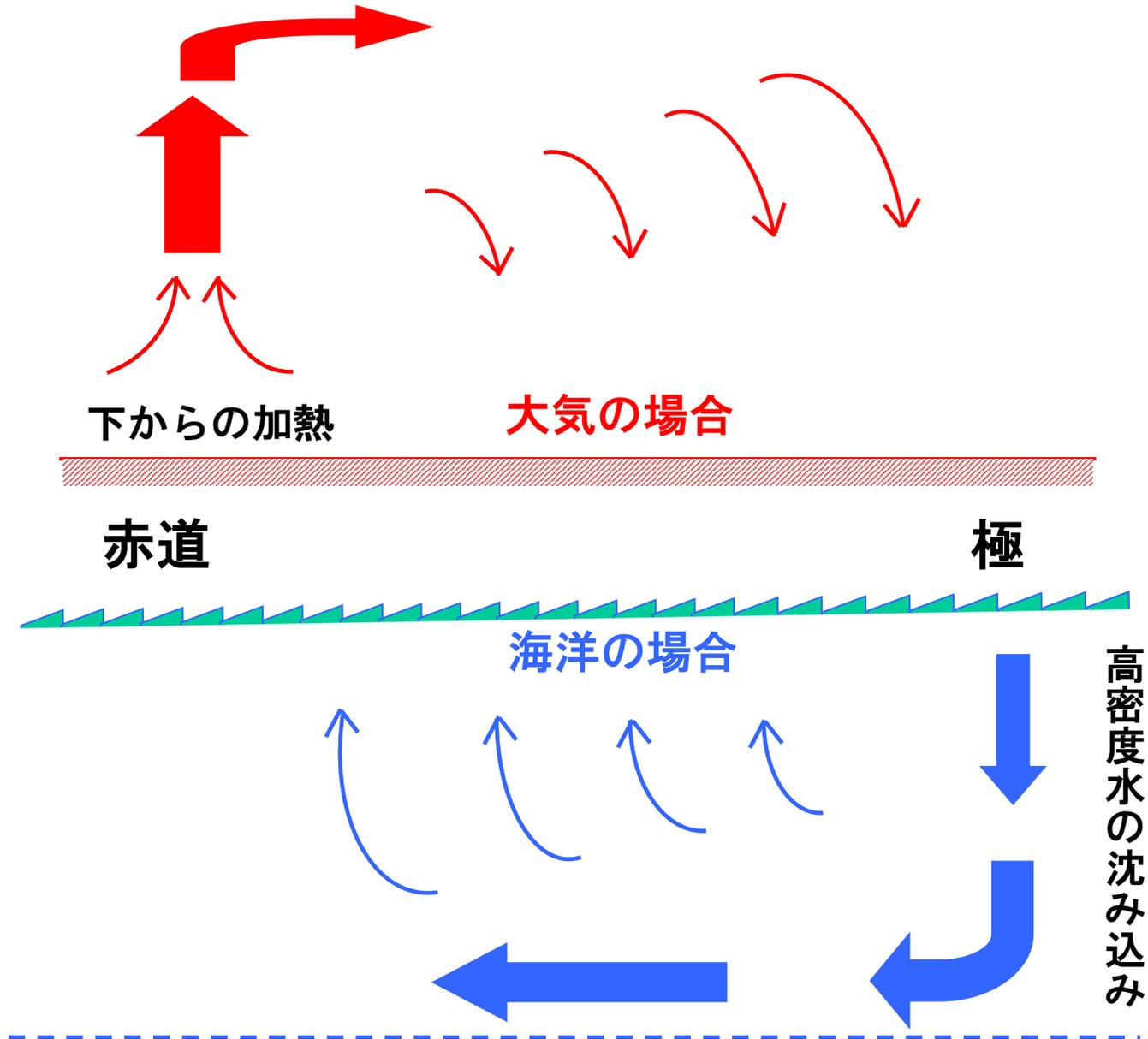


第1回 大気海洋物理学基礎論(海洋編)

