

はじめて学ぶ海洋学: 深海編D6

深層流

密度差を使って、垂直方向
に流れる（熱塩循環）

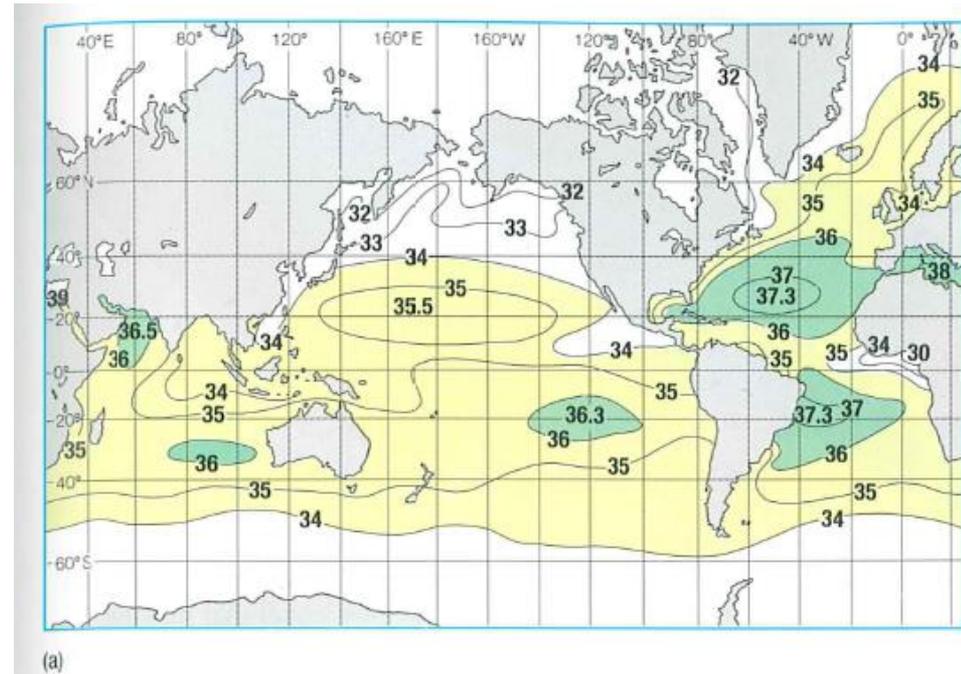
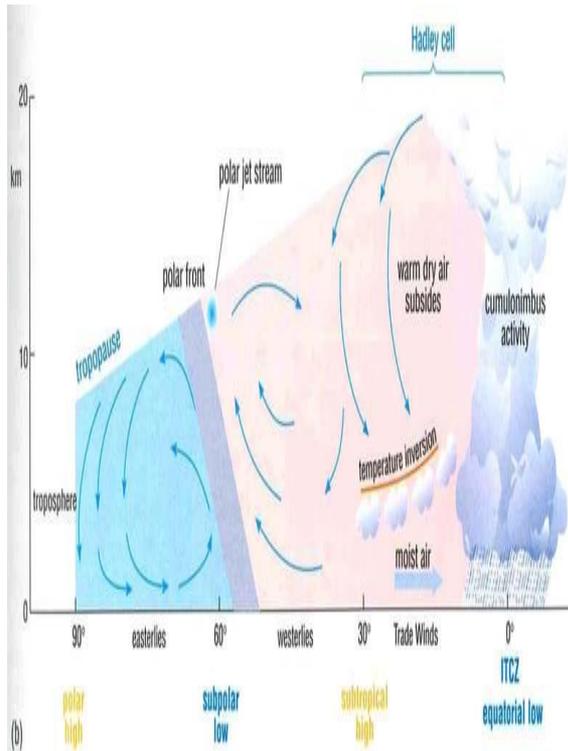
yokose@kumamoto-u.ac.jp

Ver. 2020.1.25.

深層流

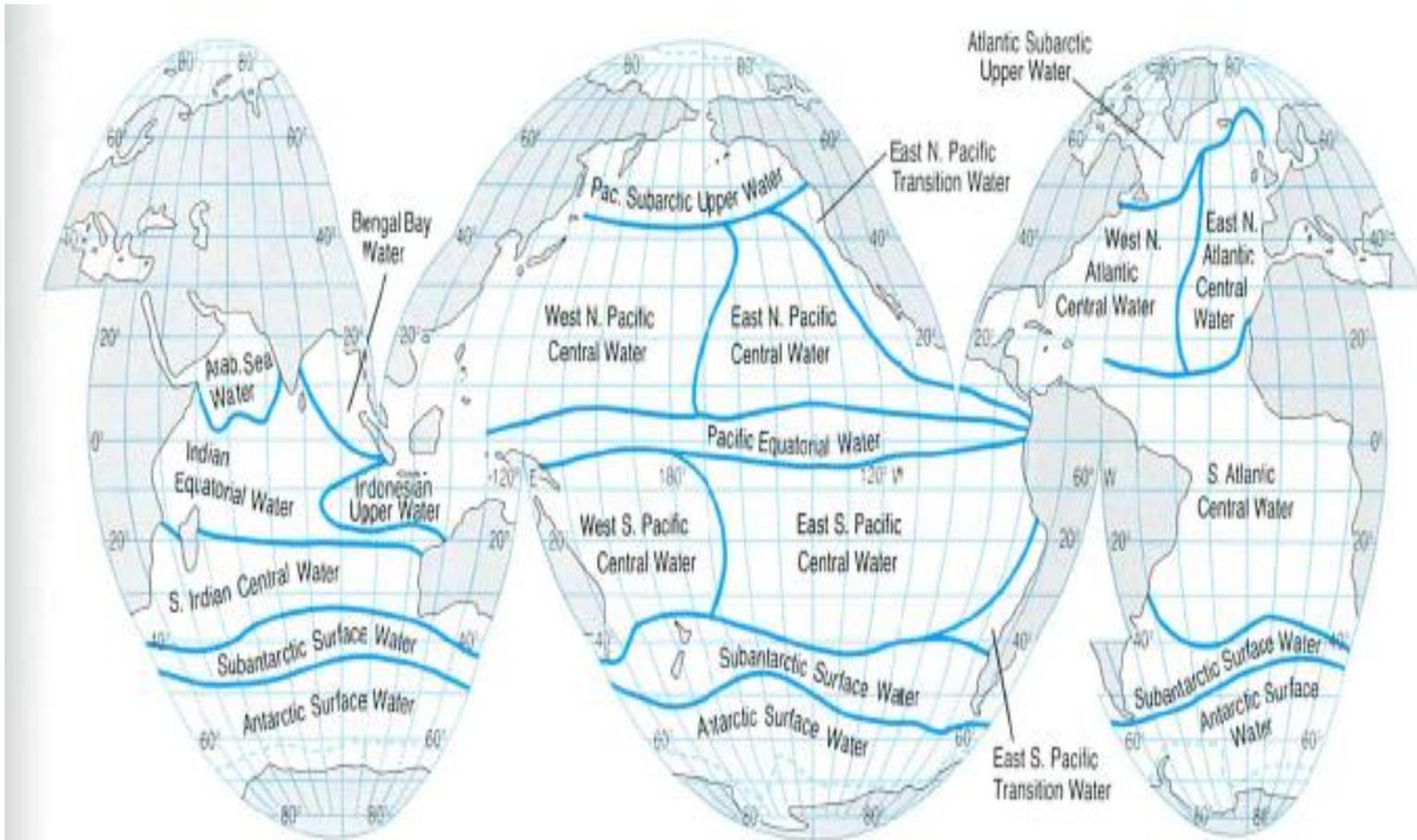
- ◎ 混ざり合わない表層と深層
- ◎ 深層水の地域性 (TSダイアグラム)
- ◎ 水の年代を計ろう
 1. トリチウム
 2. 炭素14年代測定法
- ◎ 熱塩循環
- ◎ 深層大循環
- ◎ ブロッカーのベルトコンベアモデル
- ◎ 北大西洋海流 (湾流) の北上

海洋表層の平面的特徴は、太陽、海流そして大気循環でコントロール



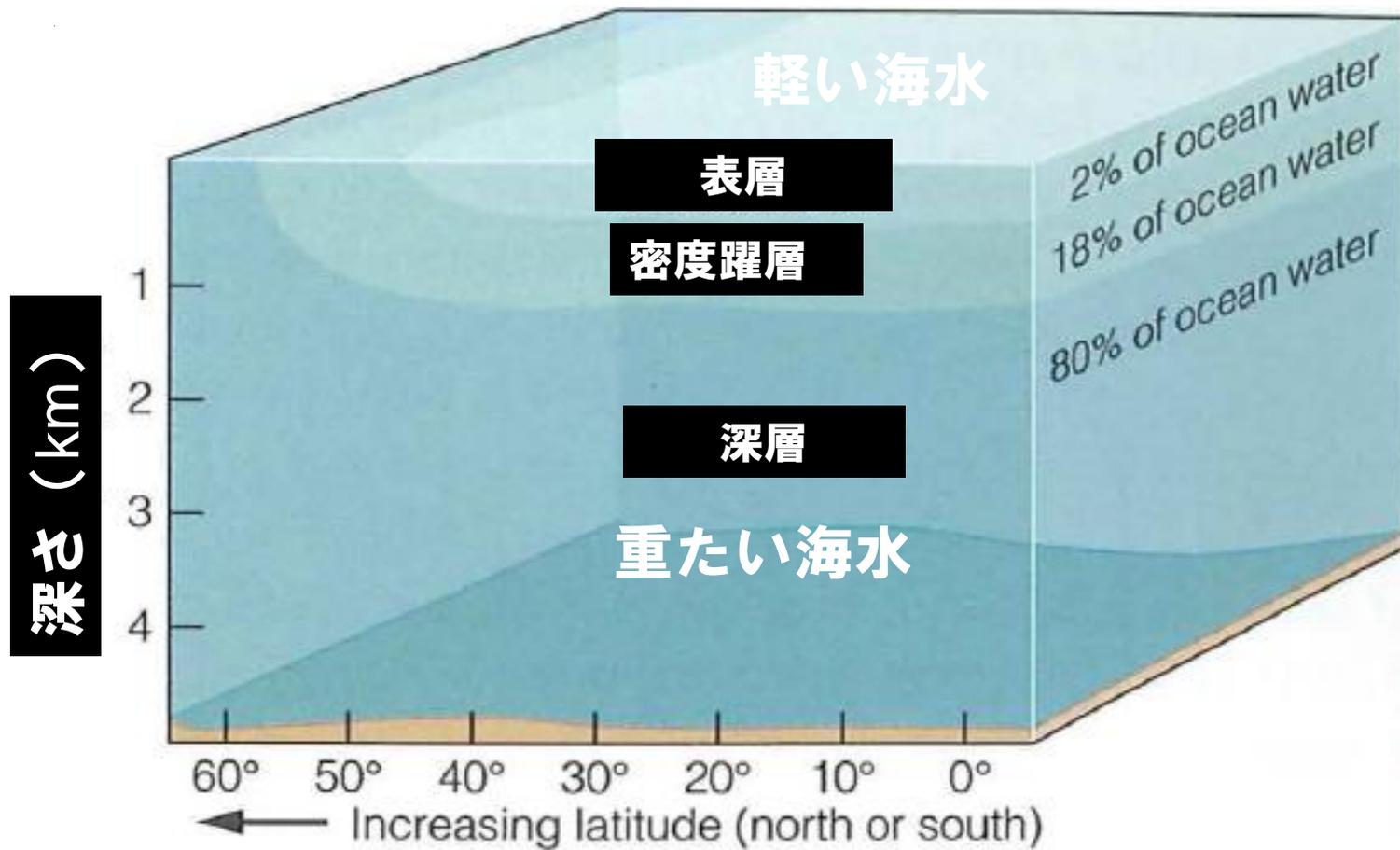
深海の海水は、何がコントロールしているのだろうか？

海洋表層における水塊の区分

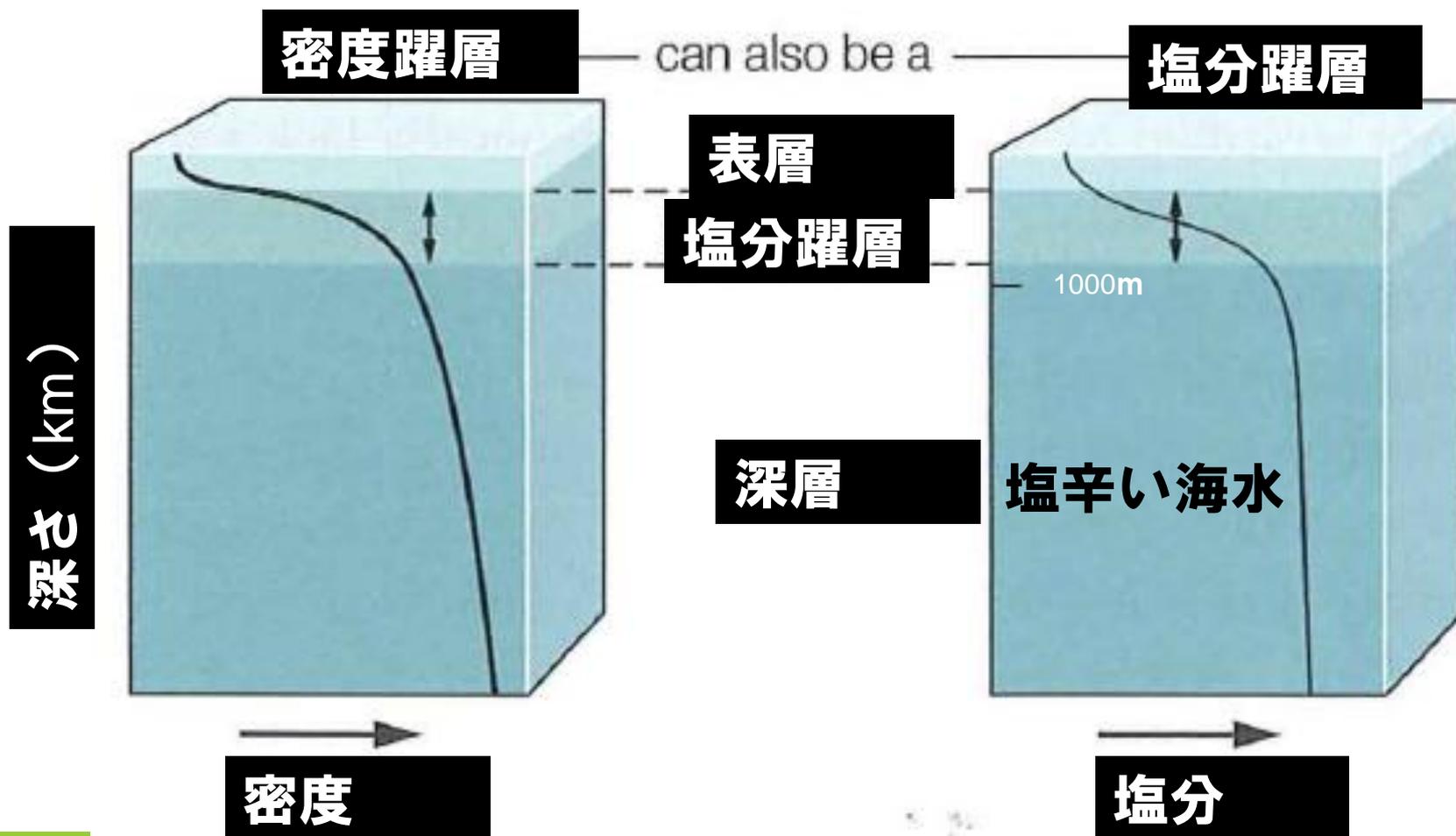


深海底の海水にも水塊の区分はあるのだろうか？

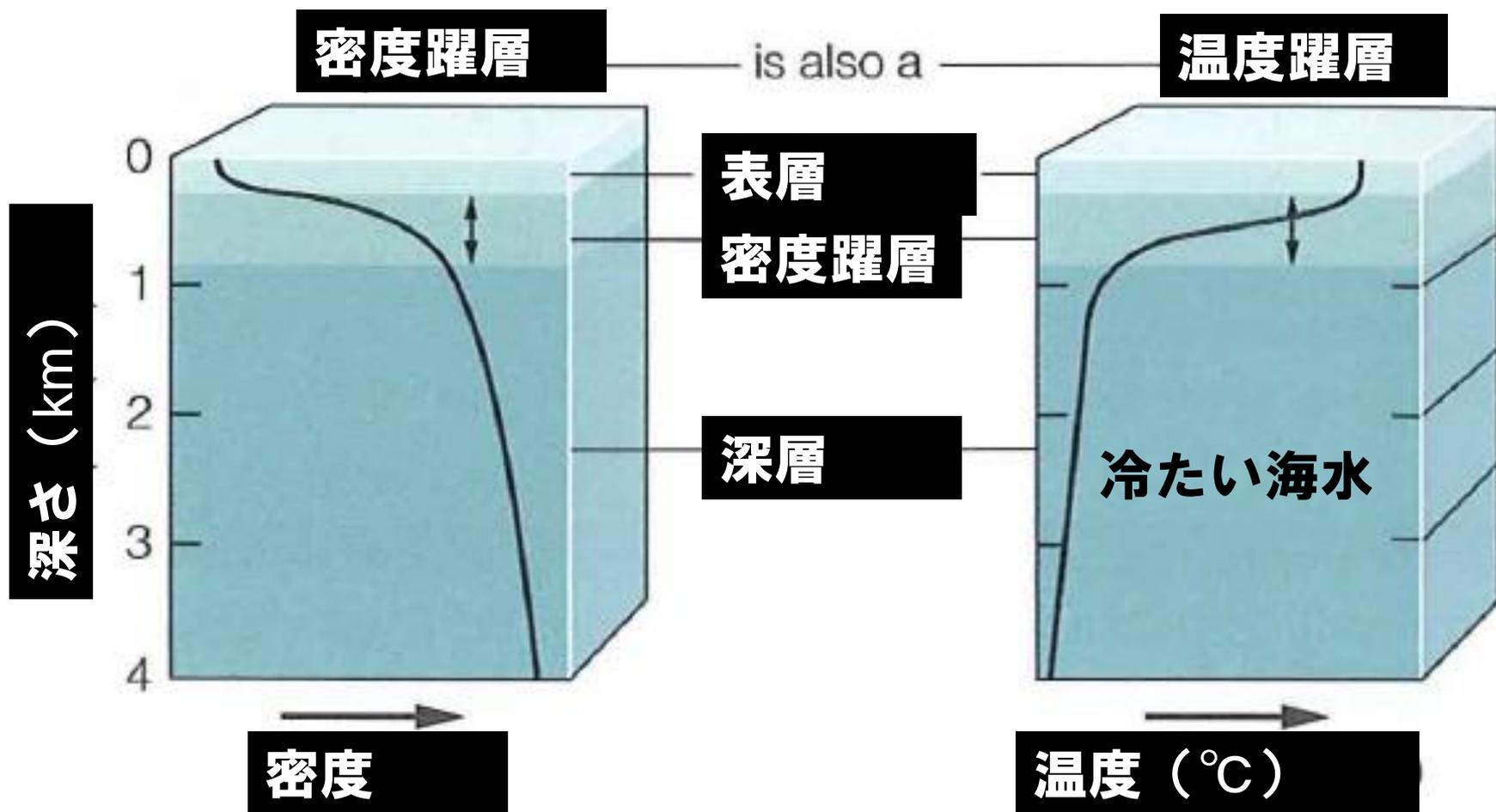
海水は密度成層した3層構造



深層水は、塩辛くて重たい海水



深層水は、冷たくて重たい海水



深層水と表層水

- ◎表層の海水： 軽くて、暖かくて、あまり塩辛くなく、変化に富む
→蒸発と降雨で決まる
- ◎深層の海水： 重たくて、冷たくて、塩辛く、変化に乏しい
成因⇒極域で生産される

