未飽和領域の増加が懸念されている．
- 炭酸カルシウムには，［　　］と［　　］があり，未飽和になりやすいのは［　　］である．
- 海洋酸性化は，温度上昇にはよらないので，もう一つの［　　］問題と言われる．
- 温暖化で海洋表層の栄養分が減少する，海洋［　　］化(ocean oligotrophication)も懸念されている．
- これをもたらす物理的な変化には，［　　］強化と［　　］の拡大が考えられている．