- 深層(熱塩)循環
- 海水の性質

大気と海洋の地球規模鉛直循環

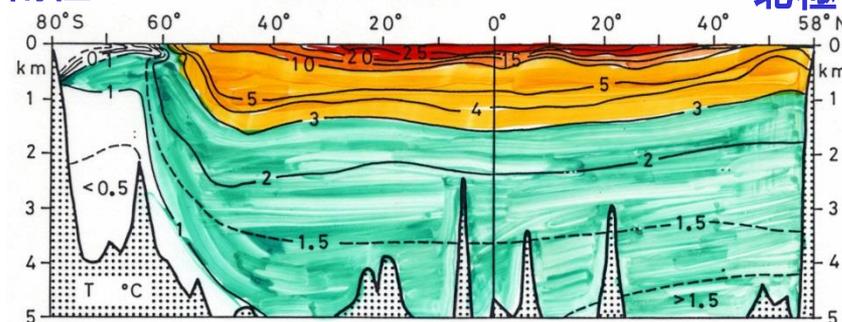


太平洋

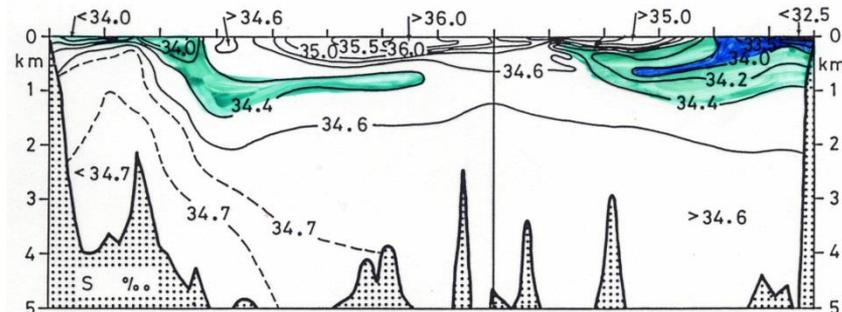
南極

PACIFIC OCEAN AT 160°W

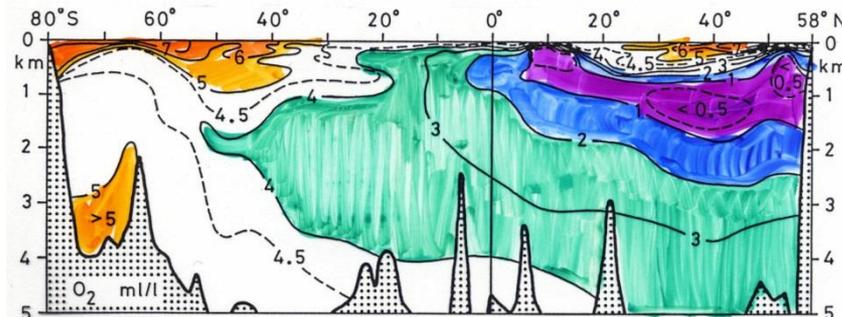
北極



水温



塩分



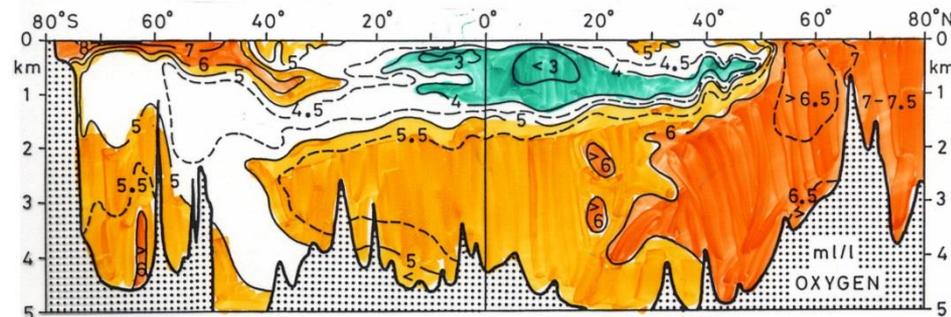
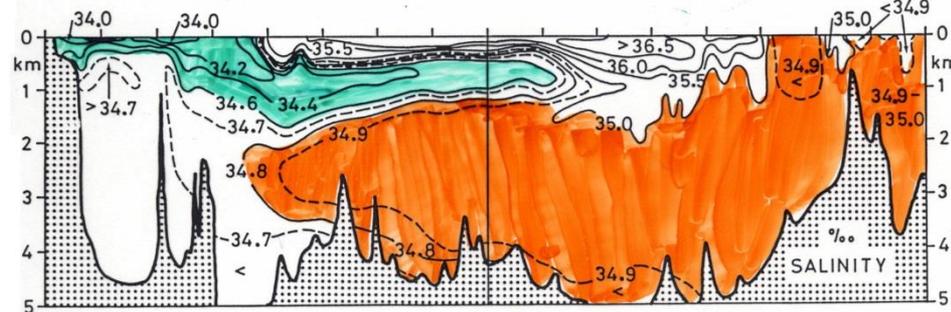
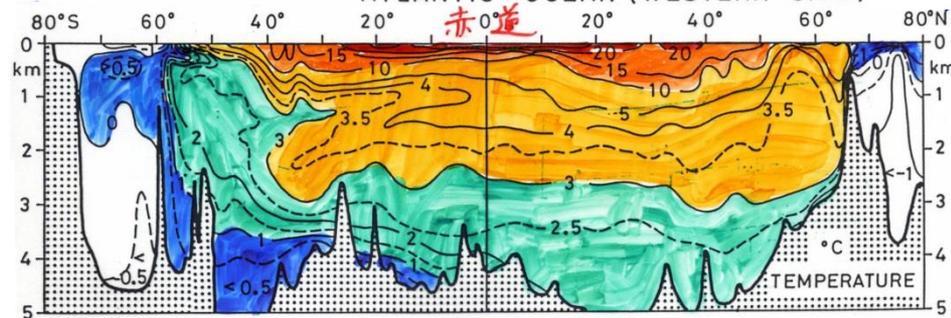
溶存酸素

大西洋

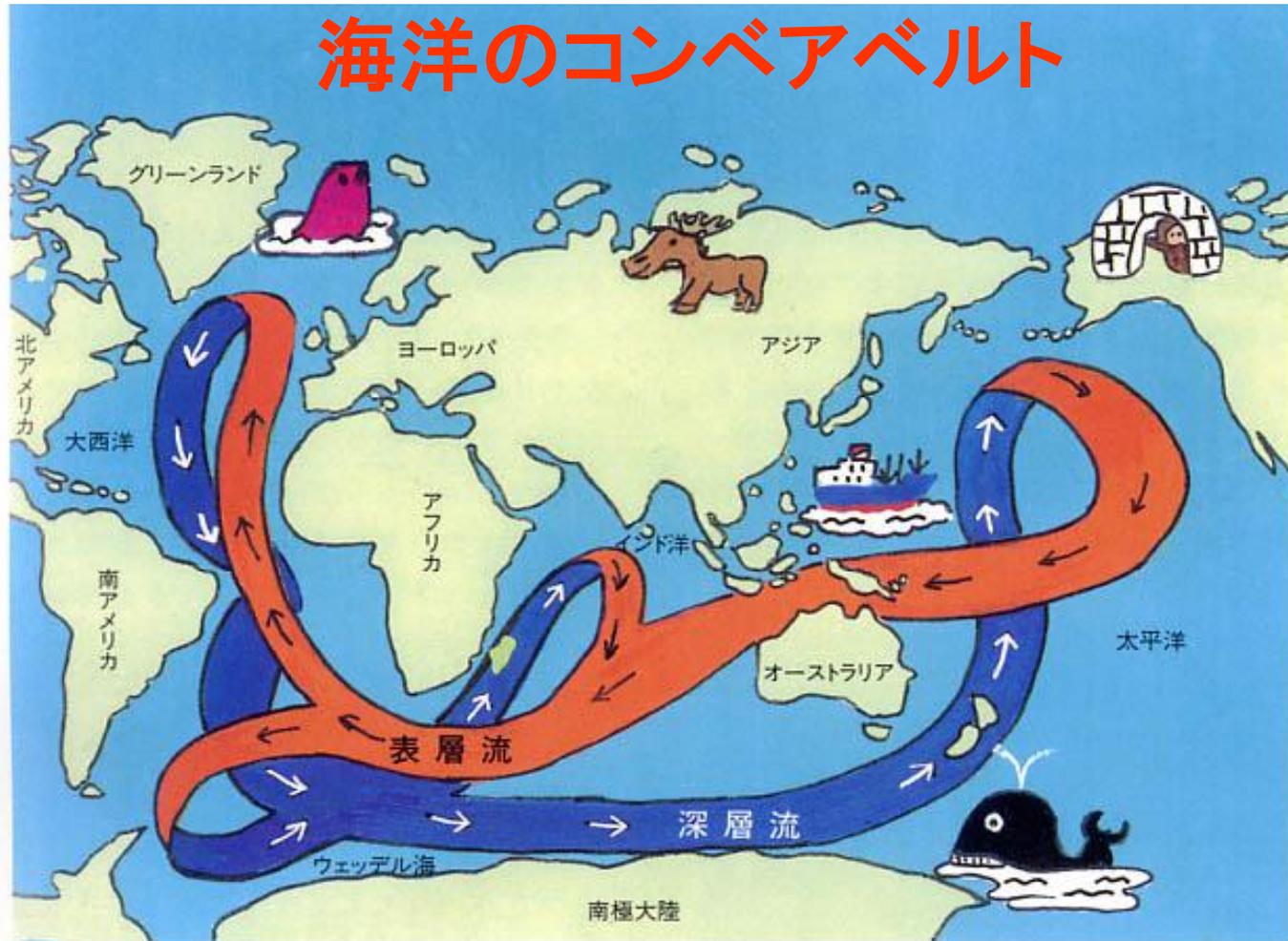
南極

ATLANTIC OCEAN (WESTERN SIDE)