深海と表層海水が上下方向で攪拌されない理由

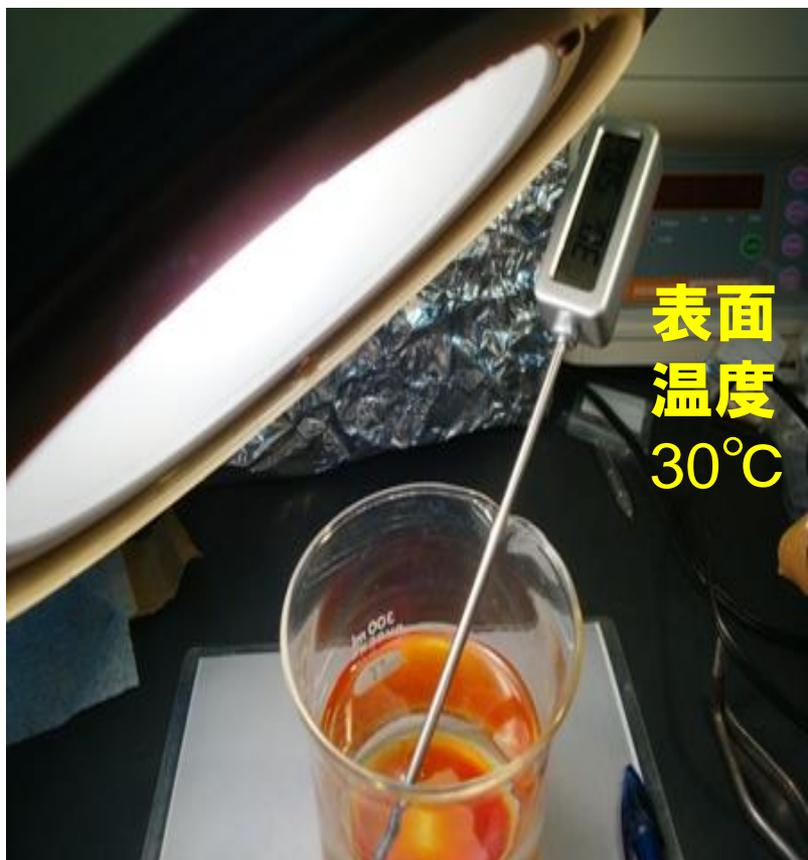


簡単な実験で説明

白熱電球で30分間暖めると



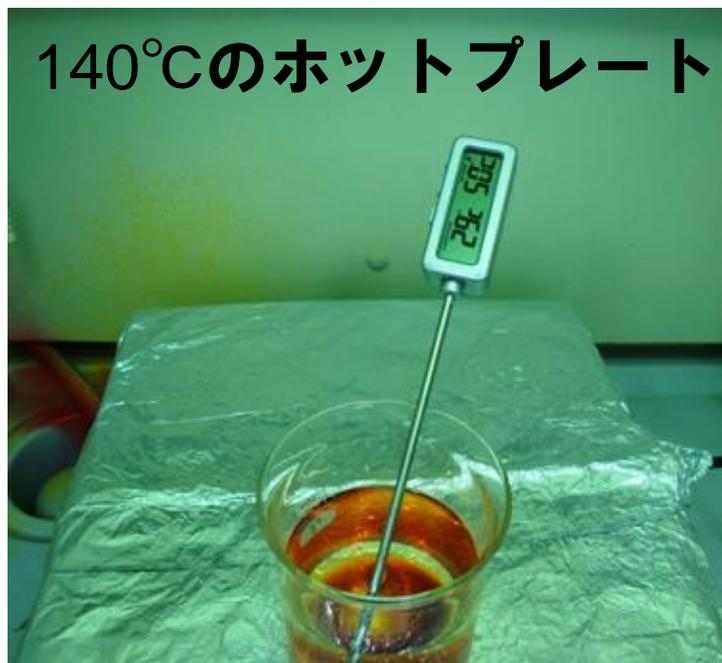
表面と内部の温度差



イソジンは底に沈んだまま

約30分後、表面は30°C、底は26°C イソジンは攪拌されない

もしも、海が鍋のように下から暖められたら



経過時間
表面水温
攪拌状況

0分
29°C
未攪拌

2分
29°C
半分攪拌

3分
29°C
全部攪拌

2分の経過時の対流状態



上昇し始めたイソジン水であるが、まだ重いので中間点ぐらいまでしか上昇できない。

3分経過時の対流状態



下層のイソジン水が温まって、軽くなり最上部まで到達できるようになる。上層を占めていた相対的に重たい水が退くことで、スペースが確保される。

深層水は、いったい何者？

- ・深層水は、世界中で均質なのだろうか？
- ・不均質だとしたら、何が不均質性をもたらすのだろうか？
- ・そもそも、深層水ってのは、どこでできるの？
- ・どうやって、できるのか？

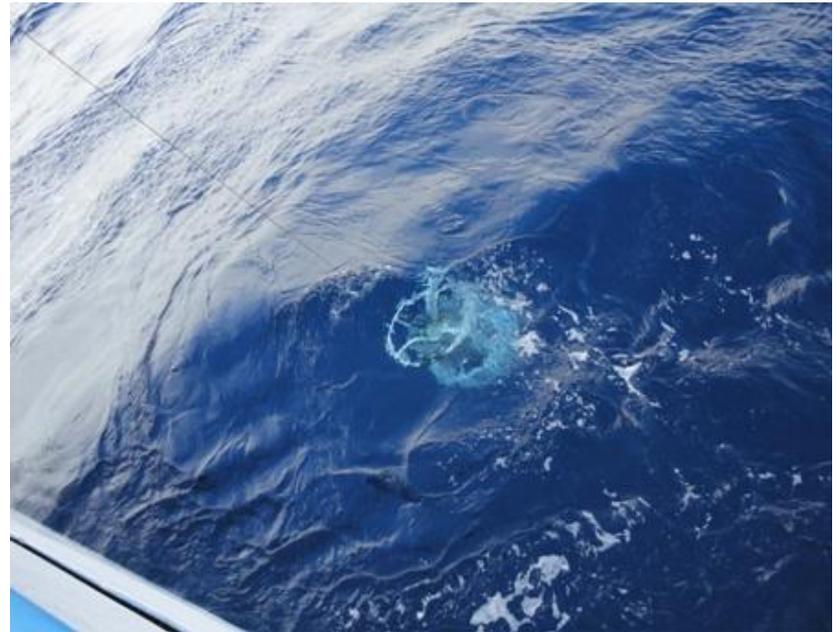
深層水の分布を抑えよう！ 海水の温度構造や塩分構造を調べる



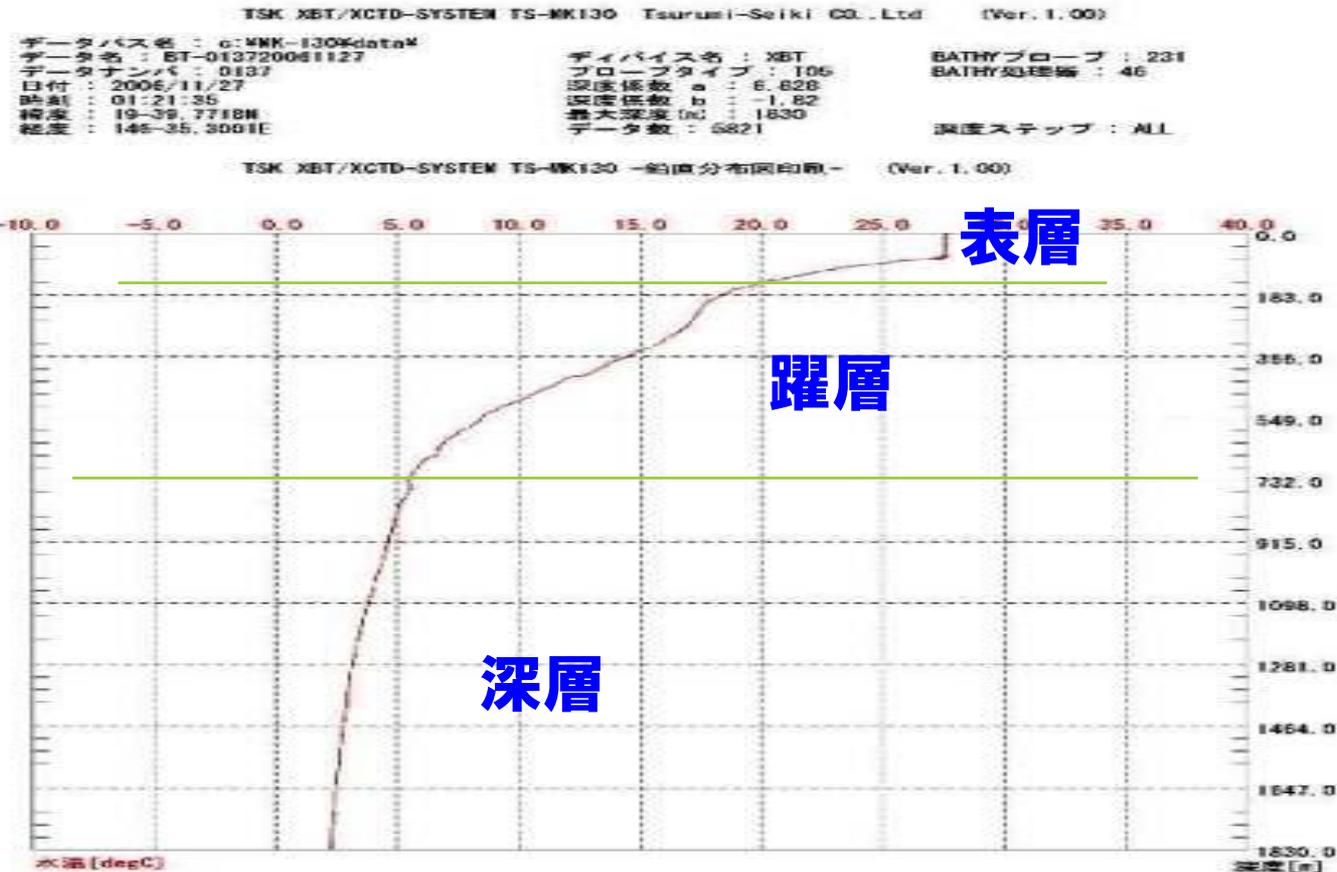
XBT



CTD計測

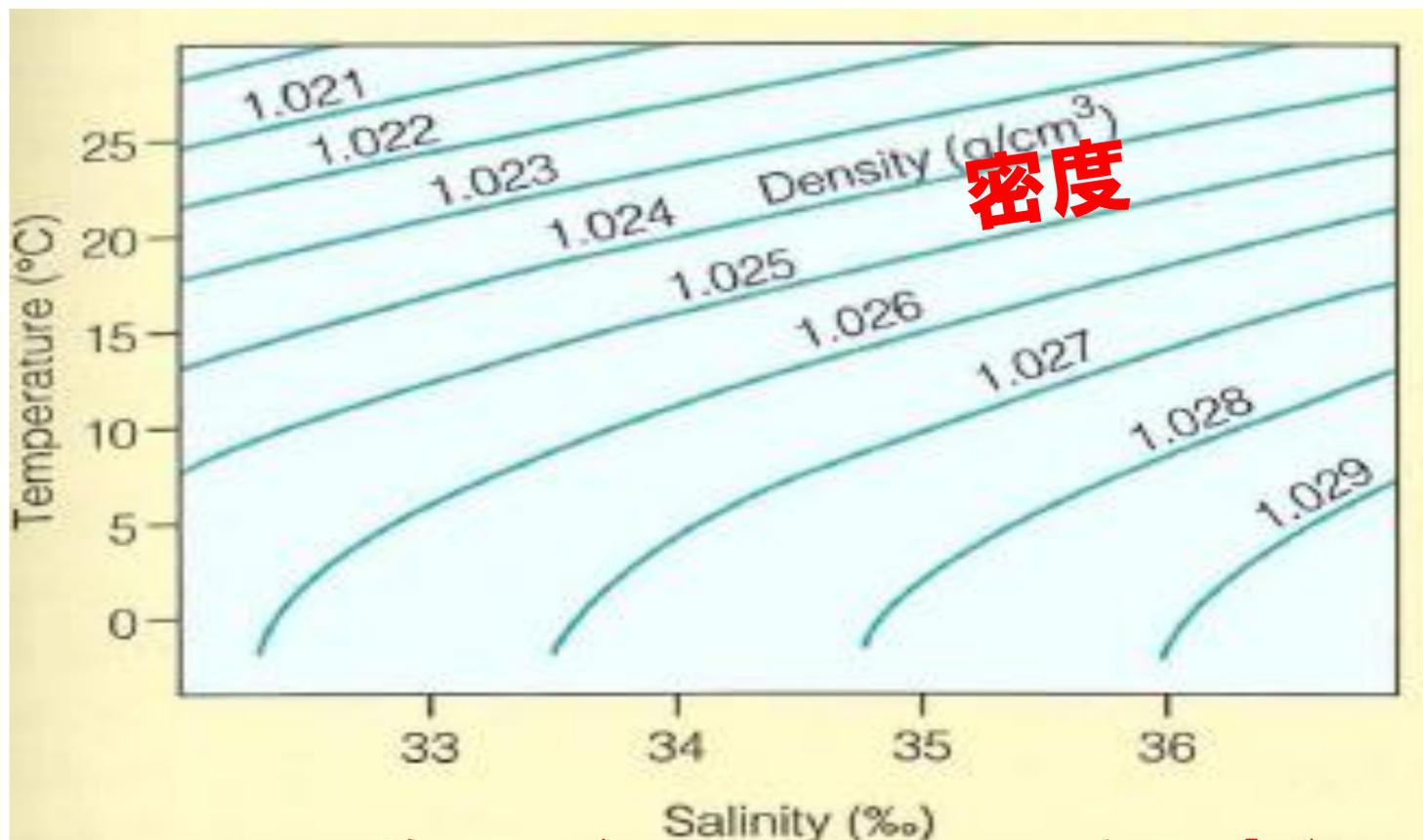


北緯20度付近の海水の温度構造



塩分・温度・密度の関係 (TSダイアグラム)

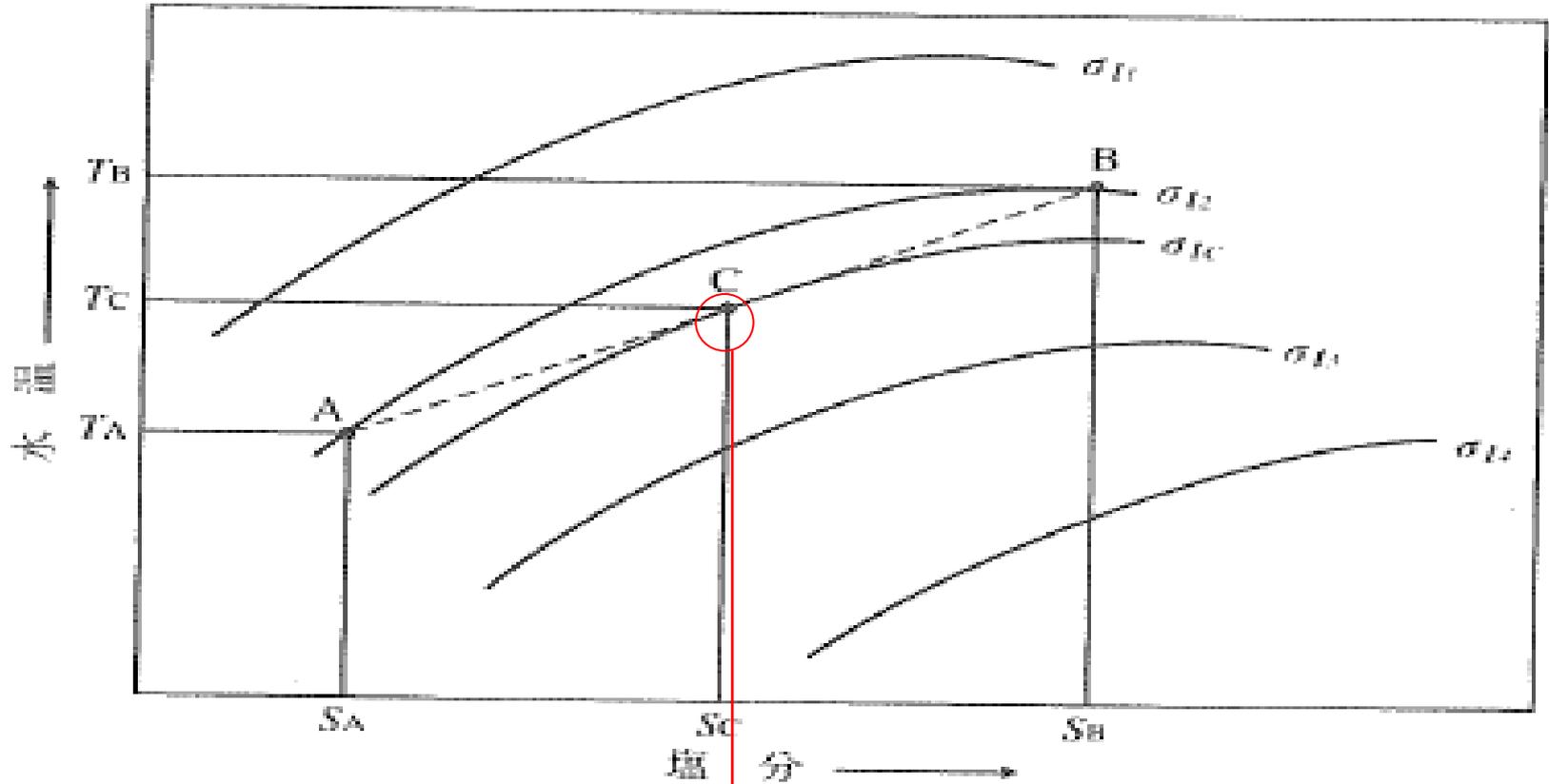
温度



密度

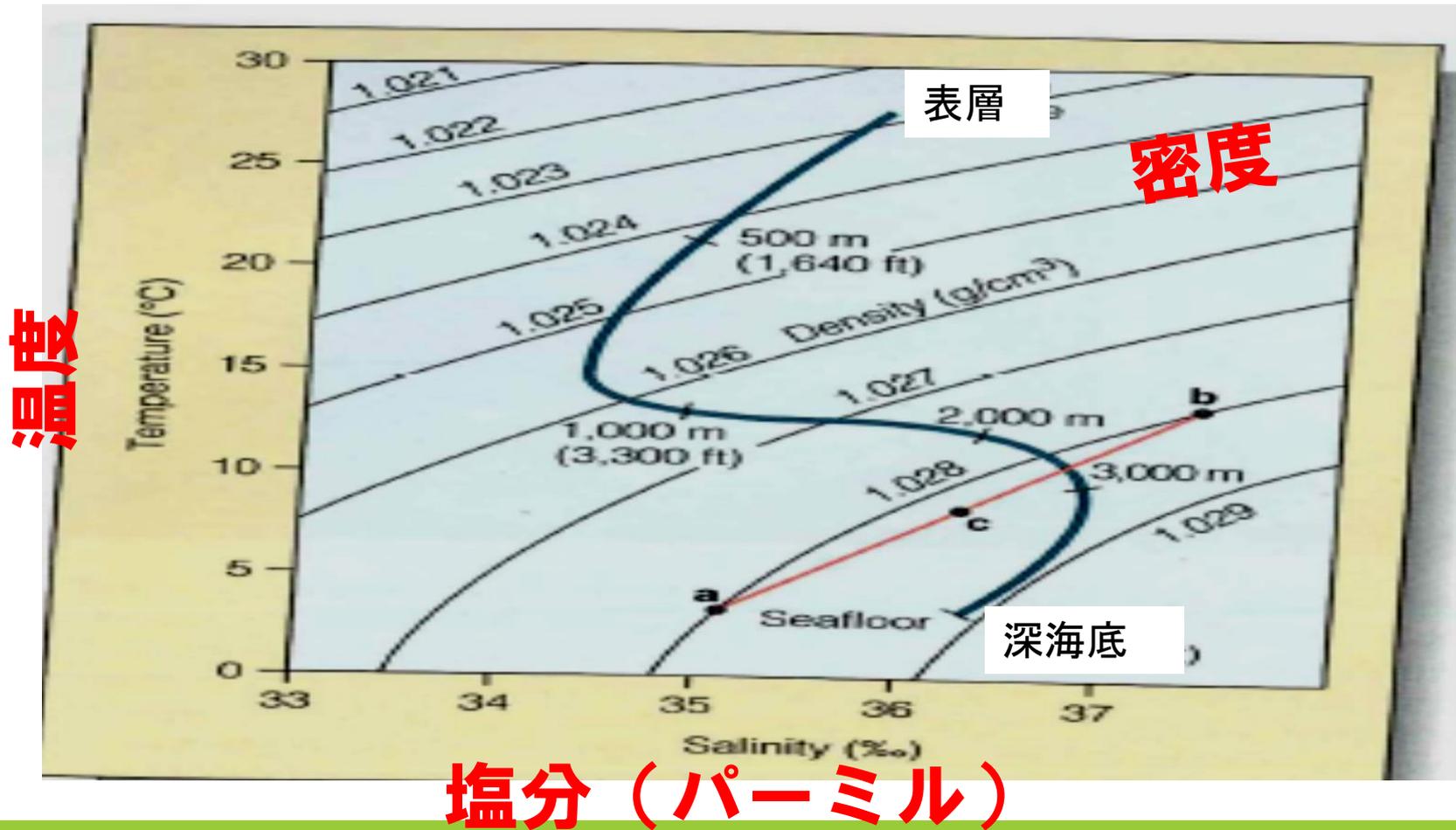
塩分 (パーミル : 千分率)