北極

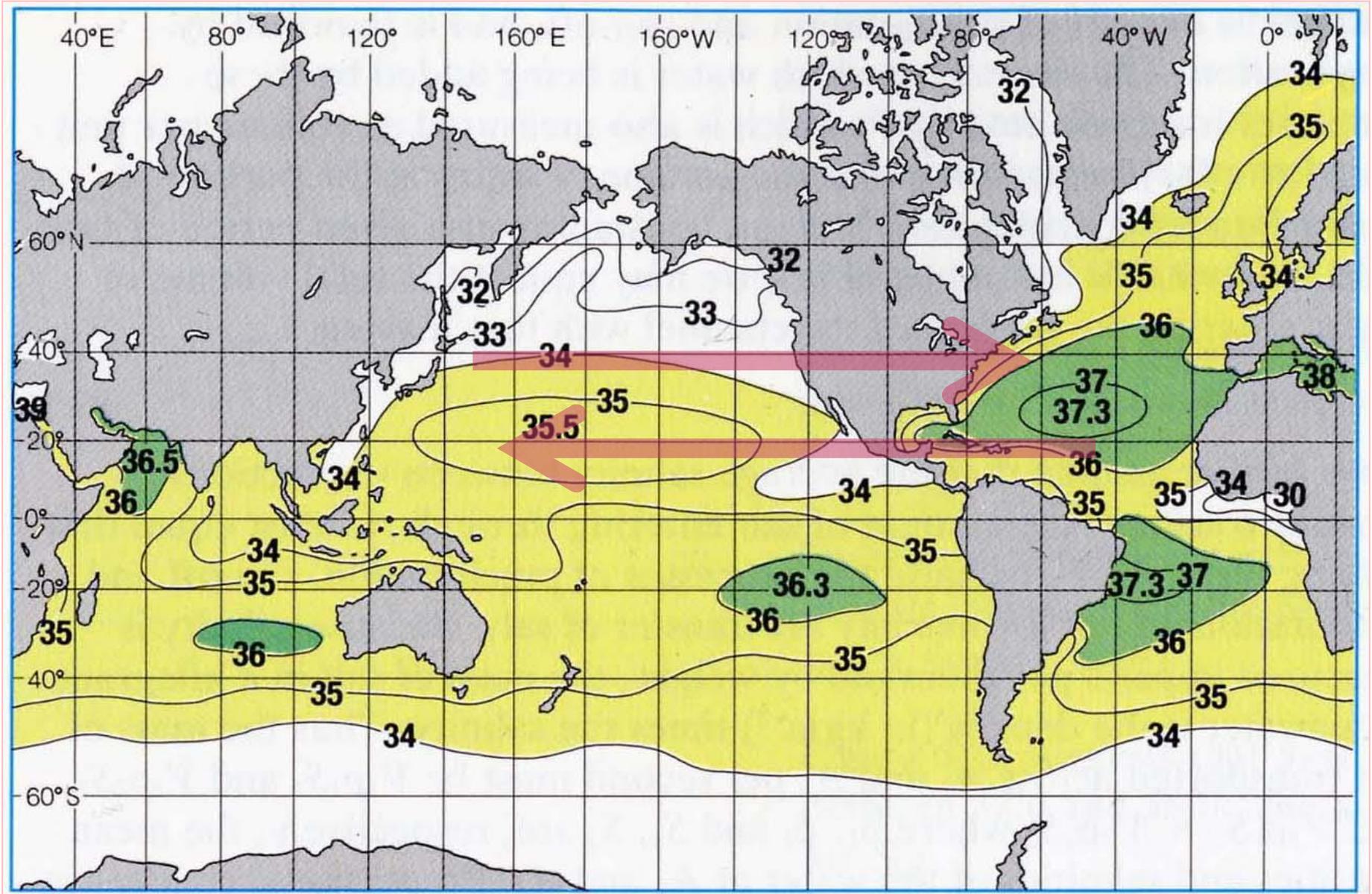


海洋深層循環(熱塩循環)－密度差による循環

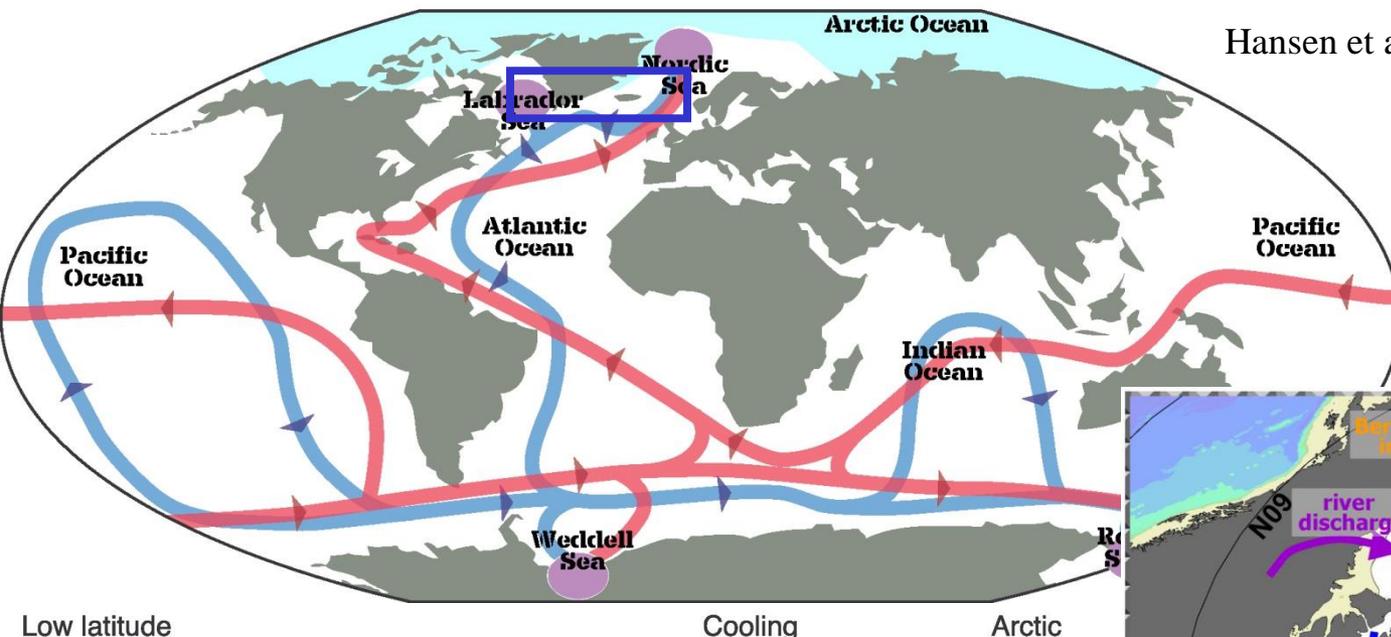


重い水の沈み込み { 北大西洋深層水
南極底層水

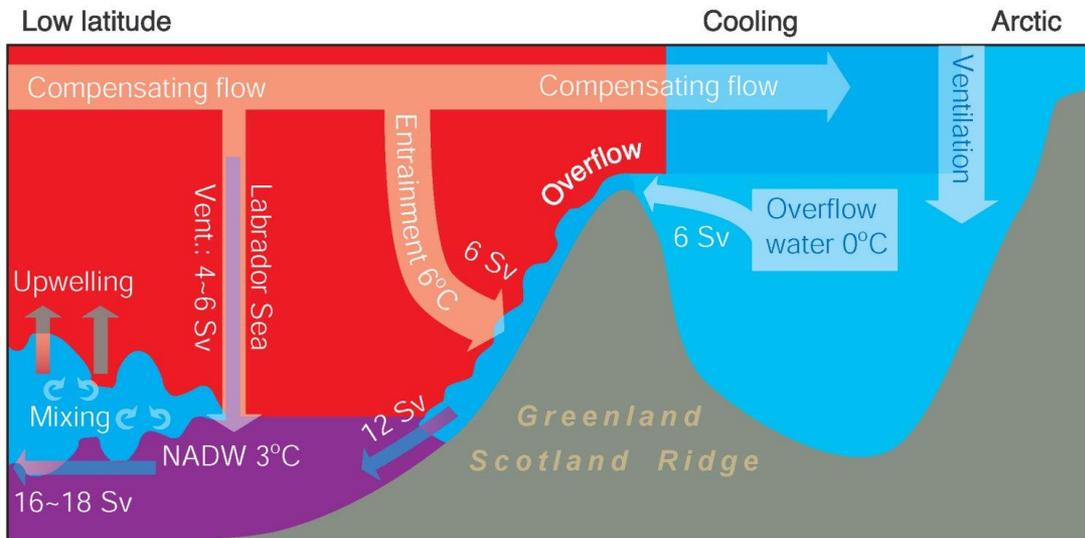
表層塩分(‰)



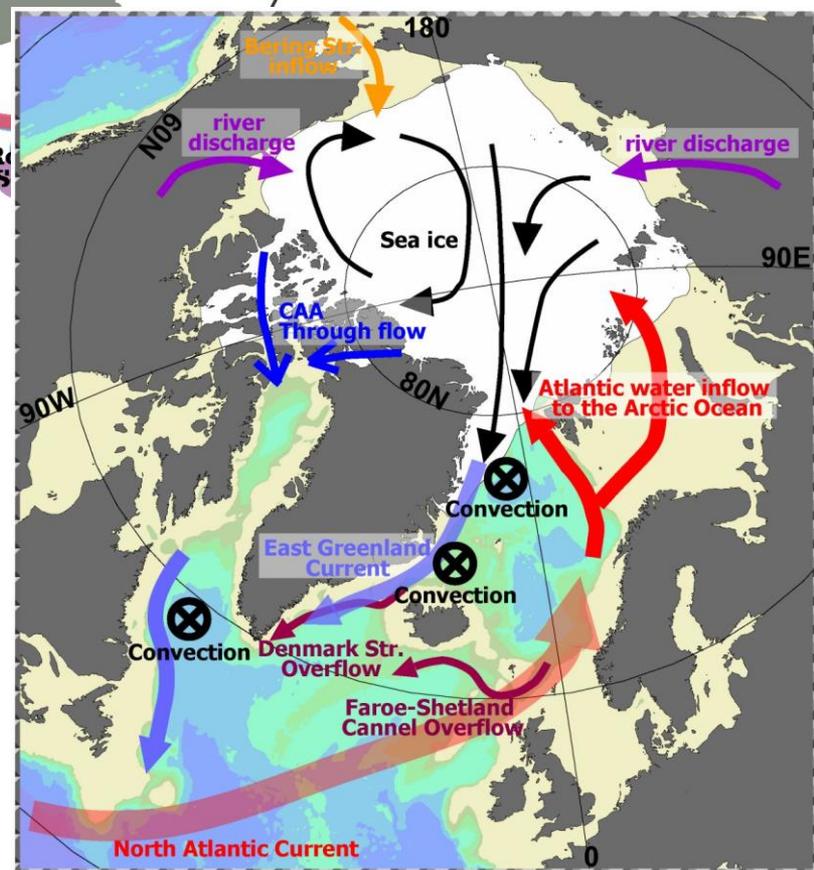
北大西洋深層水(North Atlantic Deep Water)



Hansen et al. (2004, Science)に加筆



Hansen et al. (2004, Science)



Dye et al. (2007, CLIVAR Exchanges)より

深層水 ⇒ 重たい水
(高密度)

海水密度 = f (水温、塩分、圧力)

||
0

重たい水 (深層水) を作るには?