キャベリング効果



異なった海水が混合することで、端成分よりも高密度の海水ができる。

外洋における海水のプロファイル

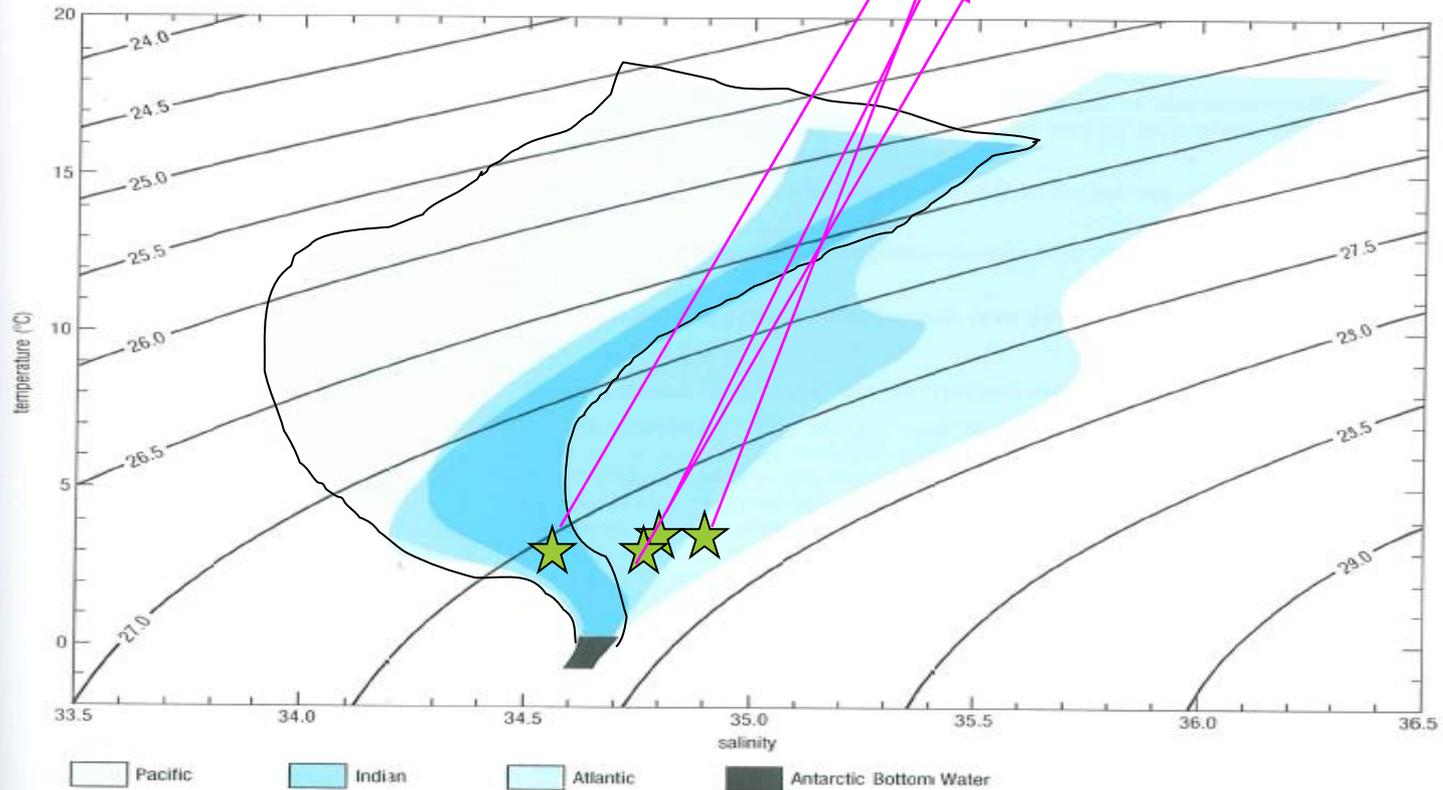


各海洋の化学的個性(海水はなかなか混ざらない)

Table 4.2 Average temperatures and salinities for the major ocean basins.

Ocean	Temperature (°C)	Salinity
Pacific	3.36	34.62
Atlantic	3.73	34.90
Indian	3.72	34.76
All oceans	3.52	34.72

Figure 4.18 A T-S diagram for waters of the world's major ocean basins, excluding the mixed surface layer. (For use with Question 4.12.)



TSダイアグラムによる水塊の特徴

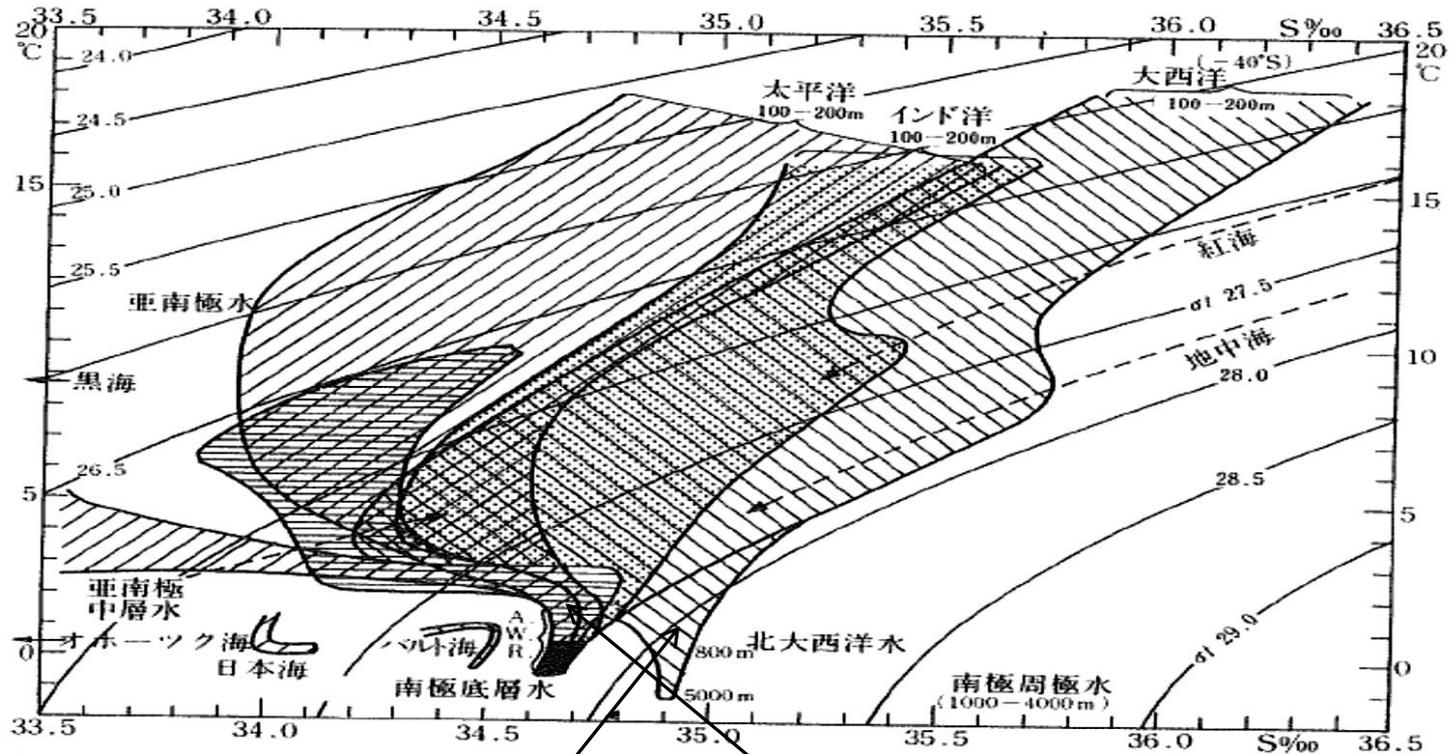
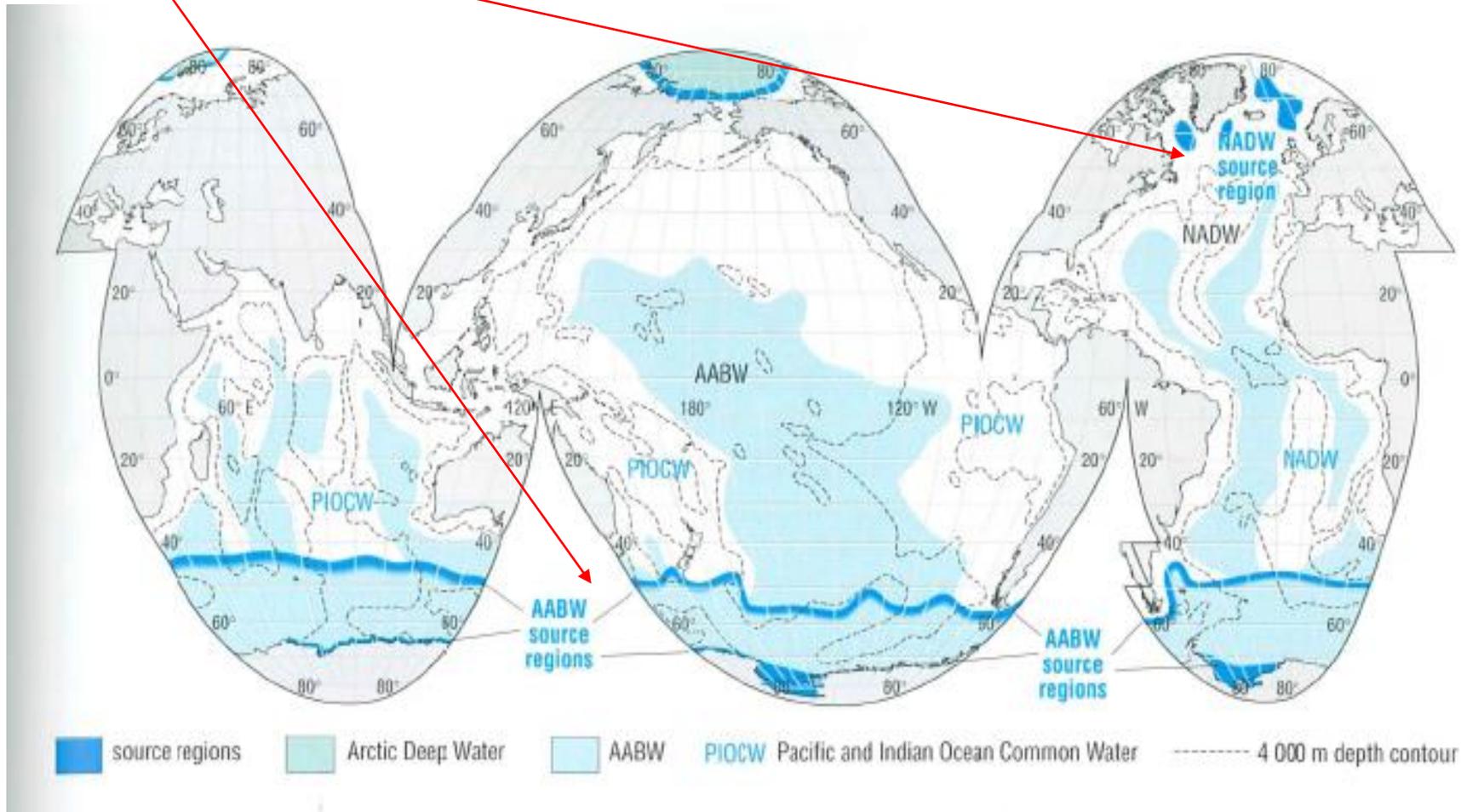


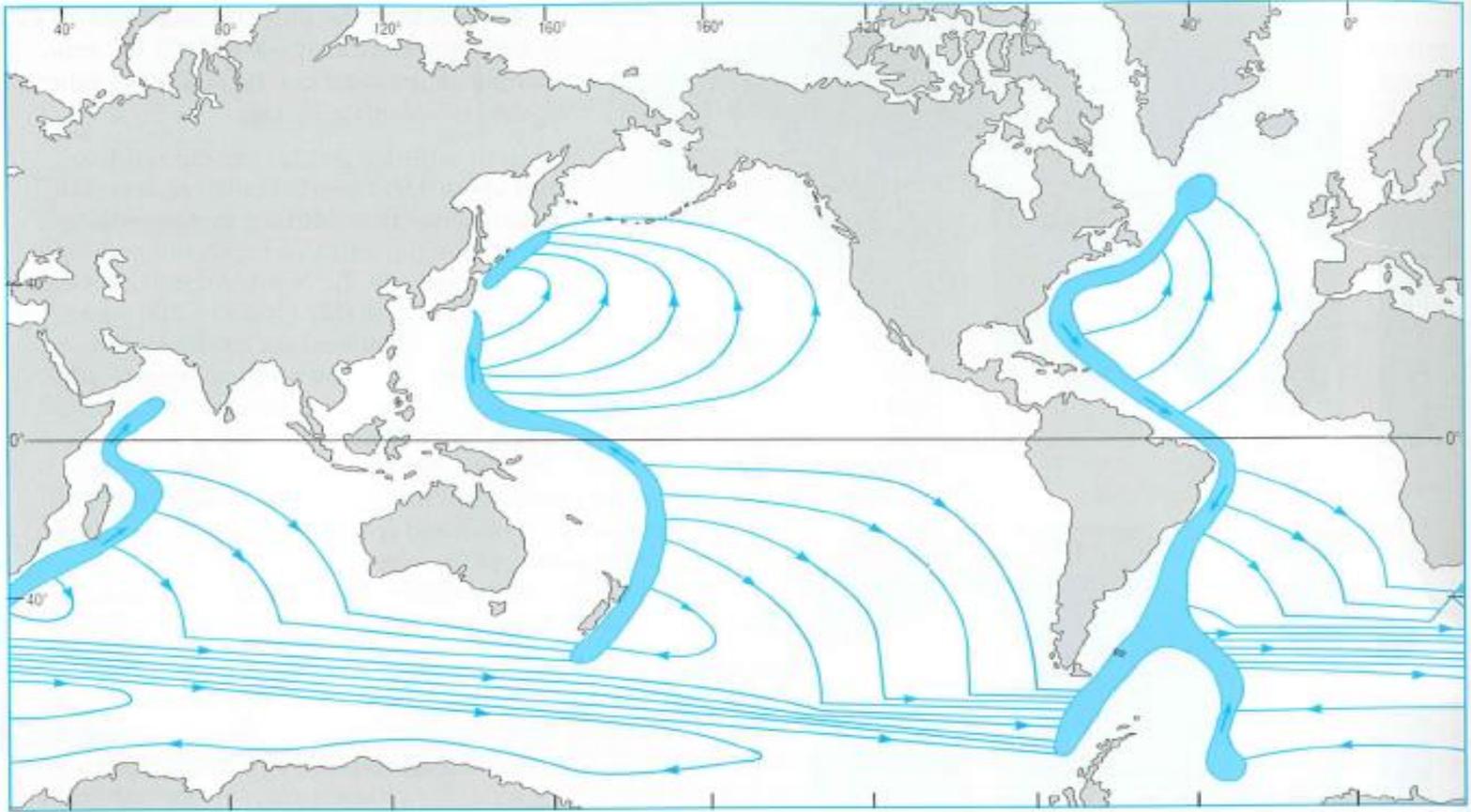
図 5-10 南極洋底層水と北氷洋底層水から派生する 3 大洋表層水の水塊分布 (Dietrich, 1950)

淡水の流入や熱による蒸発、太陽の照射時間などで表層部は、変化に富む。一方、1000mよりも深い部分は、0°C、34.5-35.0 psu 程度の海水に収斂する。北大西洋深層水（高塩分）、南極低層水（低塩分）

AABW (南極底層水) : Antarctic Bottom Water
NADW (北大西洋深層水) : North Atlantic Deep Water

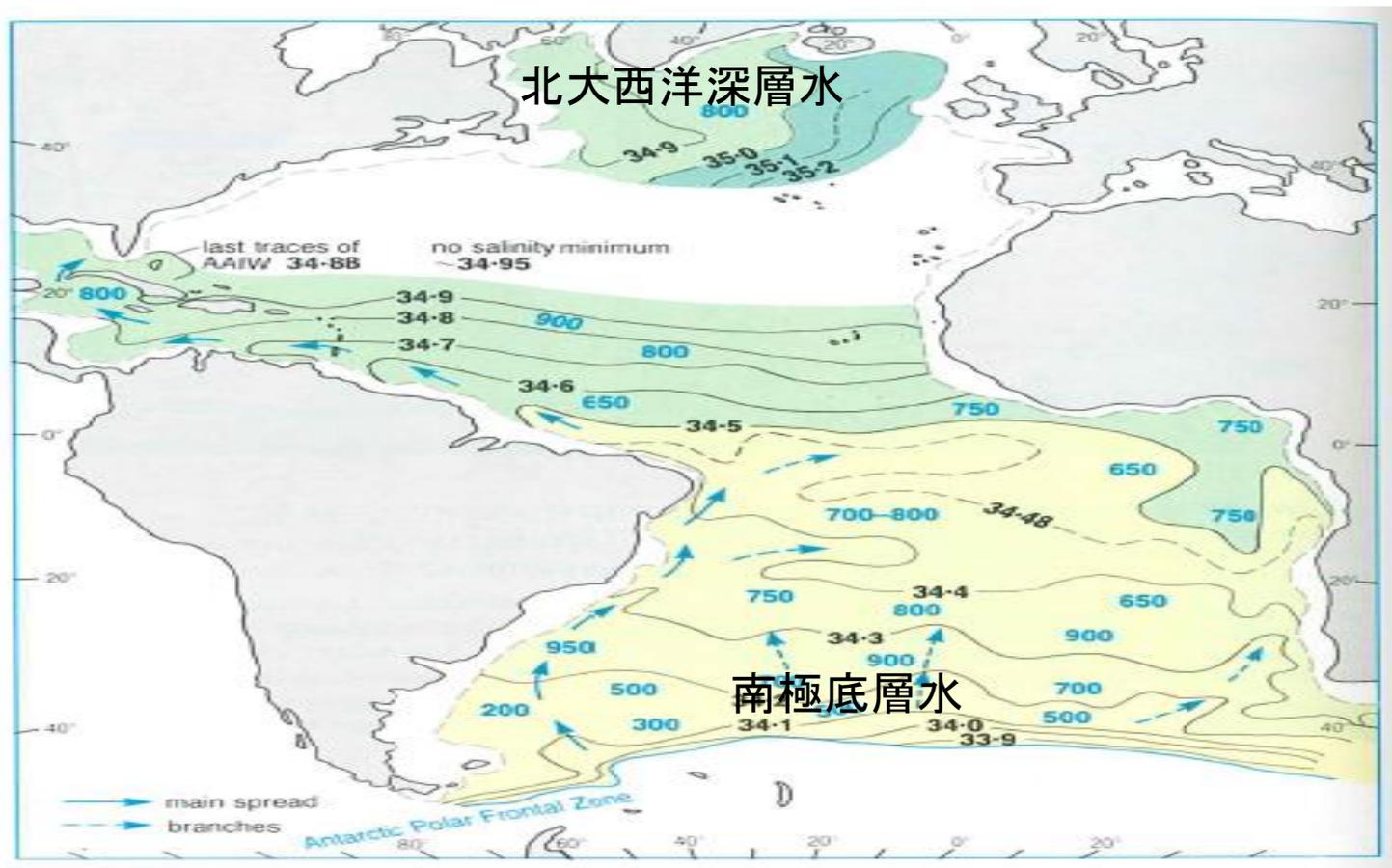


Stommel (1957) によって推定された深層大循環モデル

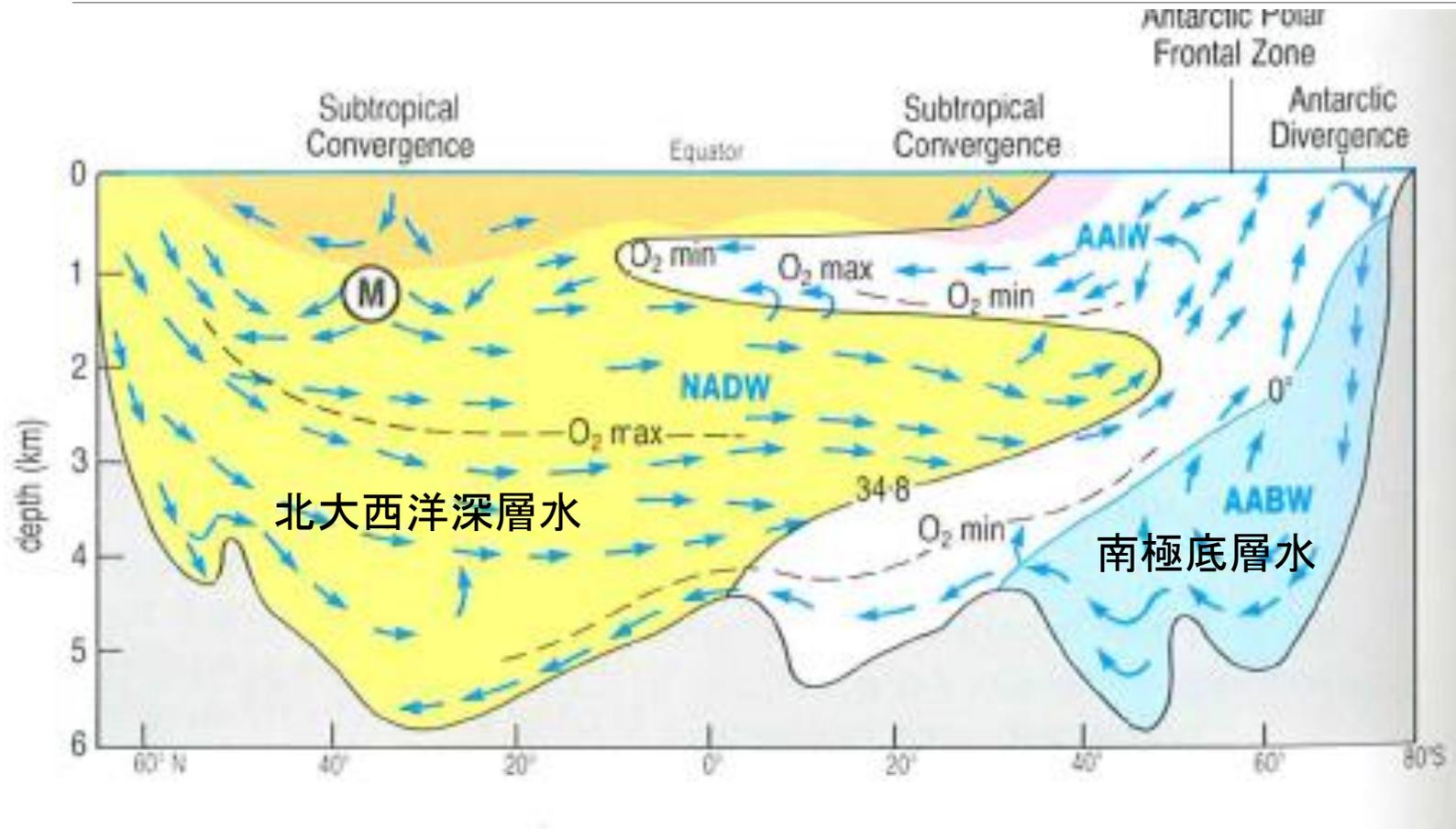


世界の深層水（およそ1000m以深）の海水は表層大循環とは異なる循環系に支配される。それはグリーンランド南のイルミンガー海と南極のウエデル海で生産される、冷やされて重くなった海水の循環。沈降量は、何れも約22 Sv（スベルドラップ、1 Sv. = $10^6 \text{m}^3/\text{sec}$ ）

大西洋における塩分極小値の水深分布



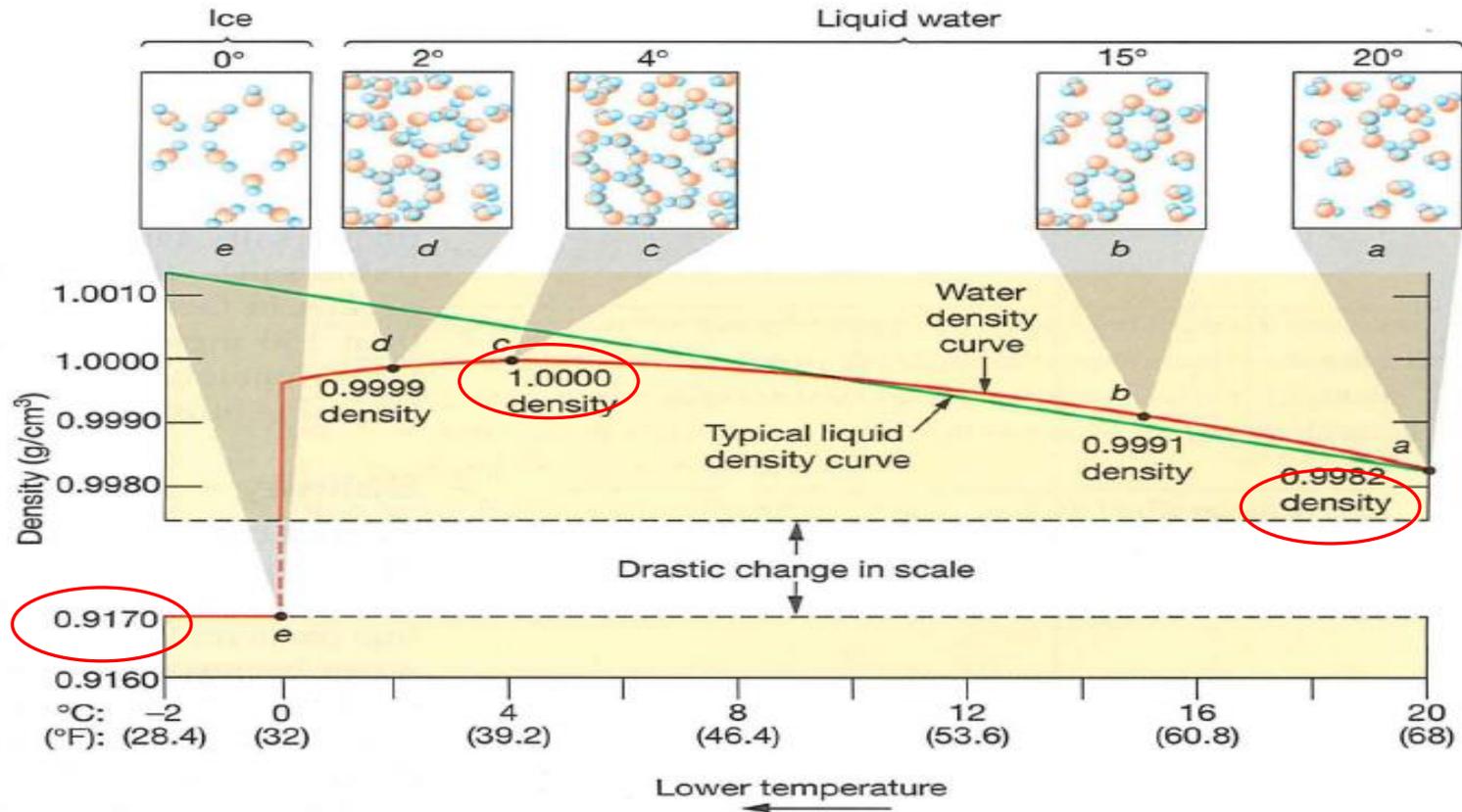
大西洋における水塊の垂直分布



熱塩循環(ねつえんじゅんかん)

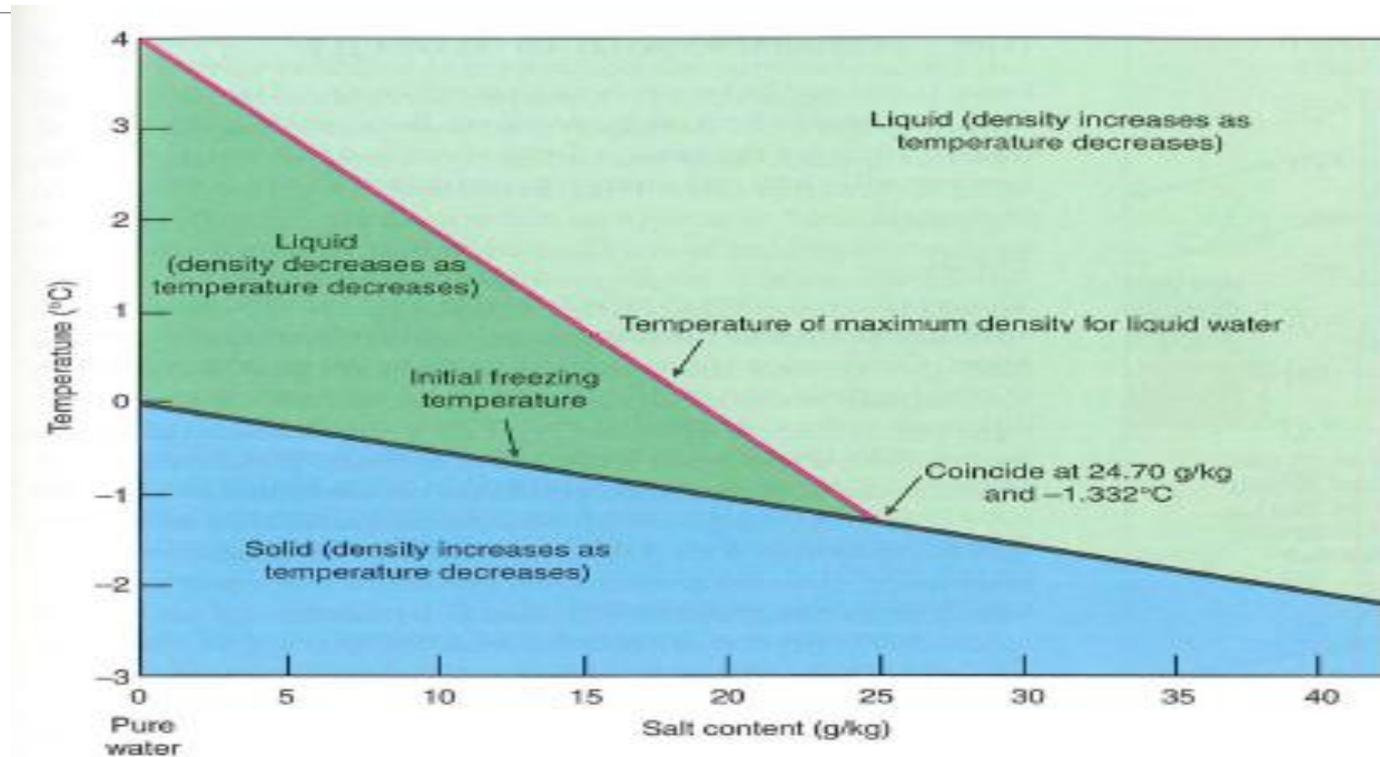
大気に冷やされた塩辛い海水は、
密度が重くなり沈んでいく。

凍った湖で、ワカサギ釣りができる理由



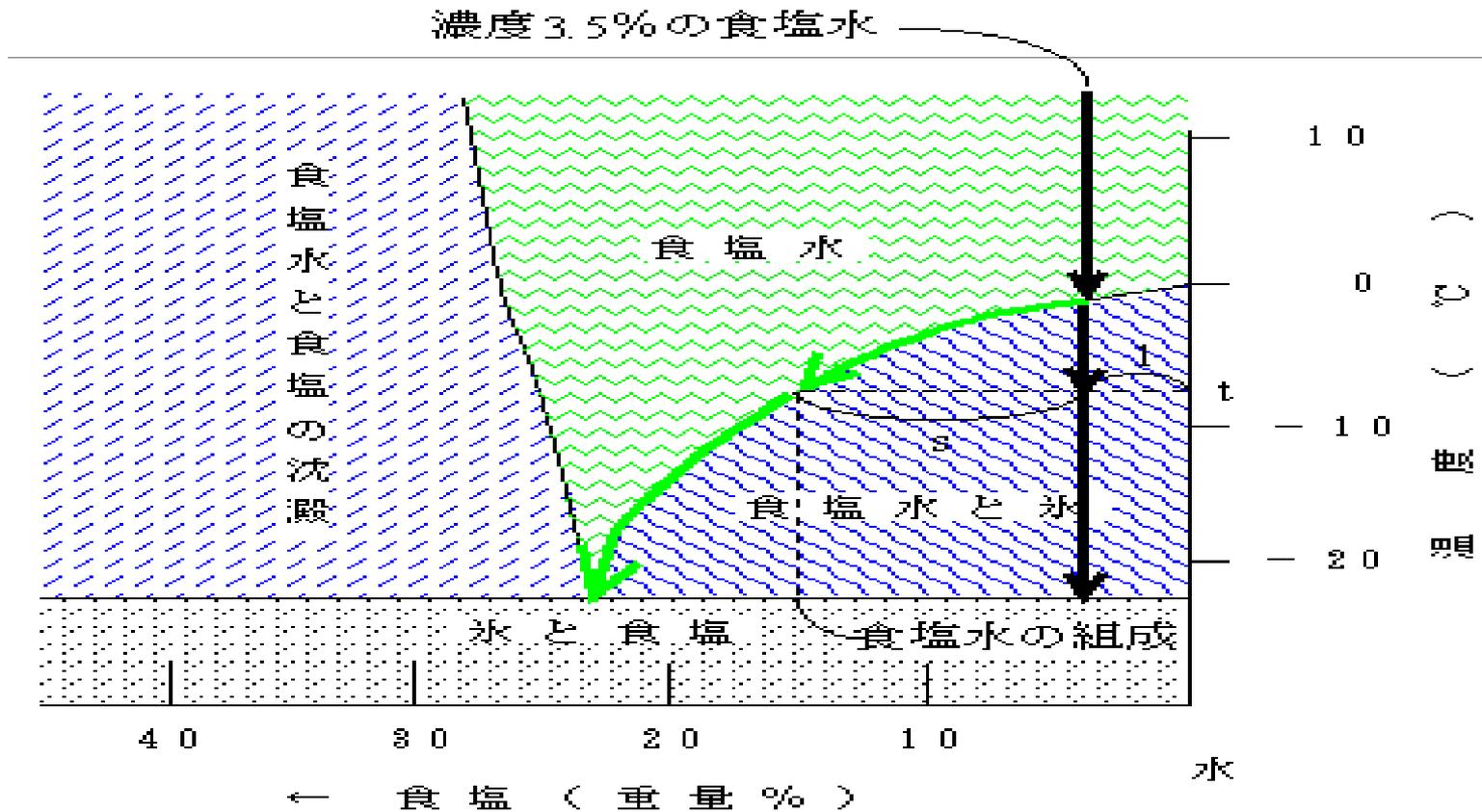
淡水は4°Cで密度が最大となり、氷はじめると一気に密度が小さくなる。

塩分濃度と最高密度に達する温度



塩分が増加することで、海水の密度増加は、温度減少とリニア—な関係になる。

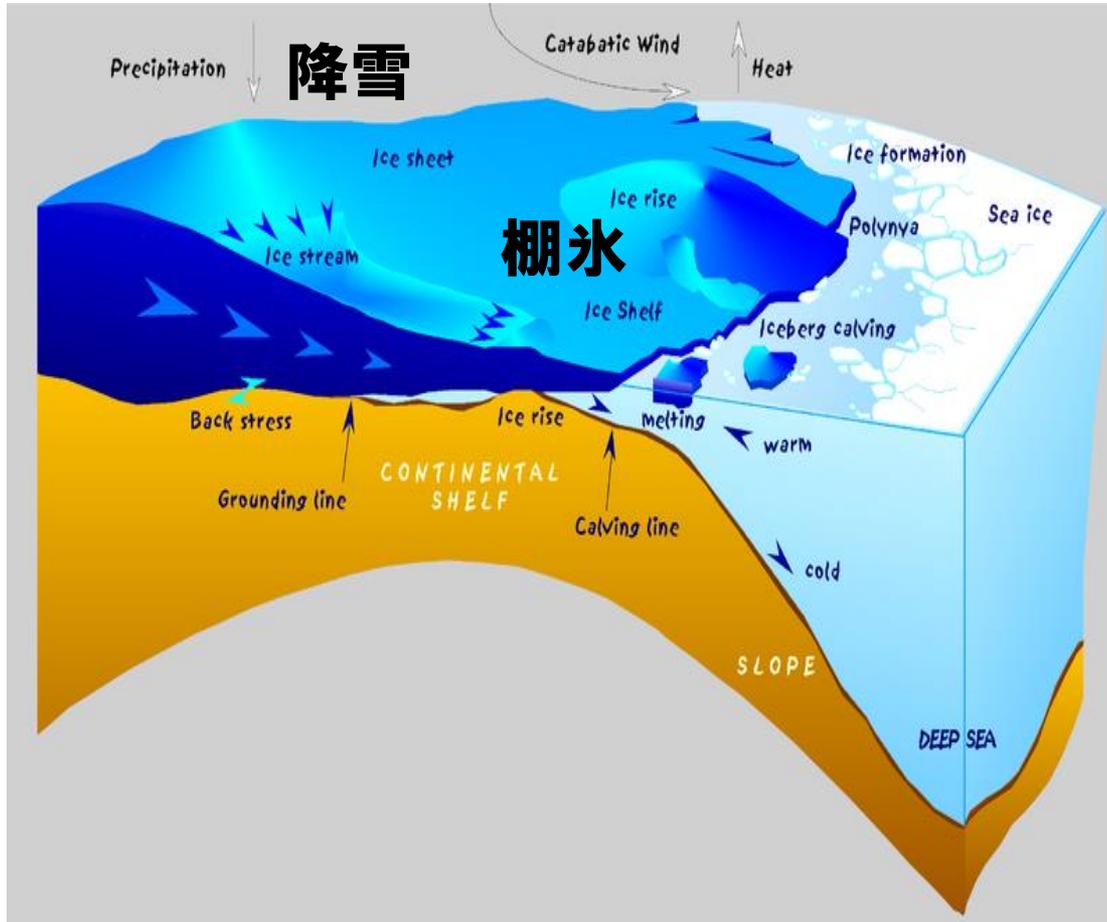
流水や氷山は、塩辛いのか？



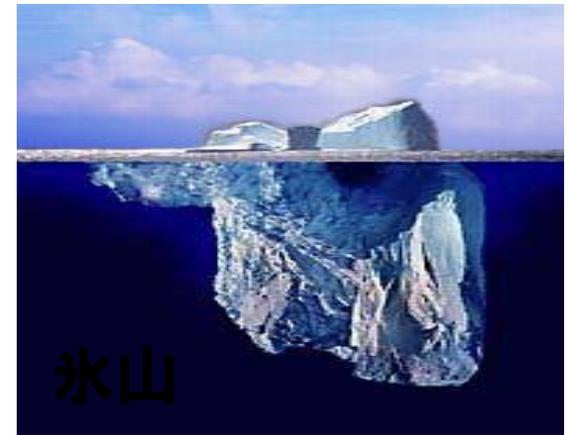
食塩と氷の相平衡図

海水は、およそ -1.8°C で氷はじめる。(塩分に依存)