「 低温 ・ 高塩分水 」を作る

↑

大気冷却

(極域ほど大)

↑

蒸発 (中・低緯度域で活発)

海水形成 (極域)

世界の海洋深層水の起源

- ・ 北大西洋深層水 (グリーンランド海周辺)
- ・ 南極底層水 (南極大陸周辺)

海洋子午面循環：熱塩循環（百-千年スケール）

深層水・中層水形成

海水生成（塩分排出）
蒸発-降水

北大西洋深層

高塩分水が
移流し冷却

海水生成

IW
蒸発大

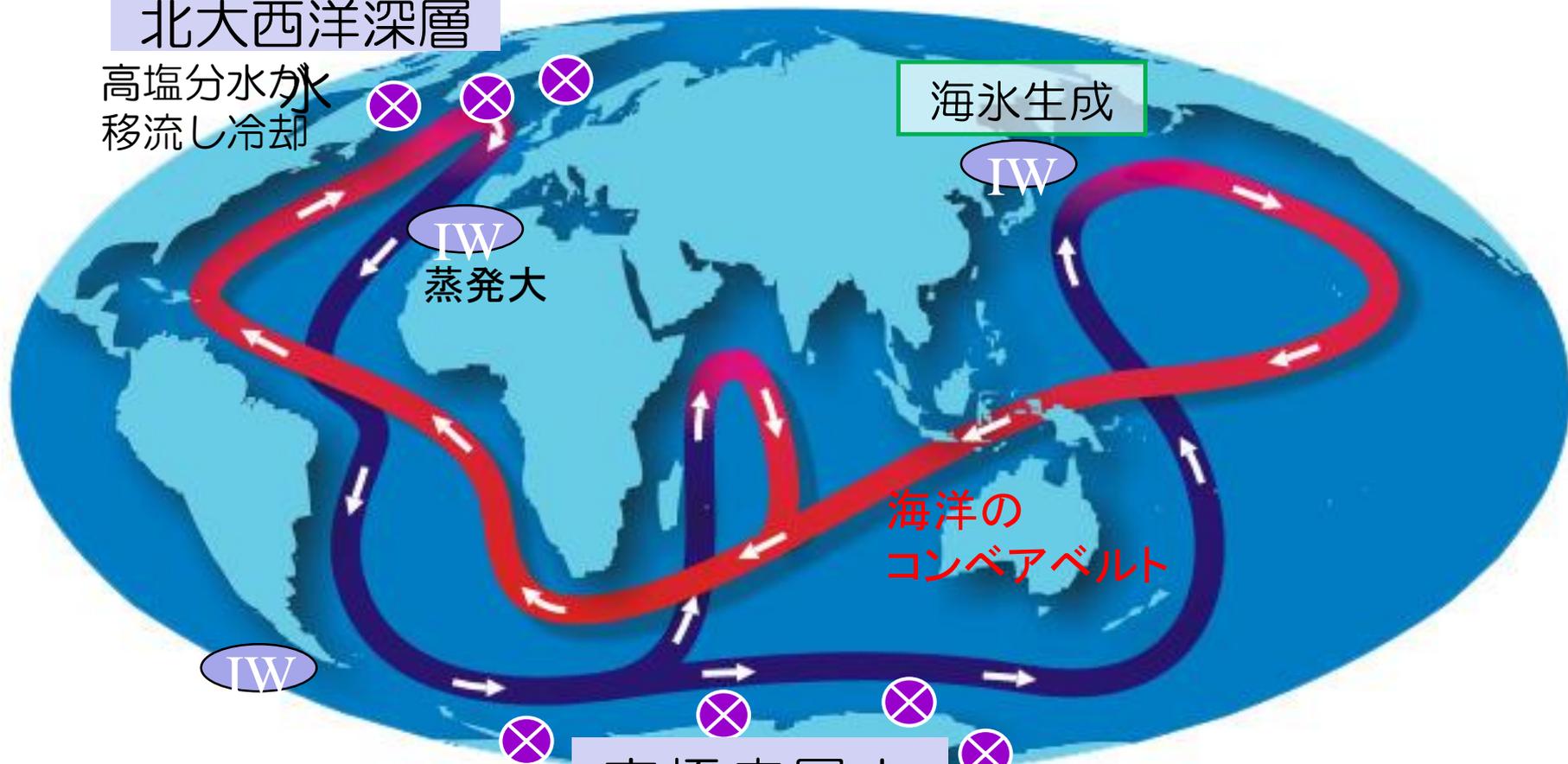