極域での結氷、流氷、氷河、冰山

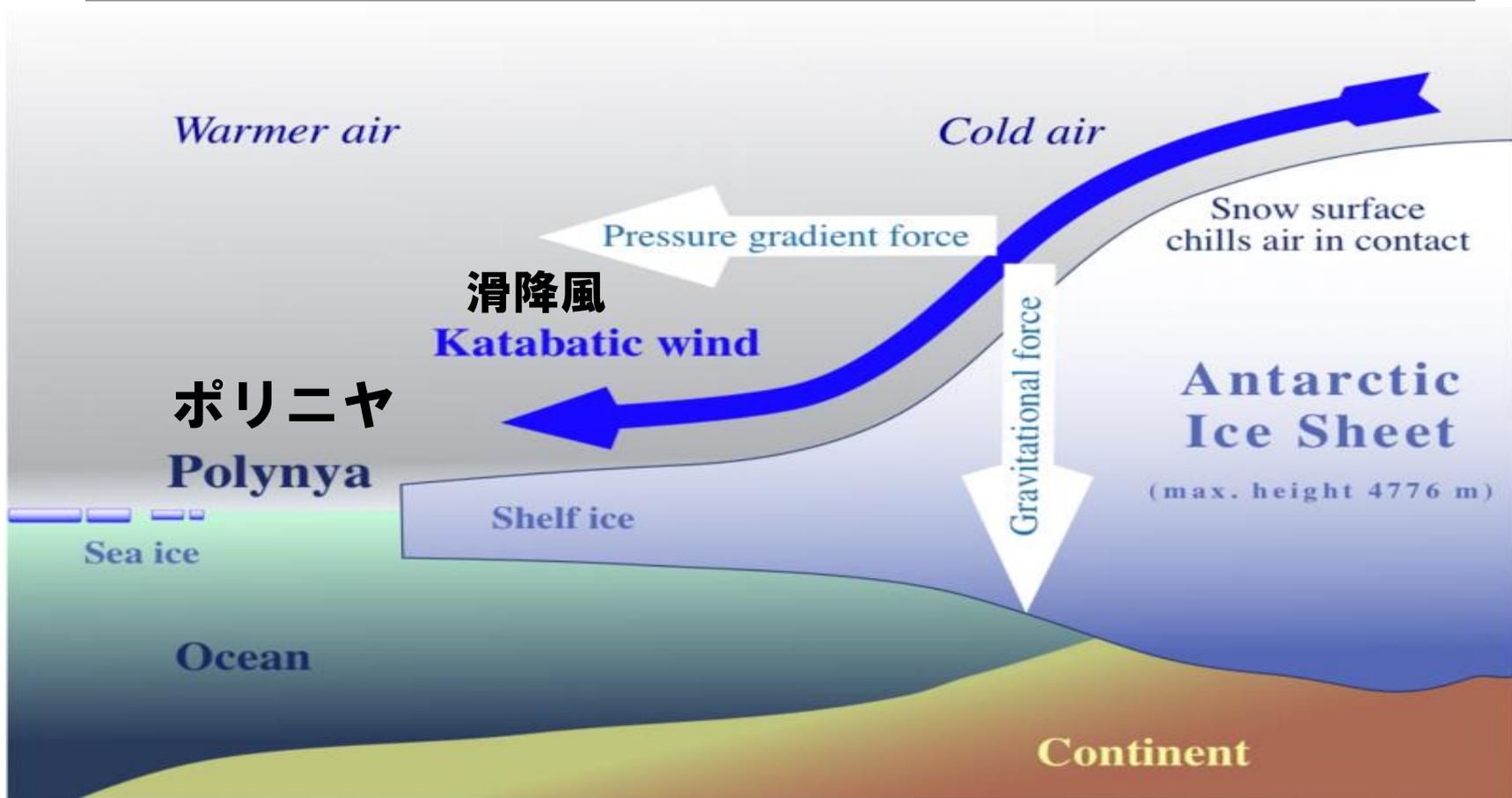


流氷

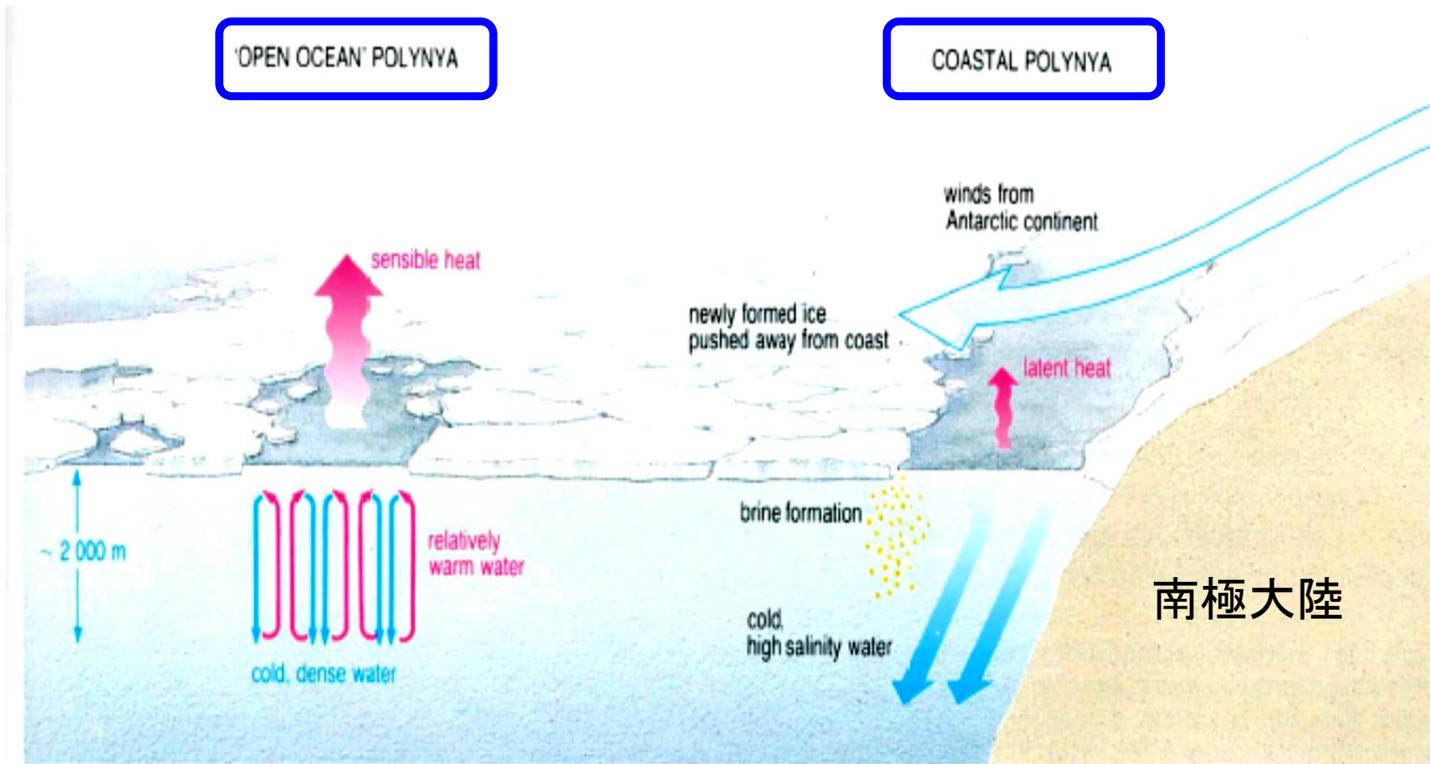


冰山

棚氷の周辺に発達するポリニヤ

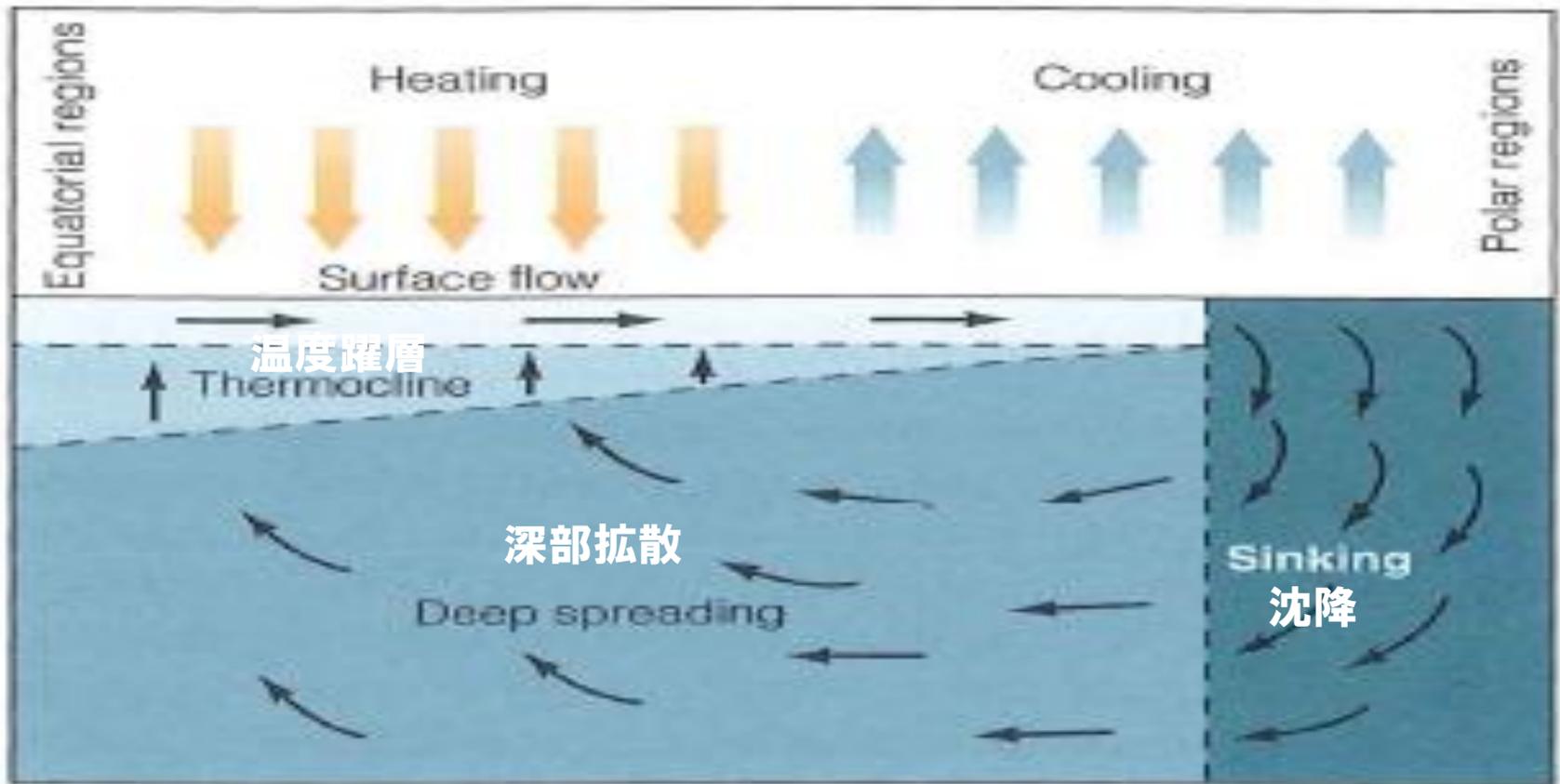


ポリニヤが熱塩循環に果たす役割



南極のWeddell海の冬季氷結した海氷に発生するpolynyaと呼ばれる穴は1970年代中ごろに初めて観察されて以来、不規則な間隔で現れるが、常にほぼ同じような地域に発生する。

熱塩循環は垂直方向



深層流の流れ方を知る

- ・どんなふうの流れているのか？
- ・どのくらいのスピード？
- ・経路は？

海水の年代を計ろう(年代測定法)

表 1.2 年代測定で用いられる“年代”の主な区分

数値年代 (絶対年代)	<ol style="list-style-type: none">1. 放射年代<ul style="list-style-type: none">同位体 (比) 年代宇宙線生成核種の壊変を反映した時代放射壊変系列の平衡からのずれを反映した年代放射線損傷年代宇宙線照射年代消滅核種による壊変生成核種量を反映した年代2. 化学反応現象を反映した年代3. 天文現象を反映した年代4. 年輪・年縞年代
相対年代	<ol style="list-style-type: none">1. 地質年代2. 化石年代3. 微化石年代4. 古地磁気年代5. 火山灰年代6. 同位体比層序年代

一万年よりも若い試料の年代測定

表 7.5 1 万年前頃より新しい年代を対象とした主な年代測定法と試料の種類

測定法	年代測定対象範囲(年前)										試料の種類								
	5	2	10 ⁴	5	2	10 ³	5	2	10 ²	5	2	10	火山噴 火物	ガラス (黒曜石など)	海成・湖 沼堆積物	炭酸塩	生物遺骸	土器・陶 器など	地下水・ 氷・海水
K-Ar	-----										◎	○							
¹⁴ C	-----												◎	△	◎	○	△		
³ H(³ He)	-----										△						◎		
³⁹ Ar	-----																△		
²³⁰ Th- ²³⁴ U ²³¹ Pa- ²³⁵ U ²³⁴ U- ²³⁸ U	-----										○		◎	○	○				
²³⁰ Th ²³¹ Pa ²¹⁰ Pb	-----												◎		△		○		
TL	-----										◎		○			◎			
ESR	-----										○		○	◎	○				
ラセミ化	-----												○		○				
水和	-----											◎	△						
考古磁気層序	-----										◎		△			◎			
酸素同位体層序	-----												◎				○		
注	表7.1の注と同じ																		

放射年代測定の原理

放射年代測定とは？

Radioactive decay

トリチウム (^3H) の年代測定

炭素14 (^{14}C) による年代測定

トリチウム (^3H)の年代測定



宇宙線の照射によって作り出される。

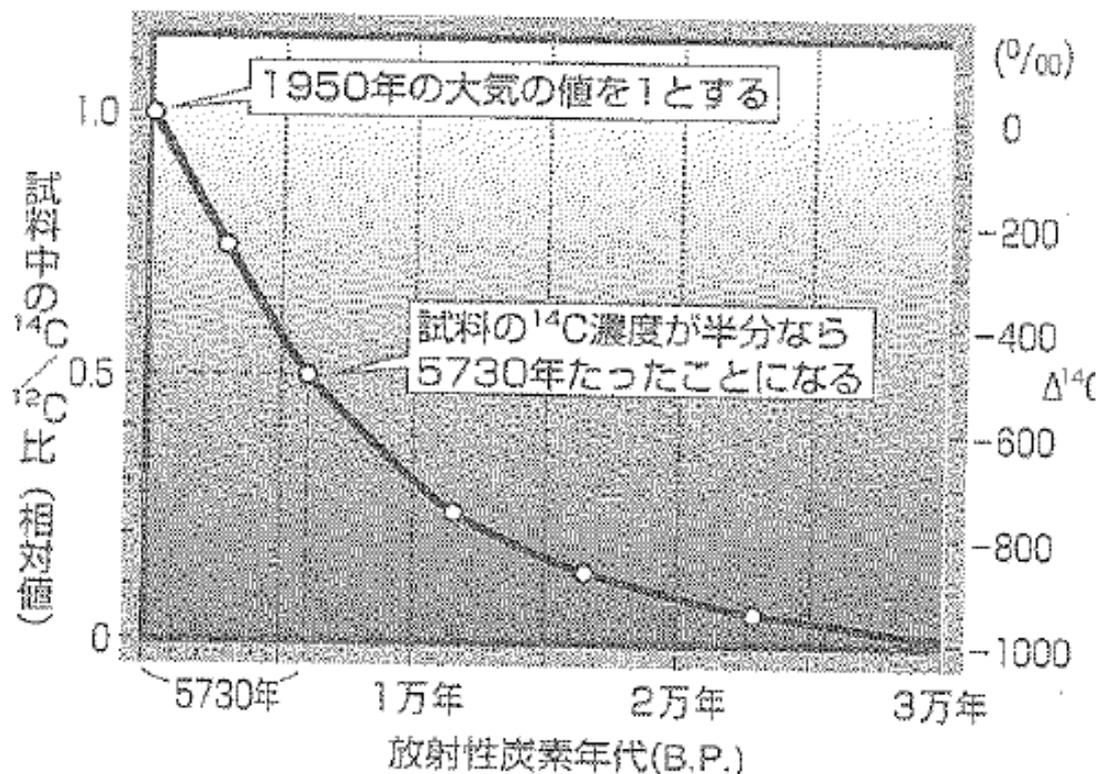


トリチウムは β 壊変して、ヘリウムに変化する。

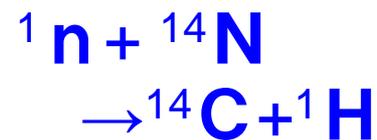
海水表面における $^3\text{He}/^4\text{He}$ ($1.384 \cdot 10^{-6}$) は大気と平衡状態にある。この時1g中の海水には、 $6 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^3$ の ^3He が含まれていることになる。大気との交換が絶たれると、 ^3H からの ^3He が増加し、上記の比が高くなる。

炭素年代測定法

◆炭素14による年代測定法



*B.P.というのは、1950年を基準年としてそれより何年前かを示す。

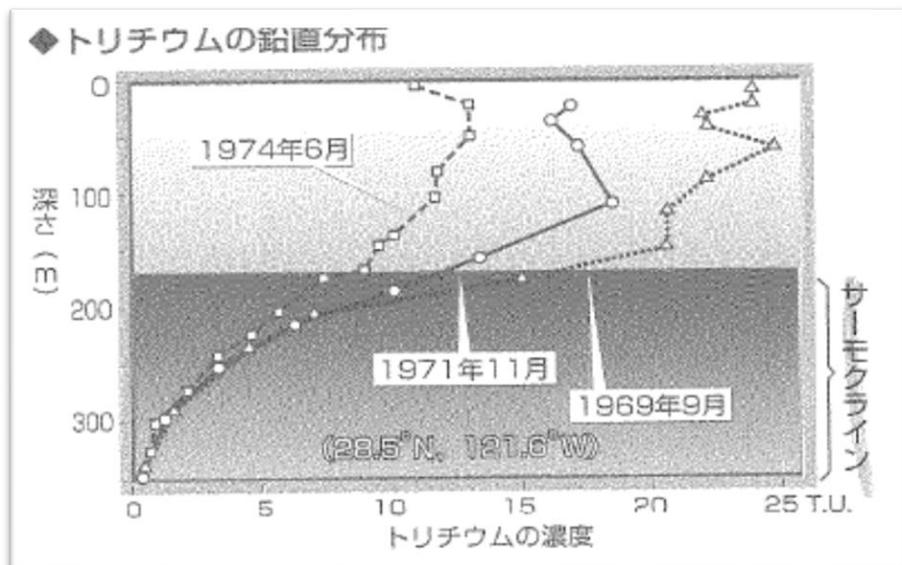


大気中の窒素が
中性子線によって
放射性炭素に変わる。



その炭素は、 β 壊変
して窒素に戻る。そ
のときの半減期は、
5730年である。
宇宙線量が一定なら、
生産される放射性炭
素の量は一定と仮定
する。

トリチウムの水深変化



放射性元素の基本：トリチウム

1950年代、60年代に数多く行われた大気圏内の核実験によりつくられた、放射性同位体です。これらの同位体は自然界にはもともとなかったか、ごくわずかしかな存在しないもので、核実験により成層圏に舞い上がったものが、世界的に広がり、10年ほどで対流圏に戻り、雨によって海洋表面に供給されたものです。これらの同位体の分布を調べると、1950年代からの表層にあった海水の動きを読みとることができます。調査の結果、ほとんどの海洋でトリチウムなどの元素は表層付近数百mに分布が限られ、海水の鉛直方向の混合が起きにくいことを示しましたが、北大西洋では、4000mの深海までこれらの同位体が到達していることが観測された。



大気圏内核実験の例

ツアリーボンバー：人類史上最大の水爆実験，1961年
広島型原爆の3300倍の威力を持つ。

サルガッソウ海の年代値と水深の関係

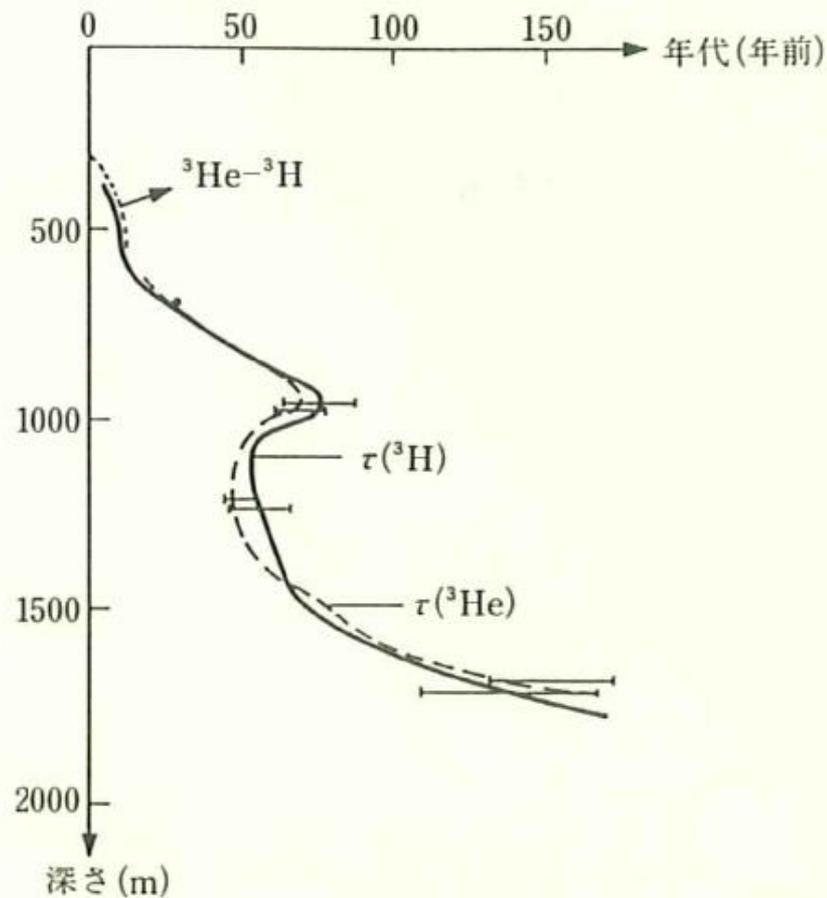
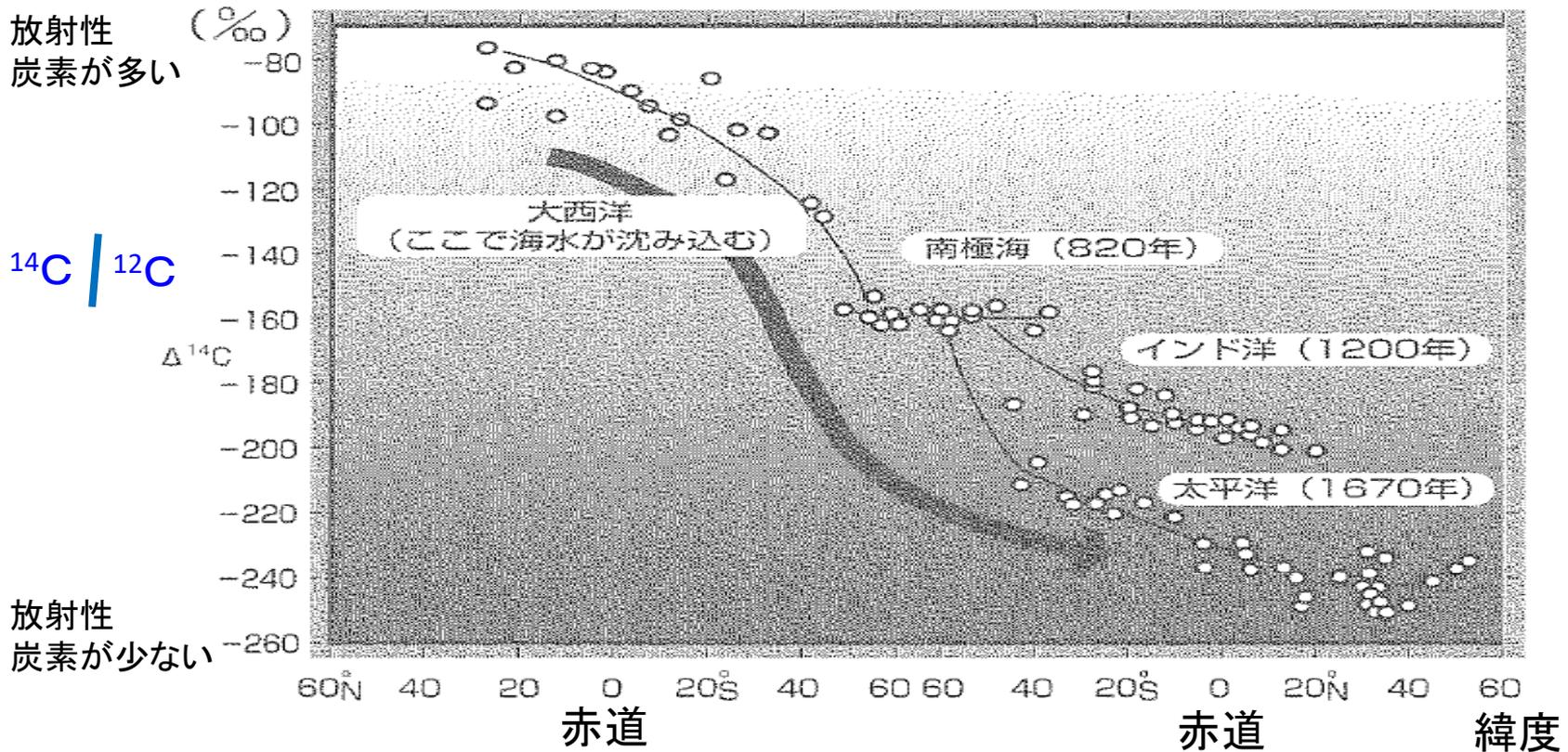


図 7.19 サルガッソウ海 (Sargasso Sea) における海水の深さ方向の年代分布 (Jenkins, 1980)

530 m の深さまでは ${}^3\text{He}-{}^3\text{H}$ 法, それより深い部分では, ${}^3\text{H}$ および ${}^3\text{He}$ から推定された年代分布曲線 $\tau({}^3\text{H})$ および $\tau({}^3\text{He})$ で示されている.

海域による深層水の年代の違い

◆海水が沈み込んでからの深層水の年代



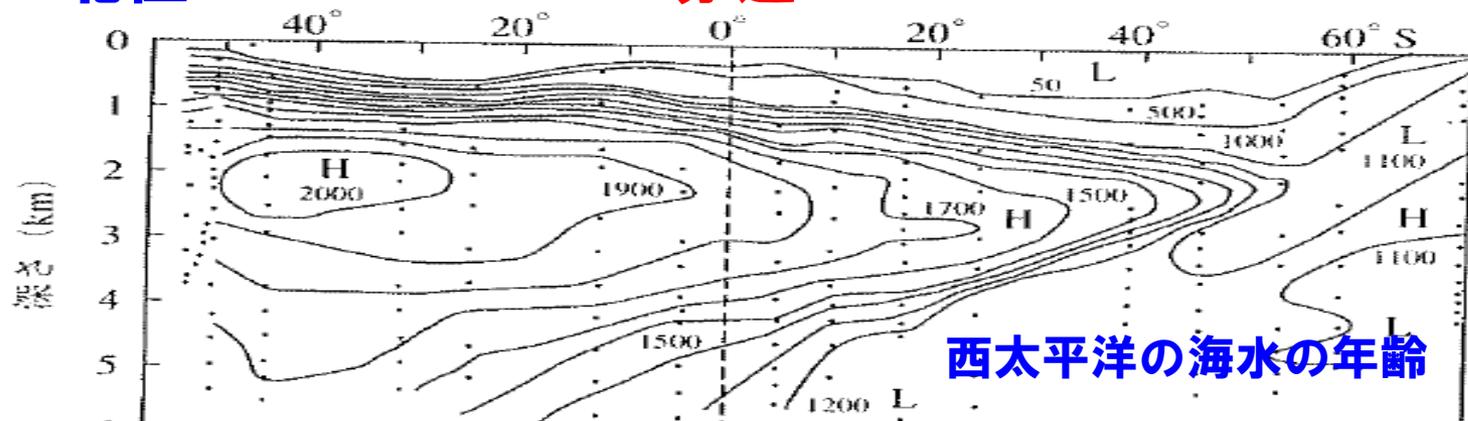
$$\Delta^{14}\text{C} = \{ [^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \text{ sample}] / [^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \text{ standard}] - 1 \} * 1000 \text{ (千分率)}$$

炭素同位体比からとまった海水の年齢

北極

赤道

南極



北極

赤道

南極

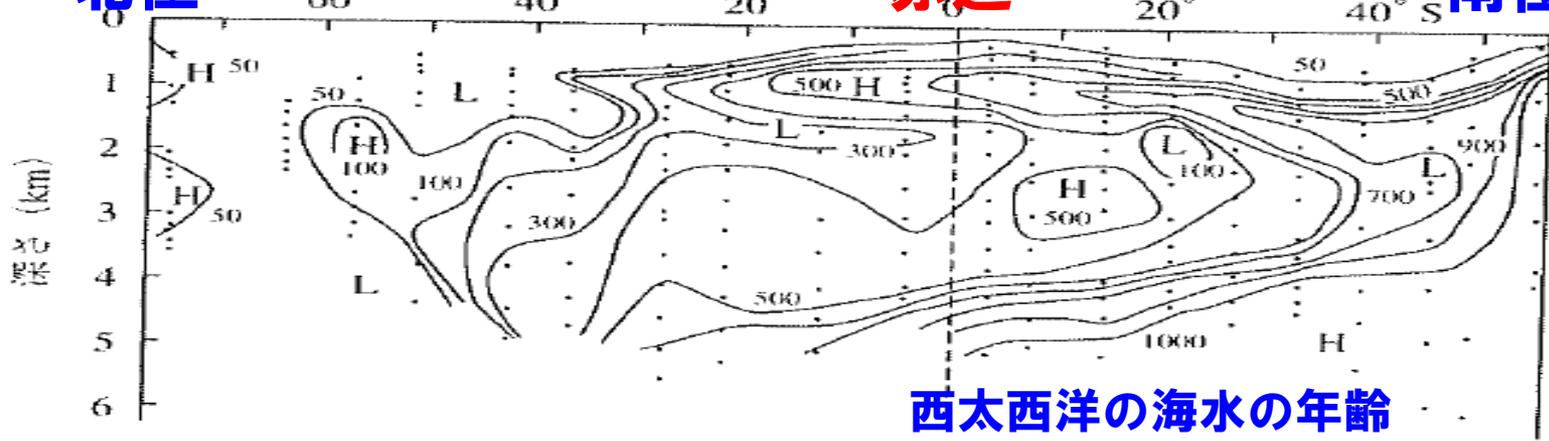
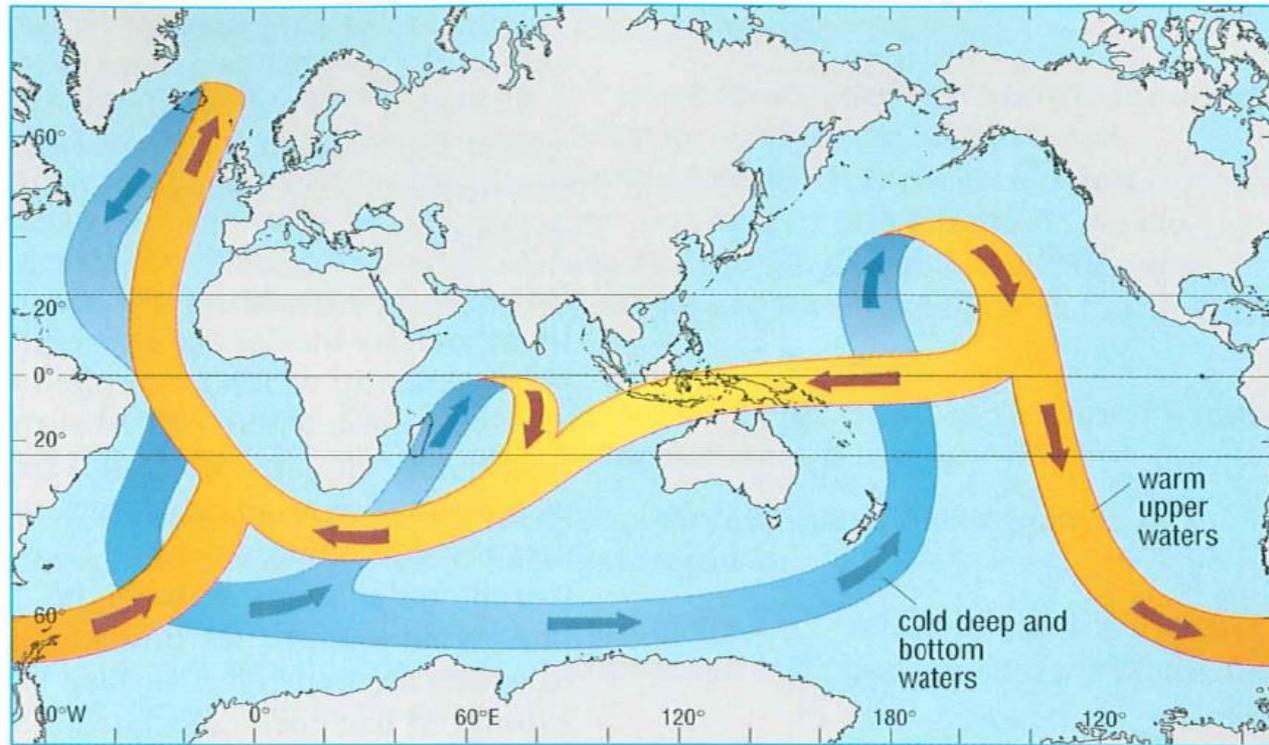


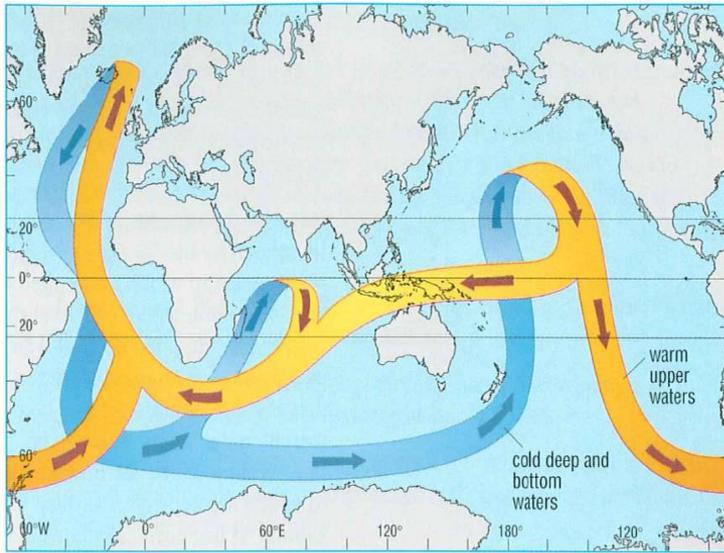
図 6-11 西太平洋, 西大西洋の海水の年齢分布, 数字は年 (角皆, 1987)

Wallace Broecker による Thermohaline conveyor belt (ベルトコンベアモデル)



**もっと立体的な深層流のモデルを構築。
オレンジ色の部分は、最浅部でも1000m前後を想定している。**

ONEPIECEもパクる海洋学



深層流循環をわかりやすく説明した著名な図：Wallace Broecker 博士による有名なベルトコンベアモデル

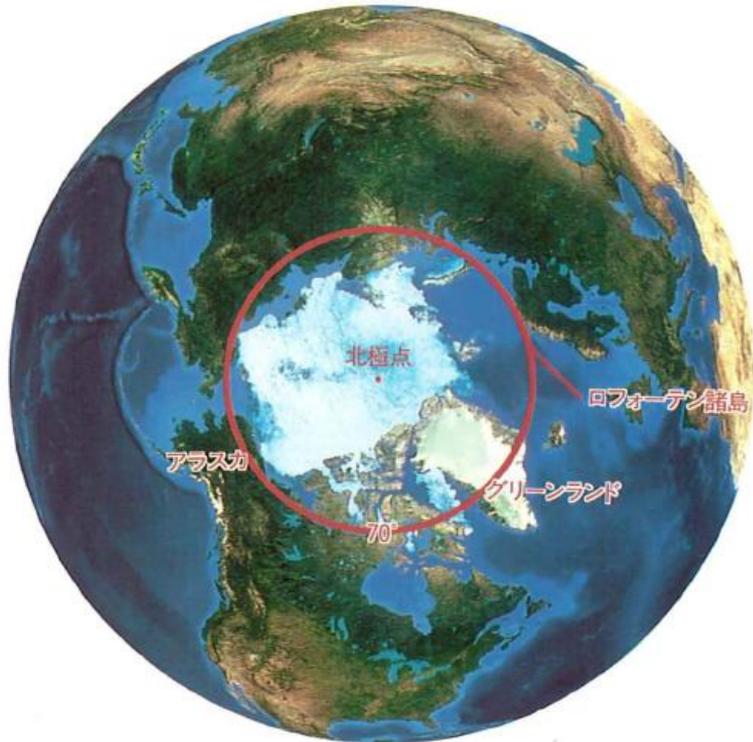


集英社発行：ONEPIECE 第62巻 604話より

お！！！！フランキーも同じ図を使って説明してるぞ

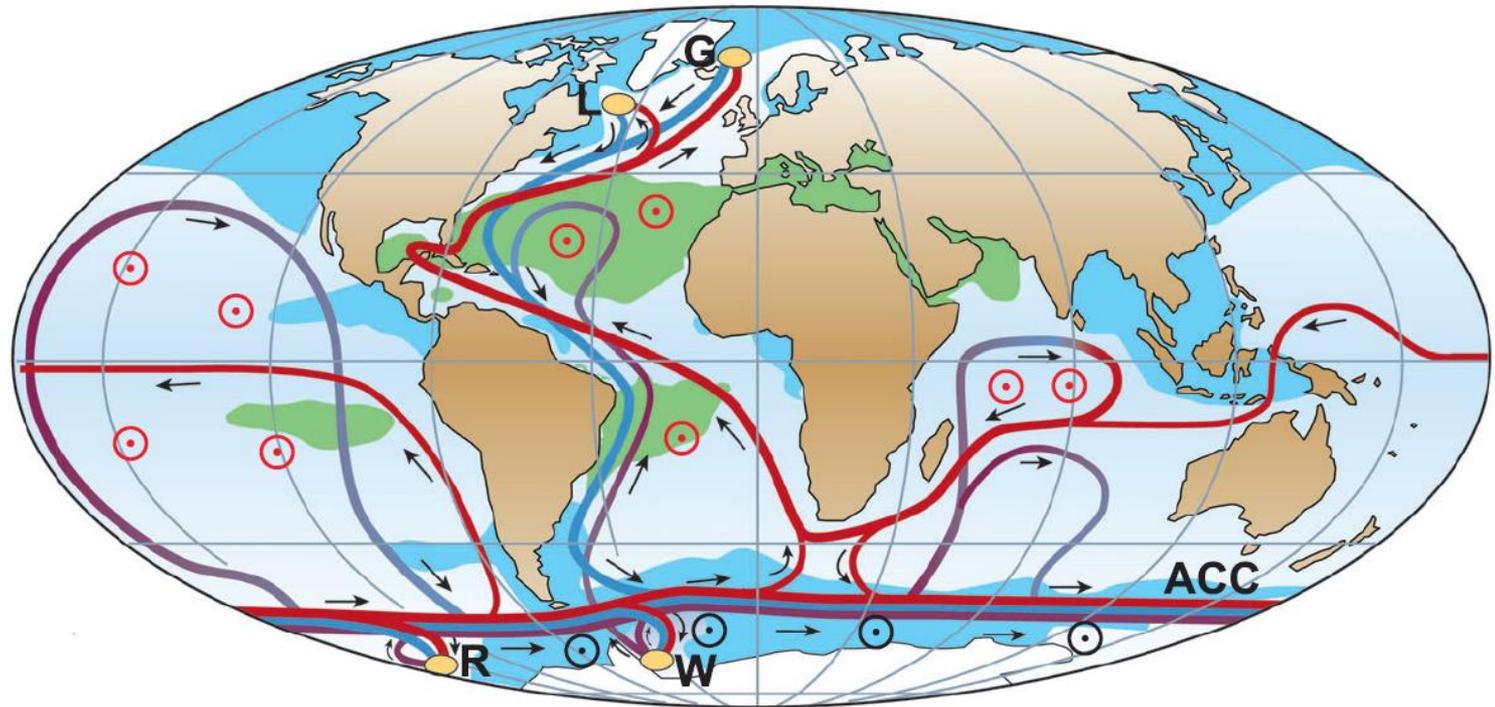
ONEPIECEの作者である尾田栄一郎氏（熊本県熊本市出身）は、“海洋学”を熱心に勉強しているとしか思えない。