海洋の
コンベアベルト

IW

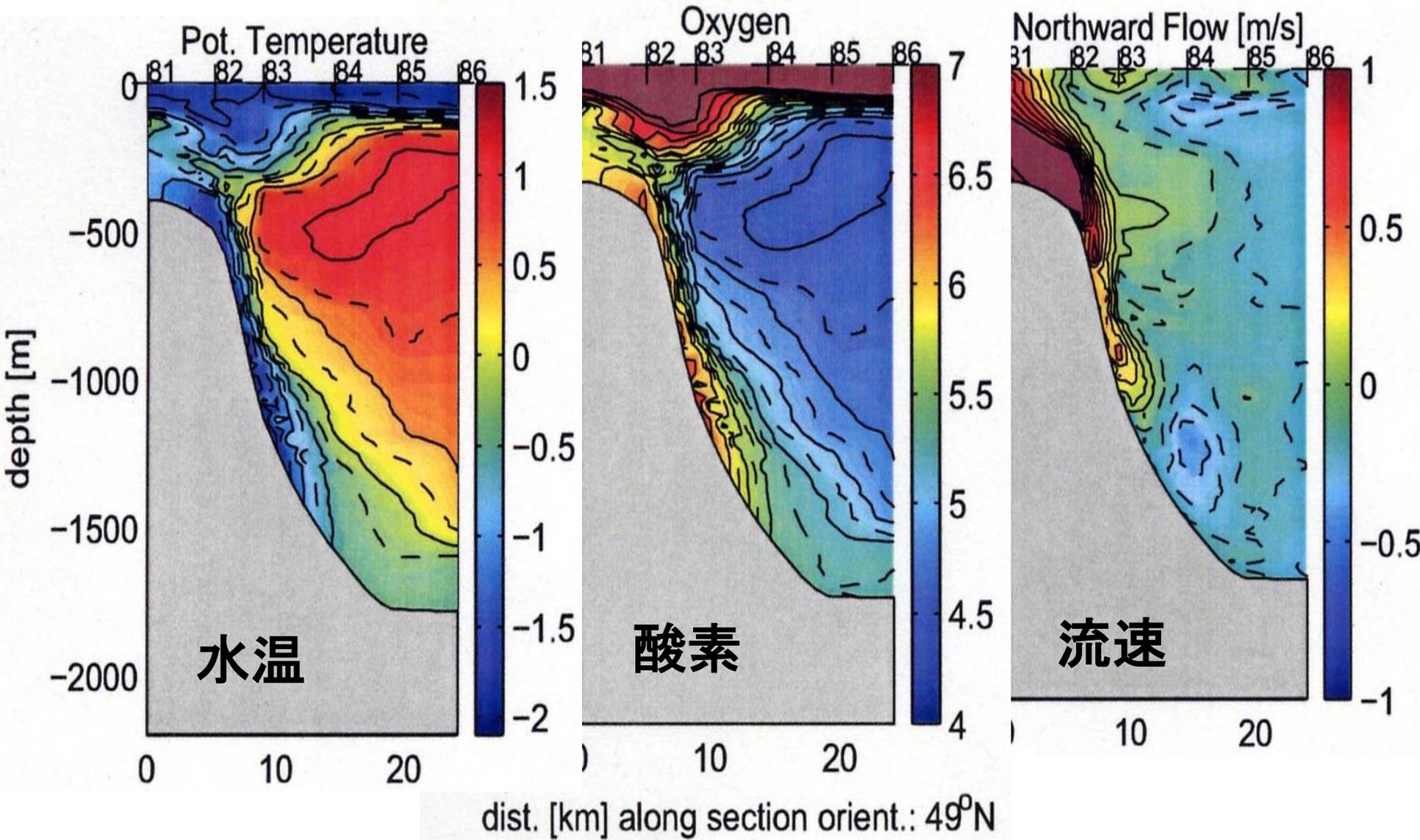
南極底層水

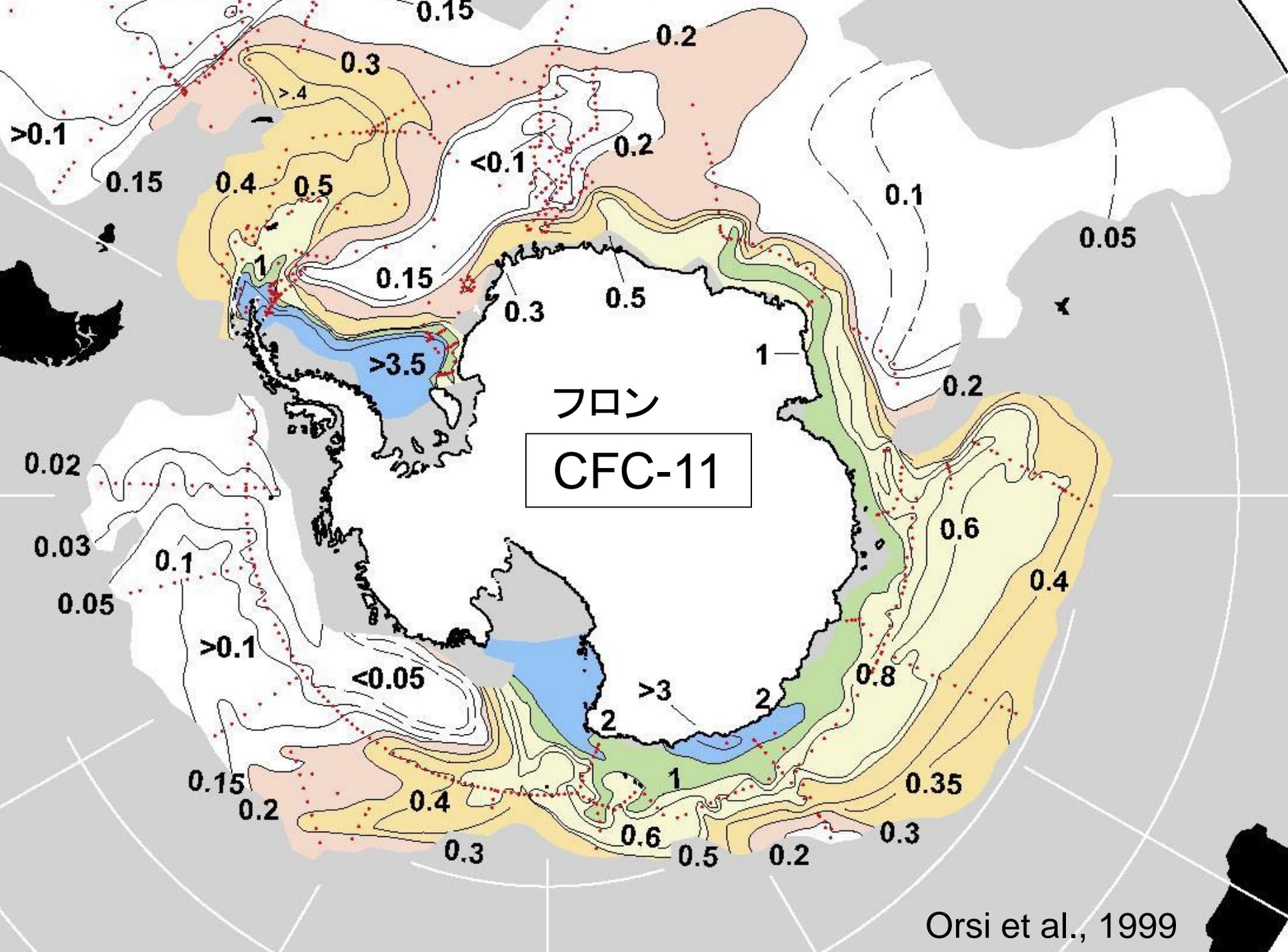
海水生成 → 塩分排出

Modified from NOAA
and NASA website



ロス海ポリニヤ 南極底層水の生成域

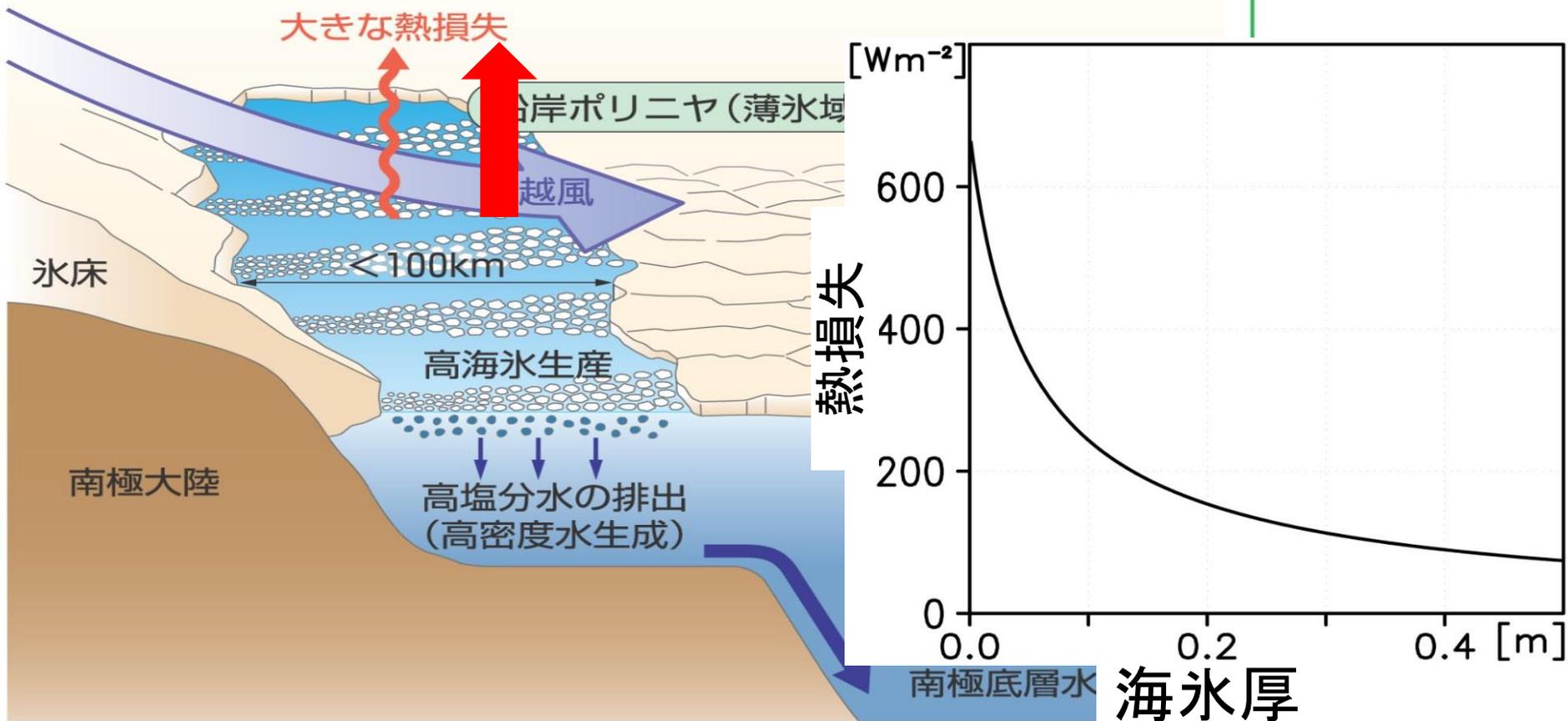




フロン

CFC-11