北大西洋海流の北上する理由



メキ
赤道
まれ
外力
岸に
1000

最近のモデル

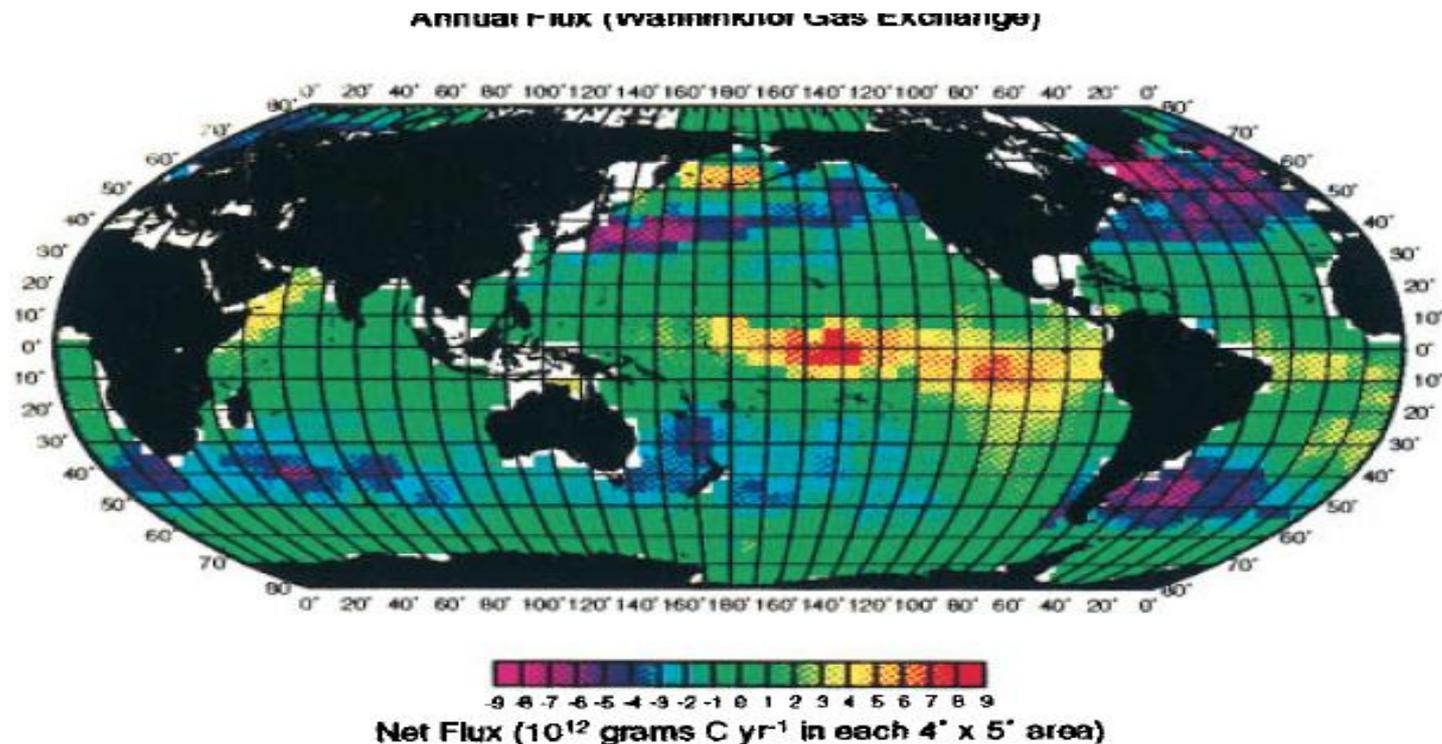


- Surface flow
- Deep flow
- Bottom flow
- Deep Water Formation

- ⊙ Wind-driven upwelling
- ⊙ Mixing-driven upwelling
- Salinity > 36 ‰
- Salinity < 34 ‰

- L Labrador Sea
- G Greenland Sea
- W Weddell Sea
- R Ross Sea

大気中の二酸化炭素を深海底に運び去る



Global air-sea flux of CO₂: An estimate based on measurements of sea-air pCO₂ difference; TARO TAKAHASHI*, RICHARD A. FEELY†, RAY F. WEISS‡, RIK H. WANNINKHOF §, DAVID W. CHIPMAN*, STEWART C. SUTHERLAND*, AND TIMOTHY T. TAKAHASHI (1997)

なので、深層大循環が止まると大気中の二酸化炭素濃度が上がる。

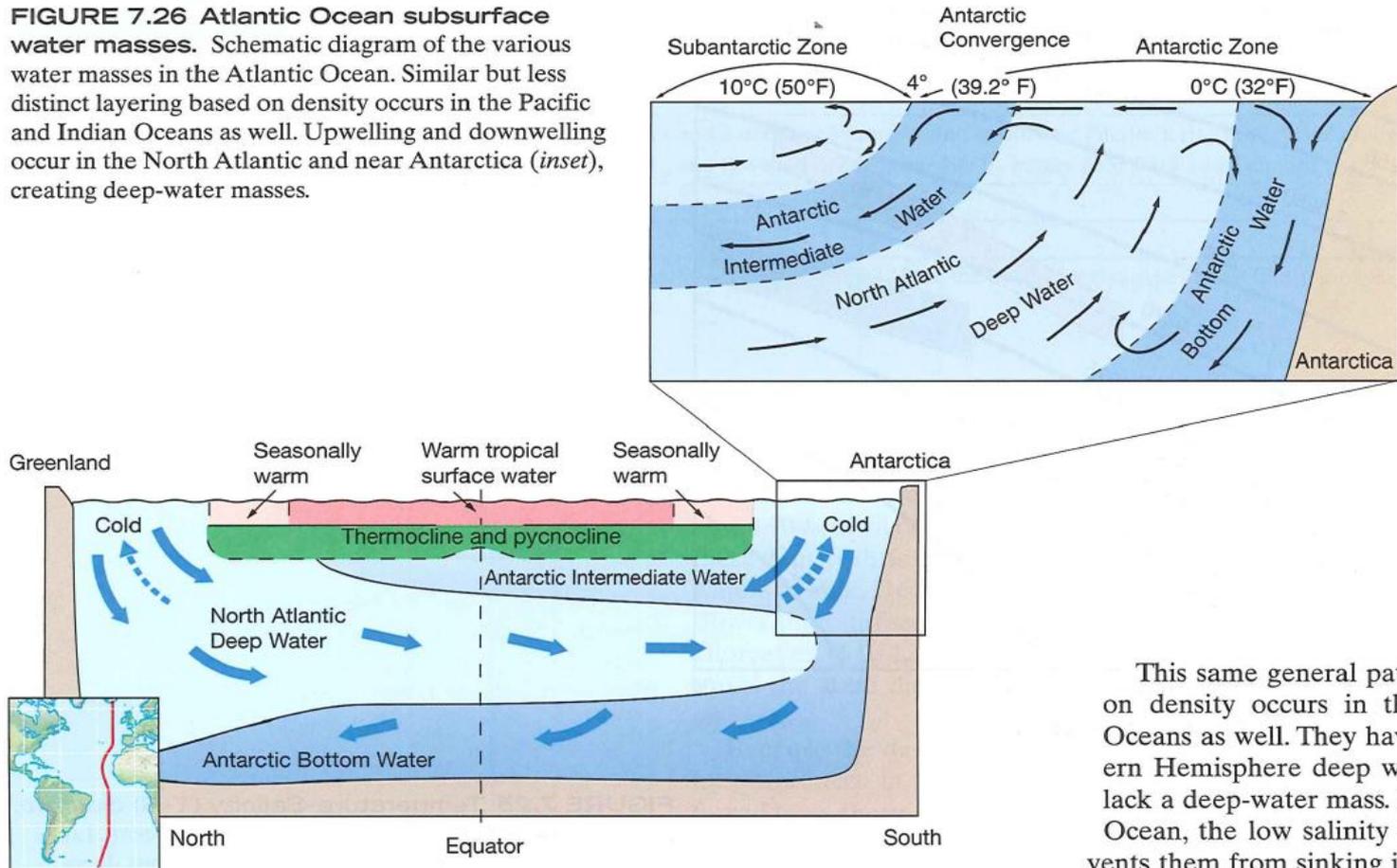
深層流循環と地球温暖化問題

教科書p86-87を参照してください。

ここまで

地球規模の熱塩循環概念図

FIGURE 7.26 Atlantic Ocean subsurface water masses. Schematic diagram of the various water masses in the Atlantic Ocean. Similar but less distinct layering based on density occurs in the Pacific and Indian Oceans as well. Upwelling and downwelling occur in the North Atlantic and near Antarctica (*inset*), creating deep-water masses.

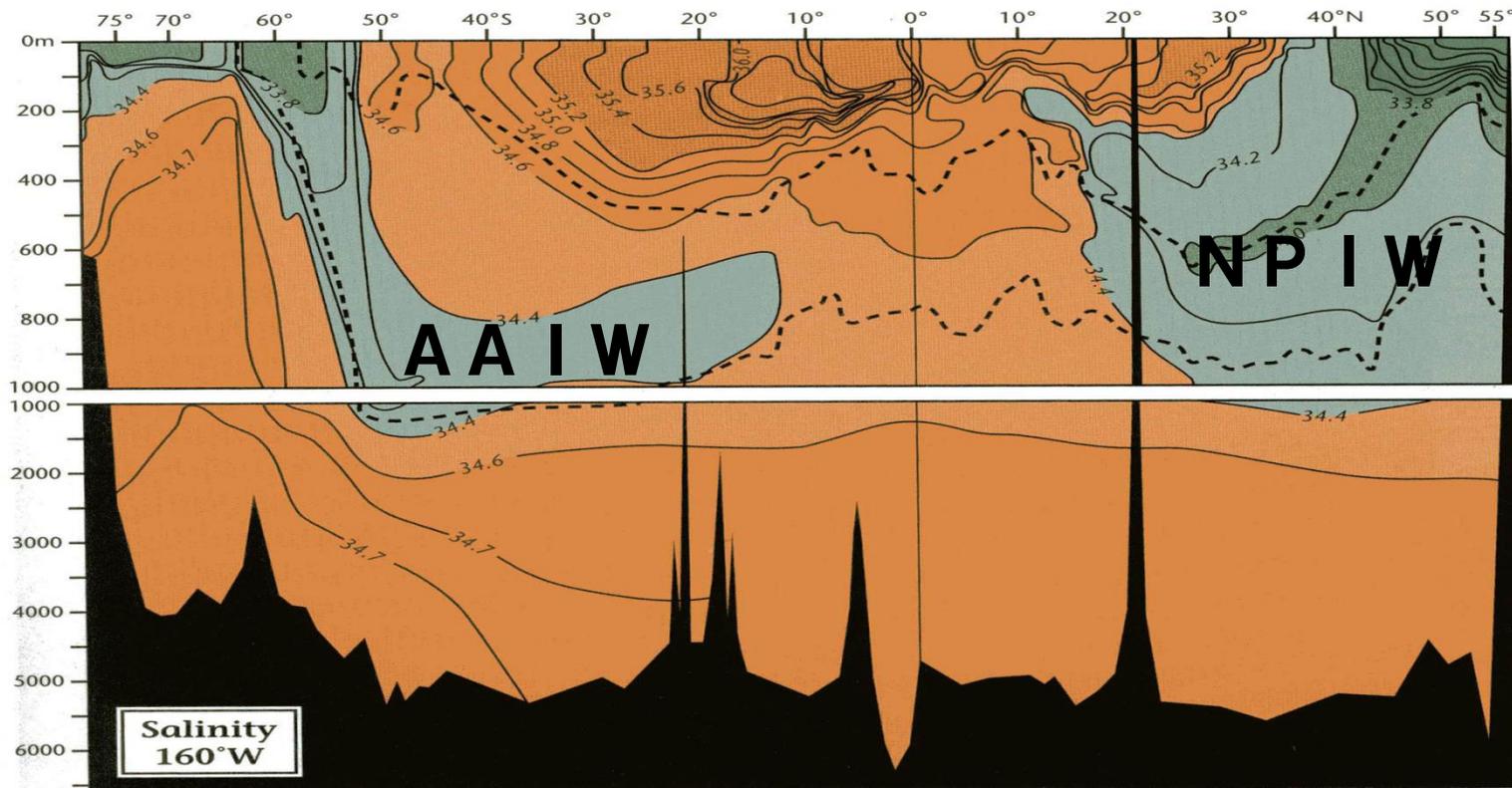


This same general pattern on density occurs in the Oceans as well. They have Northern Hemisphere deep water masses but lack a deep-water mass in the Southern Ocean, the low salinity of the Antarctic vents them from sinking into the deep.

中層水：冷えて重くなった海水

南極

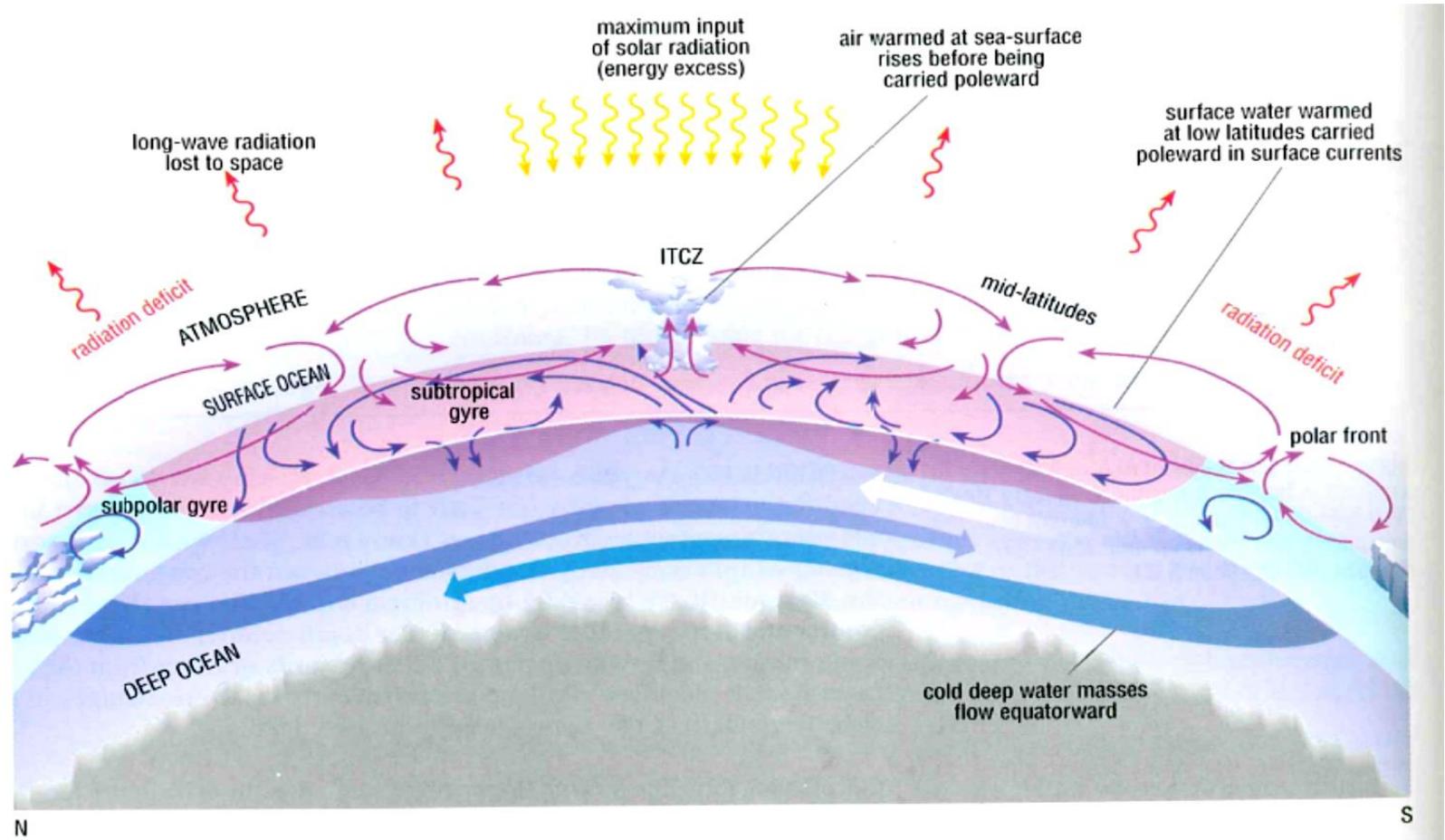
北極



南極中層水：Antarctic intermediate water

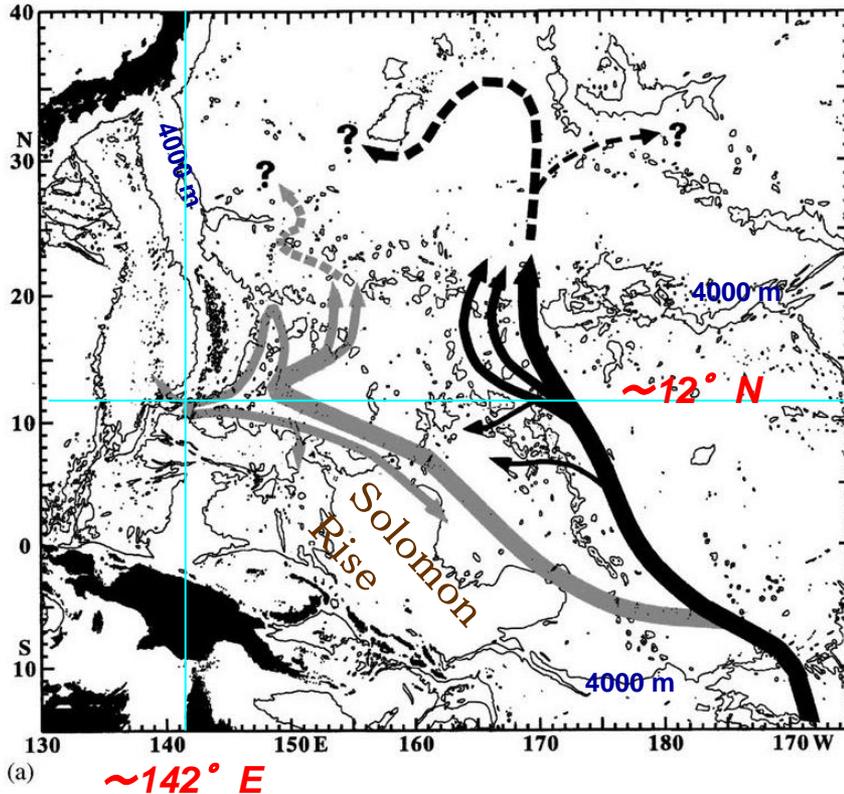
北太平洋中層水：north Pacific intermediate water

地球表層の大循環(おさらい)

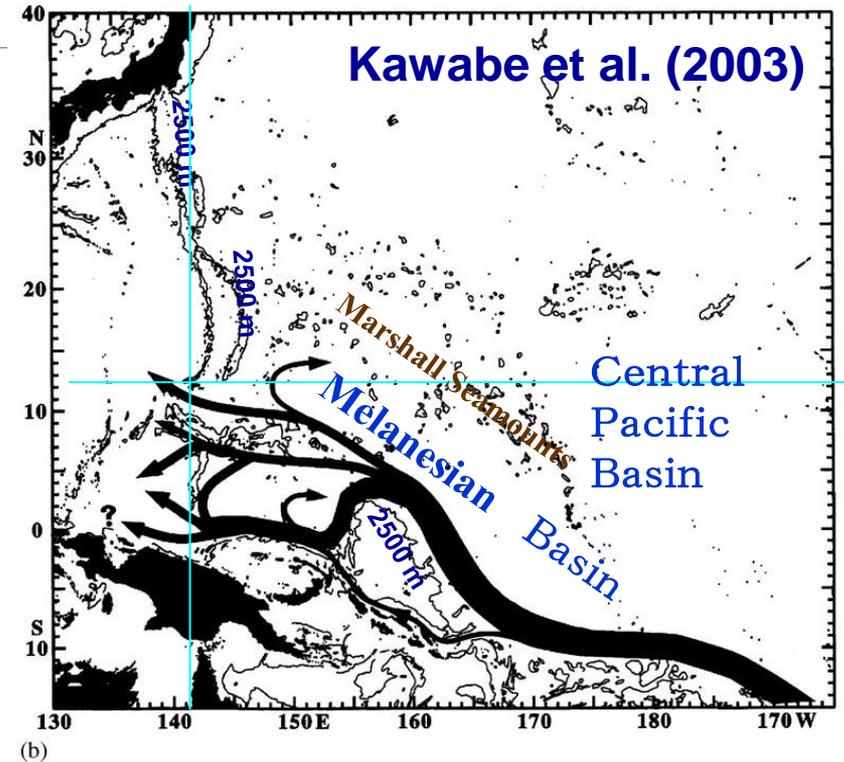


深層流は、海底地形に沿って進む

Lower Circumpolar Water (LCPW)



Oxygen-rich water (-2000 ~ -3000m)



深層流は、メラネシア海盆を西北西に向かう。
海底凹地 (Melanesian basin) に強く支配されるのでは？

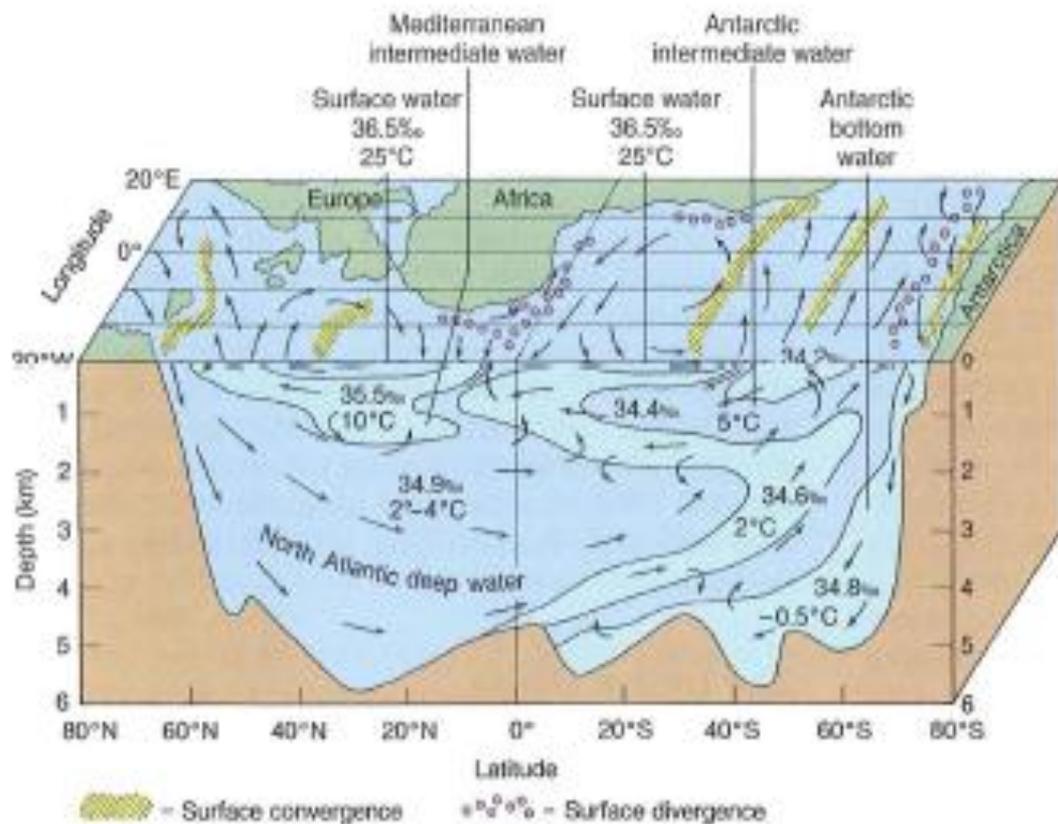


Figure 8.6 The anatomy of the Atlantic Ocean. Surface and subsurface circulation are related here. The surface currents converge to produce downwelling; water sinks to its density level and flows horizontally. Water at depth rises under zones of surface divergence.

海水と光の関係

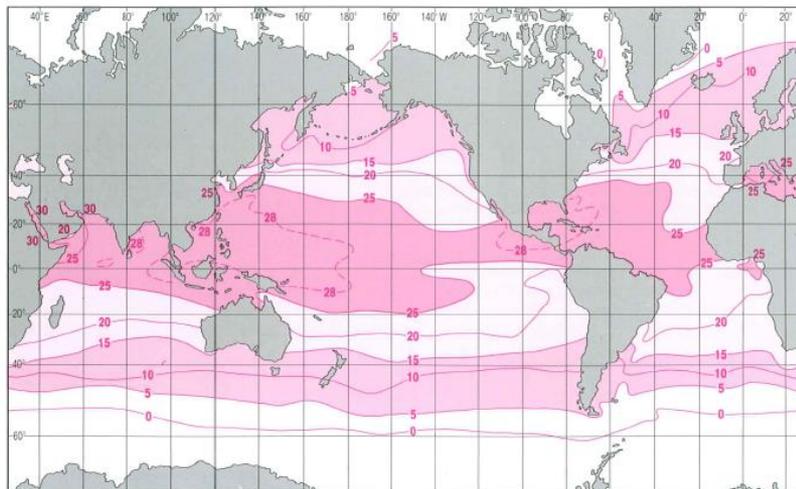
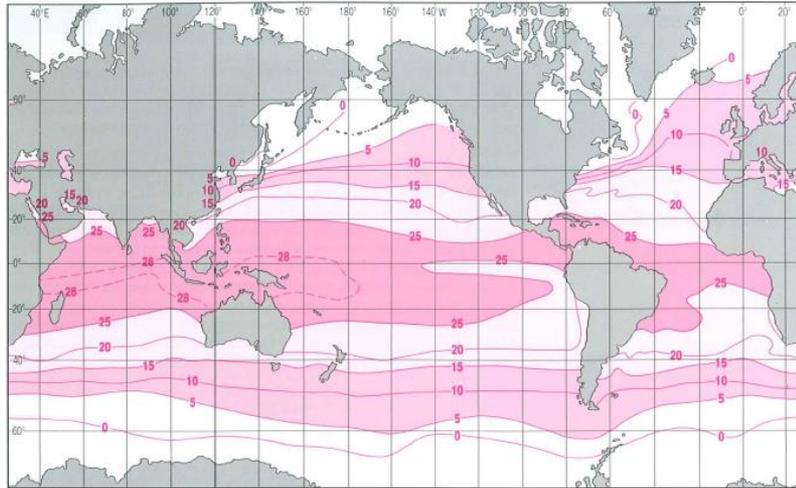
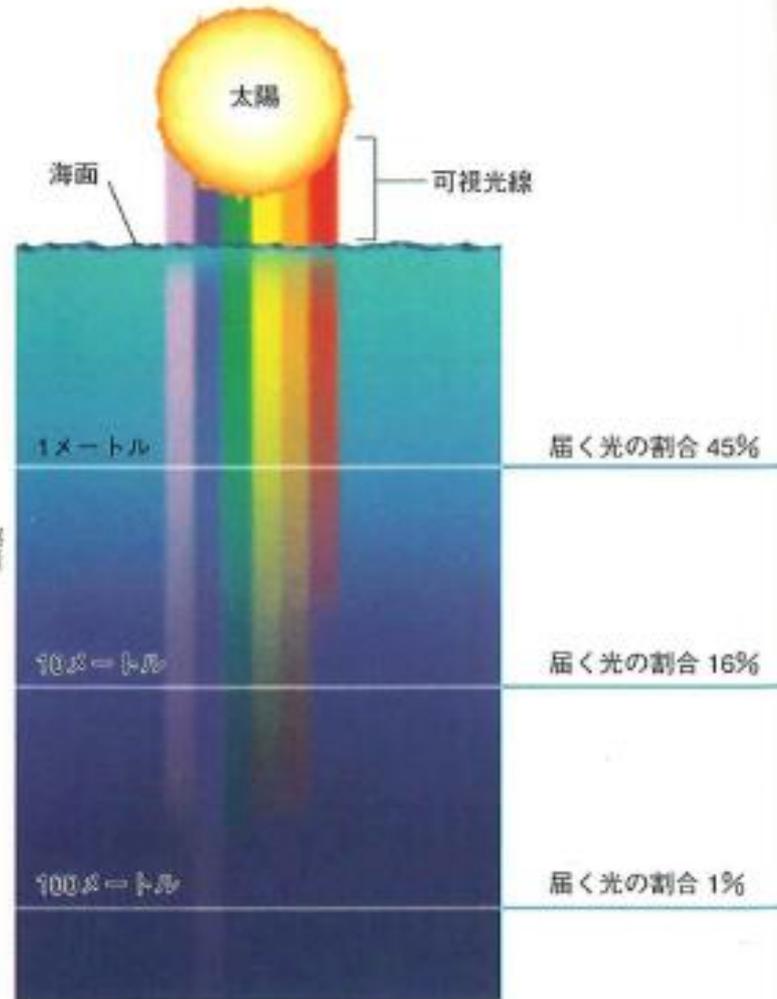


Figure 2.12 The global distribution of sea-surface temperature (°C) (a) in February, (b) in August.



水は、電磁波を容易に吸収してしまう。吸収の割合は波長によって異なる。つまり、光エネルギーは表層で吸収される

用語

補償深度(compensation depth) :

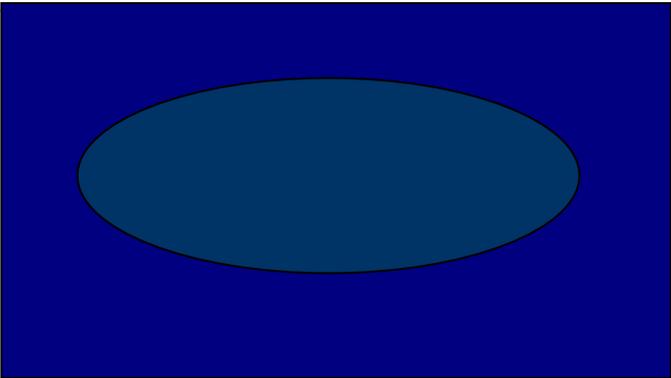
補償深度は、植物の光合成による酸素生産量と呼吸による消費量がつりあう場所。経験的には、表面の太陽エネルギー(100%)が1%までに減衰する深度と考えられている。

- **有光層**(euphotic layer): 補償深度よりも浅い部分
- **無光層**(aphotic layer): 補償深度よりも深い部分
- 有光層の厚さは、**懸濁物**(seston)によって左右される。

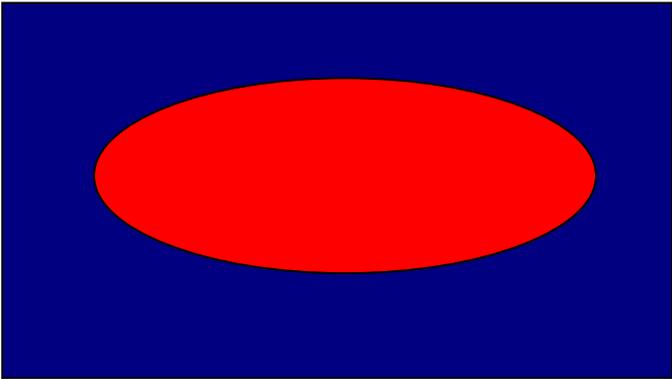
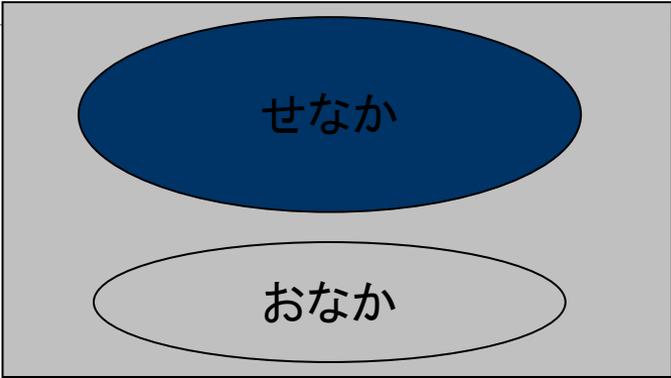
一般に、懸濁物の量は、**透明度**(transparency)によって示され、有光層の深さはおおよそ透明度の2~3倍とされている。

散乱光と魚の身の隠し方

上から見た場合



下から見上げた場合

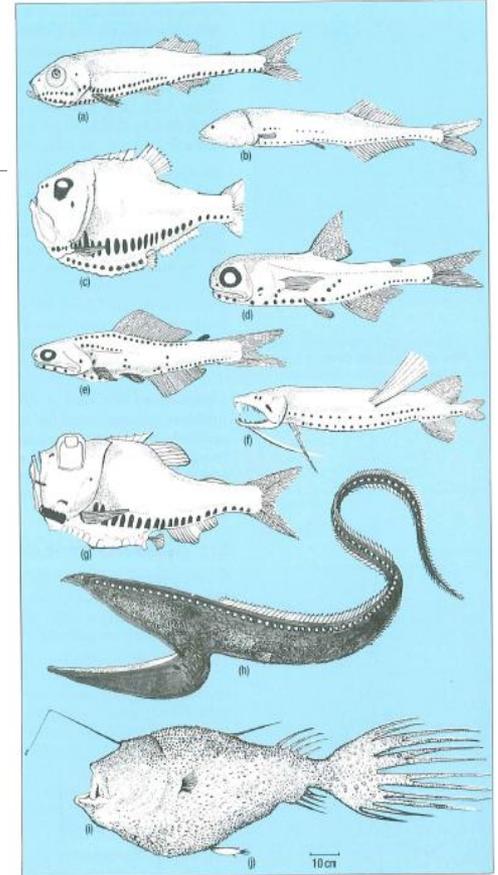


海底の赤い魚



海底の赤い魚（実際は保護色になる）

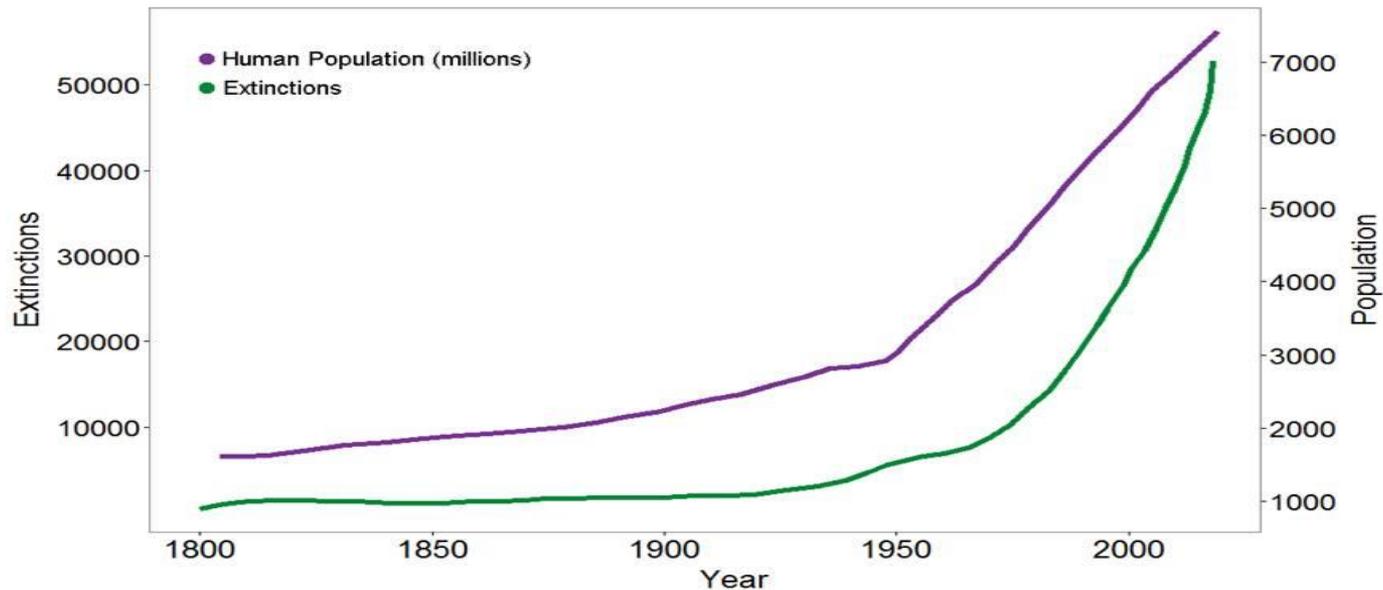
発光器を持つ魚



比較的深い宙層を主に遊泳する魚達は、日中のかすかな光に自分の影を出さないように発光器を使ってカモフラージュしている。

人口増加と絶滅種の数

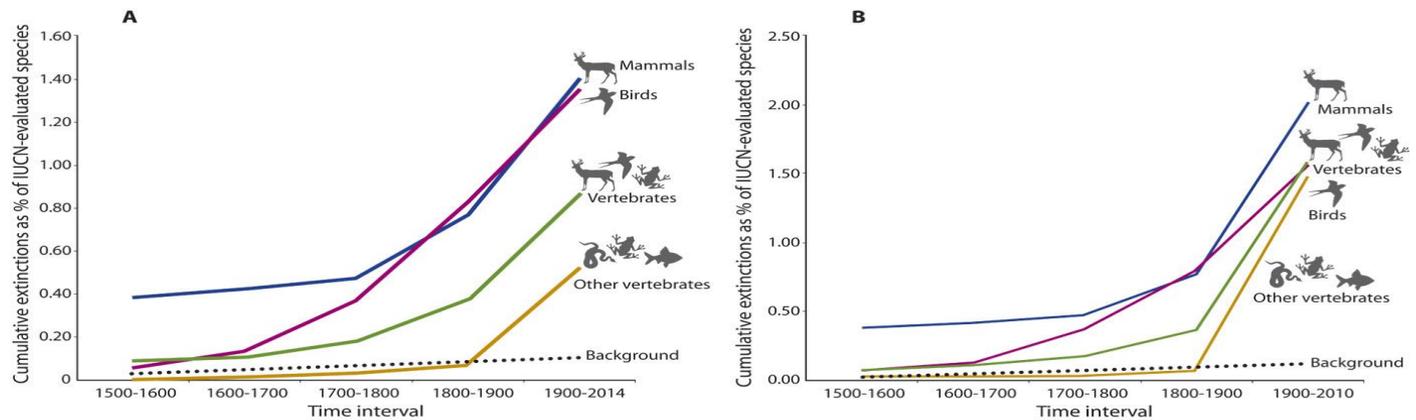
Humans & The Extinction Crisis



Data source: Scott, J.M. 2008. *Threats to Biological Diversity: Global, Continental, Local*. U.S. Geological Survey, Idaho Cooperative Fish and Wildlife, Research Unit, University Of Idaho.

絶滅のスピード

Fig. 1 Cumulative vertebrate species recorded as extinct or extinct in the wild by the IUCN (2012).



Gerardo Ceballos et al. *Sci Adv* 2015;1:e1400253

Copyright © 2015, The Authors

ScienceAdvances
AAAS