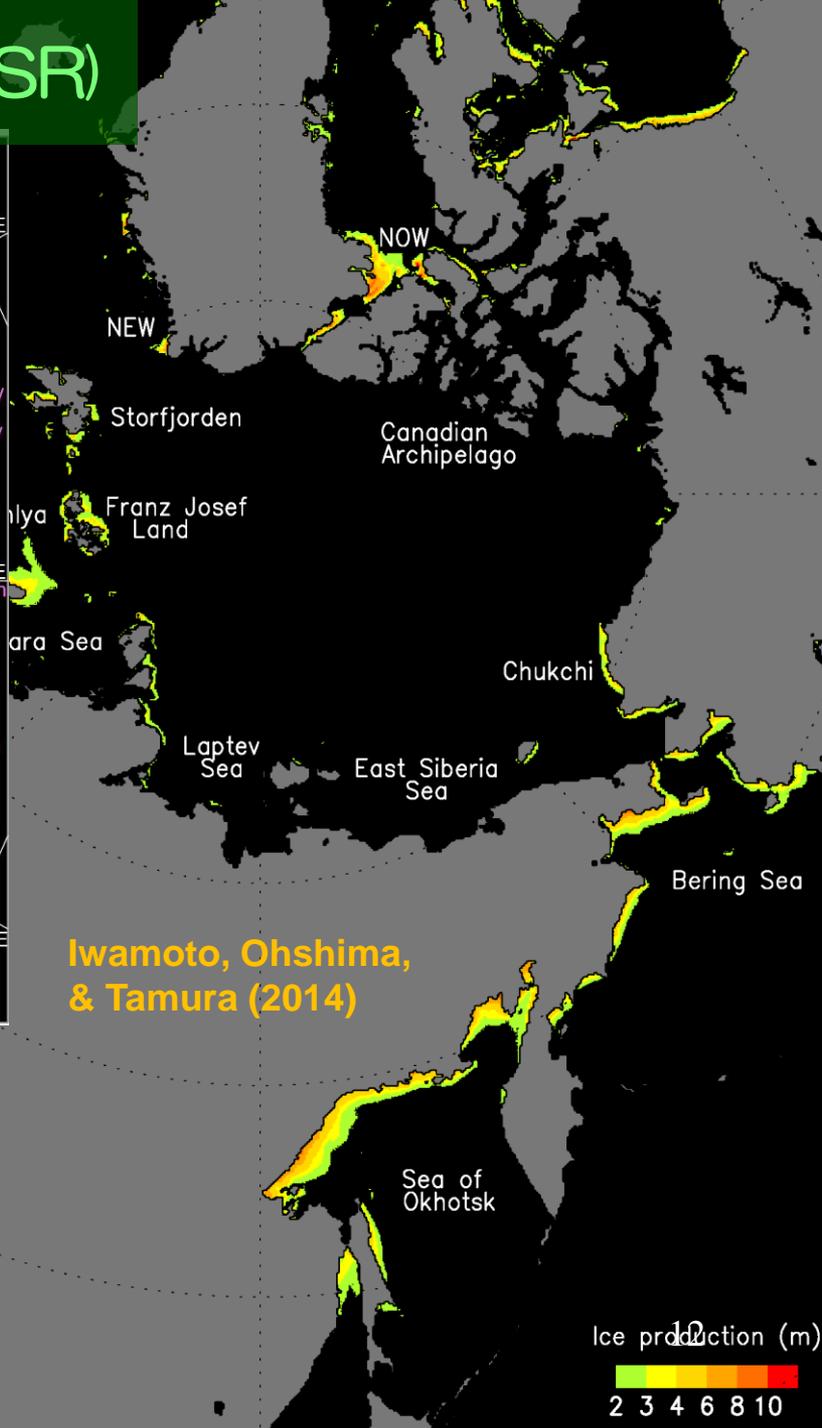
沿岸ポリニヤ → 海氷生産工場



海氷がたくさんできるほど、塩分が排出され、重い水ができる

衛星マイクロ波放射計による薄氷厚アルゴリズム
→ 表面の熱収支計算による熱損失 = 海氷生産量

海水生産量のグローバルマッピング (by AMSR)



↓

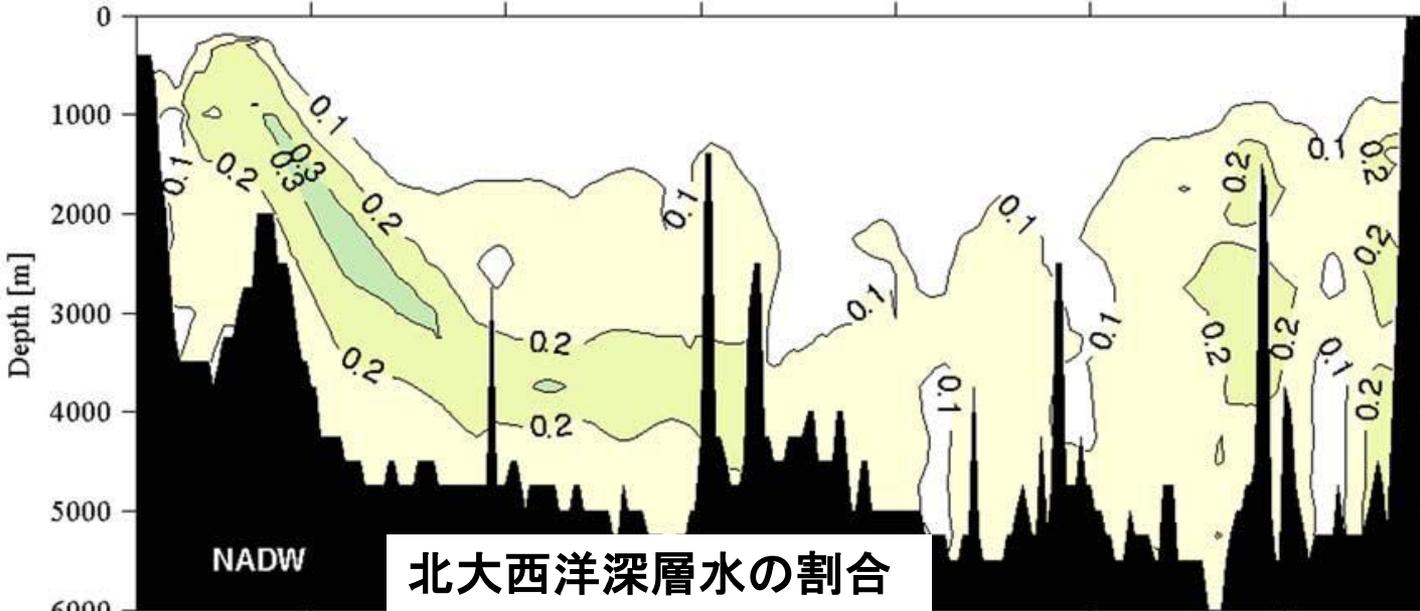
**南極海
海水の動き発散(外向)
ポリニヤ活動大
高海水生産**

Johnson(2008)

海水の性質から
2つの深層水の
割合を同定

ポテンシャル水温
塩分
渦位
溶存酸素
硝酸
リン
シリカ

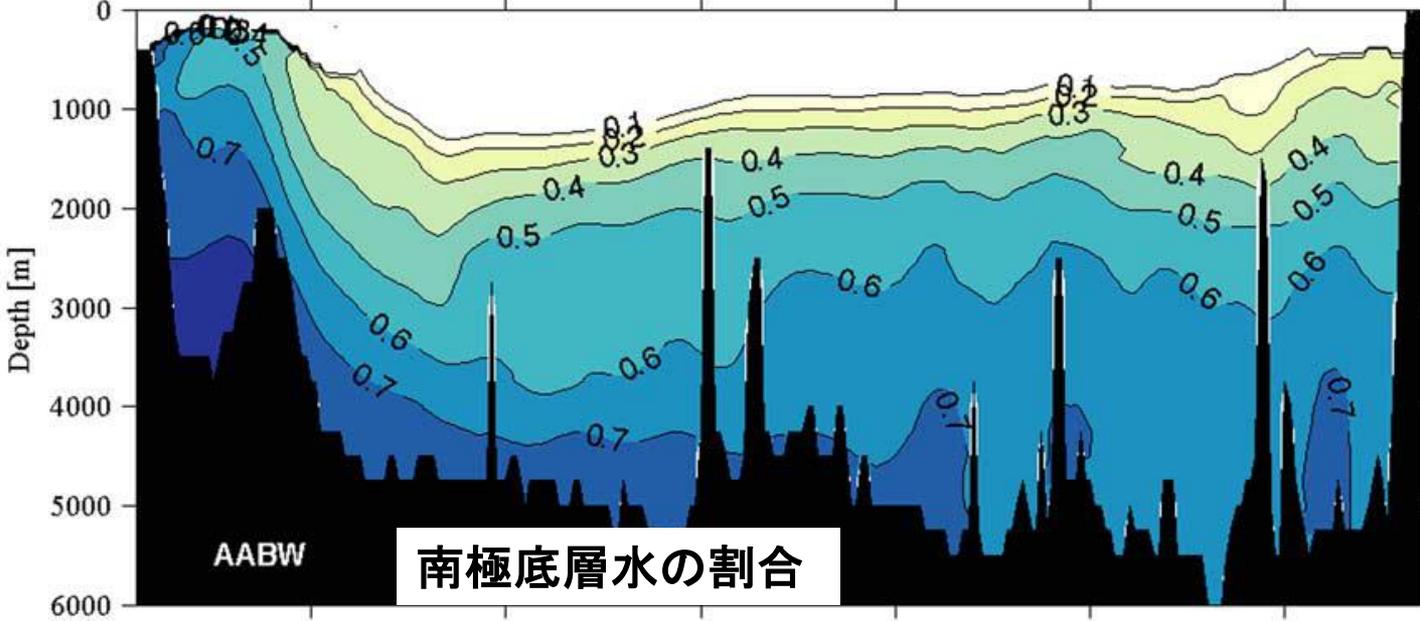
南極底層水は
全海水の30-40%
を占める



北大西洋深層水の割合

NADW

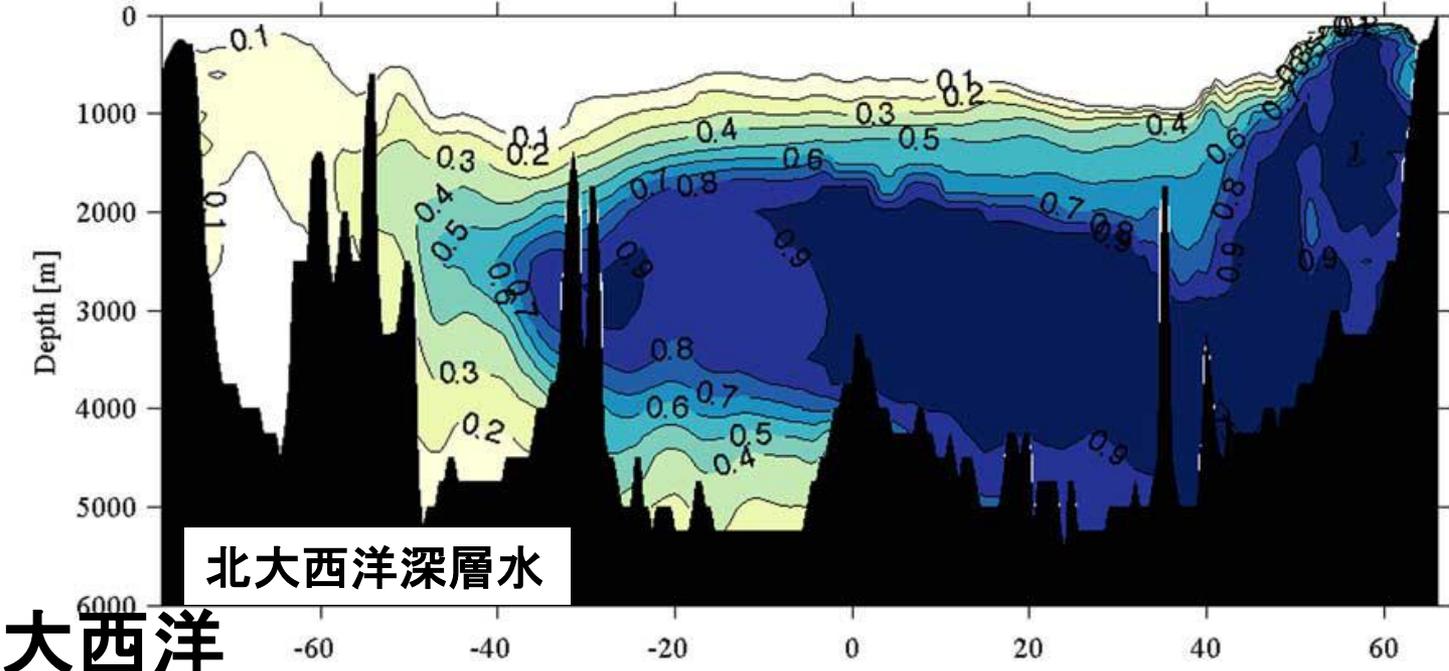
太平洋



南極底層水の割合

AABW

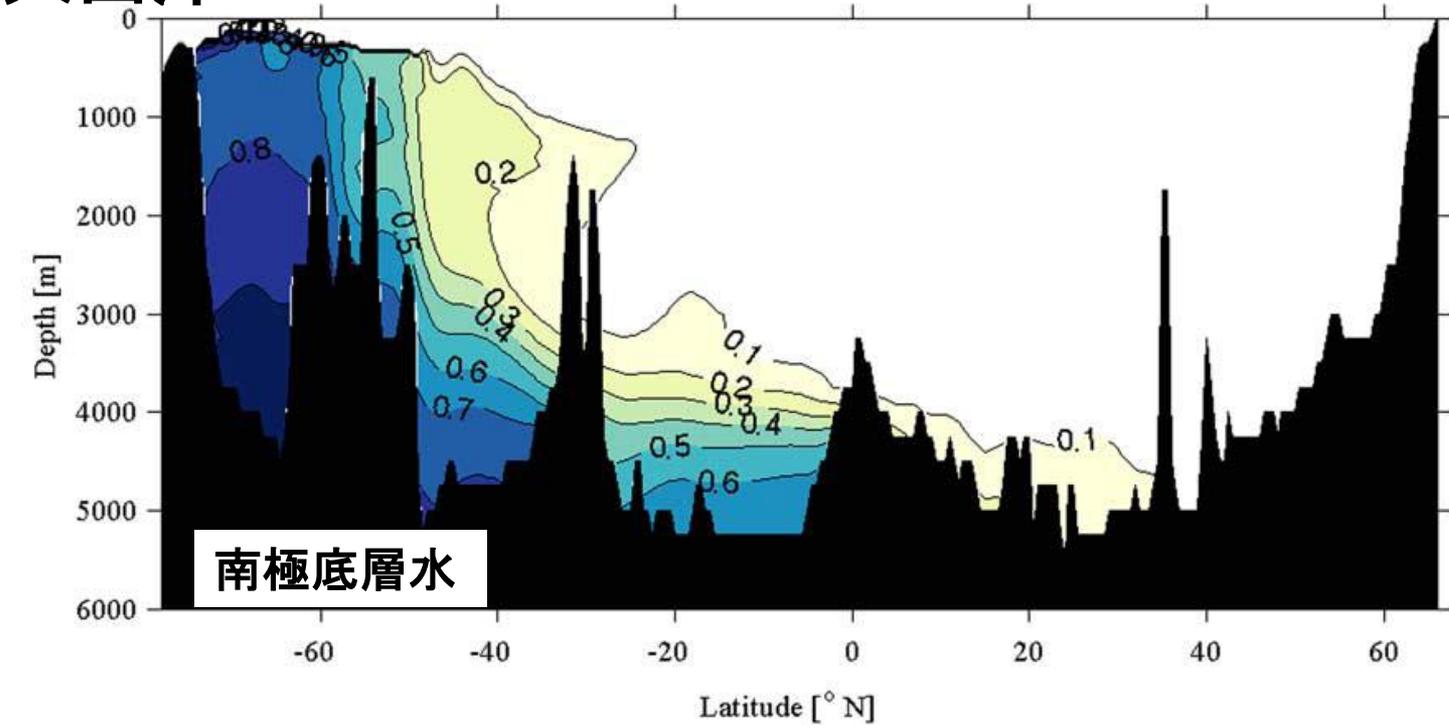
Latitude [° N]



Johnson (2008)

海水の性質から
2つの深層水の
割合を同定

大西洋



- ポテンシャル水温
- 塩分
- 渦位
- 溶存酸素
- 硝酸
- リン
- シリカ

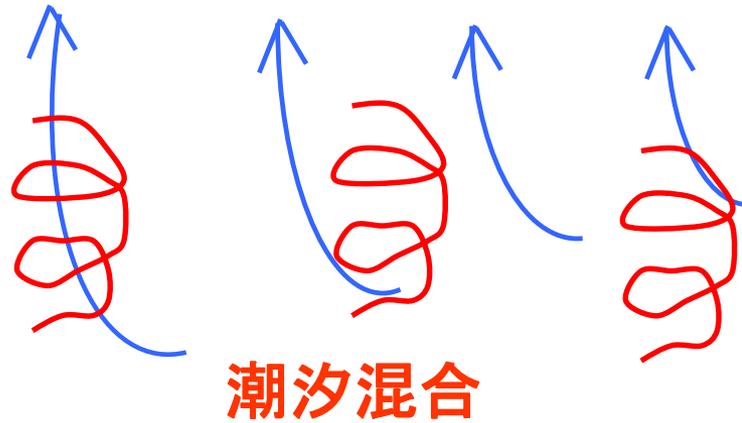
海洋の地球規模鉛直循環

赤道

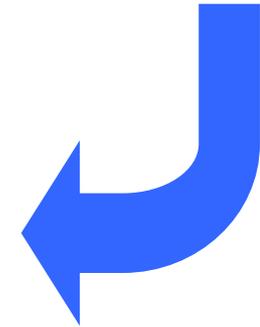
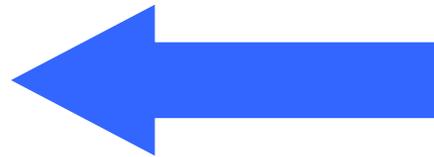
極



海洋の場合

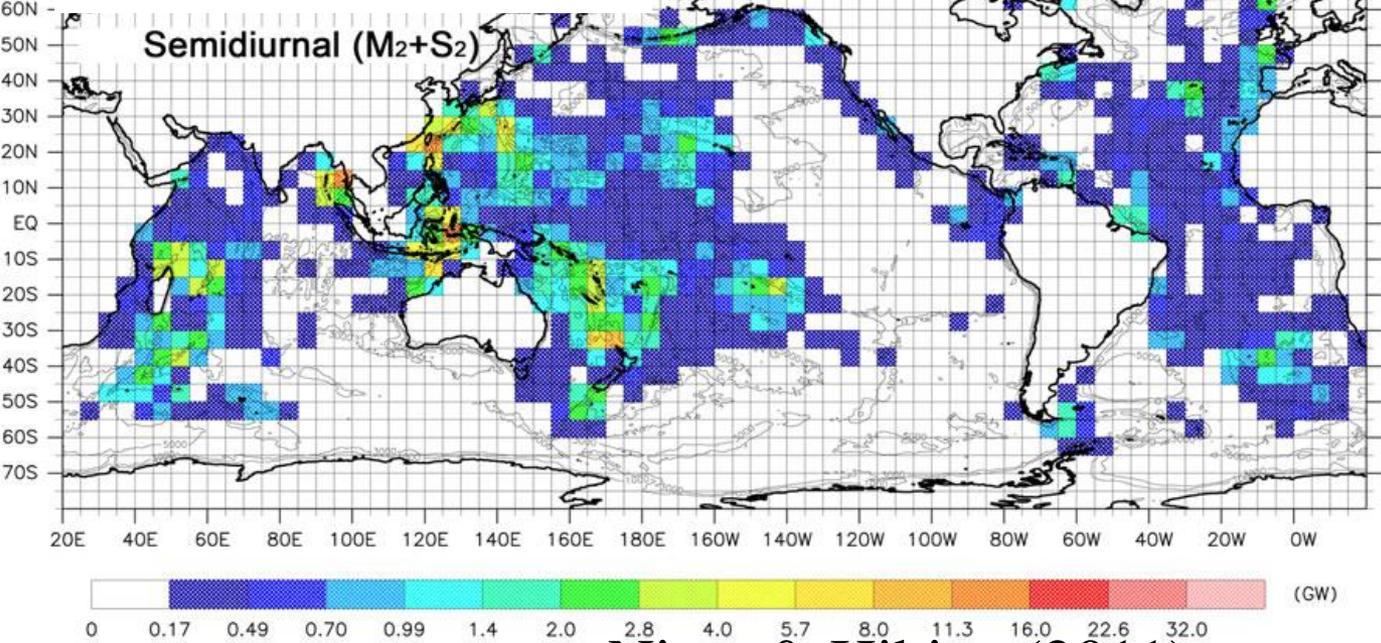


高密度水の沈み込み



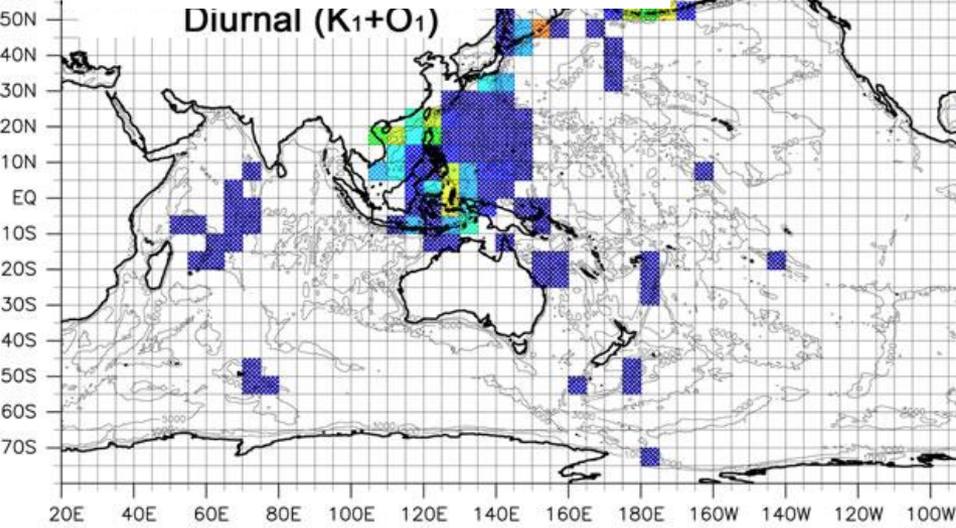
鉛直拡散により下方が暖まる(軽くなる)
→ 浮力を得る → 上昇
鉛直拡散係数が循環の速さを決める

(a) 傾圧潮流による散逸



Niwa & Hibiya (2011)

(b) 順圧潮流による散逸



Munk & Wunsch (1998); Abyssal recipes : energetics of tidal and wind mixing.
熱塩循環に必要な混合エネルギー
2100 GW

Webb DJ, Sugimoto N (2001)
600 GW

海水の性質

- 密度(density) : 最も重要な量
- 水温(現場水温 T とポテンシャル水温 θ) : 大気のととの熱のやりとり
- 塩分 ‰ (昔) \rightarrow psu (practical salinity unit) : 蒸発-降水
- 圧力 1dbar = 10^4 Pa
- +酸素: 海水の年齢(大気から絶ってからの時間)の情報: 後述

密度が重要な理由

1. 海洋の深層まで及ぶ循環(深層循環)は密度差で駆動(熱塩循環)
重い水が沈み込んで、それが徐々に湧き上がってくる循環

(Thermohaline circulation): 密度は水温(熱)と塩分で決まるので熱塩循環という

2. 海洋内部の大規模な流れは等密度面(Isopycnal)に沿う

(具体例は後で)

3. 密度場から海流場を推定できる: 地衡流(Geostrophic current)の関係

(詳細は3回目の授業)

水温: °C

- 断熱的に異なる深さに水を移動させると
断熱膨張 (深→浅)、断熱圧縮 (浅→深) によって水温が低下 (上昇) する
例 : 塩分 35psu, 5°Cの表面水 → 4000m 5.45°C
塩分 35psu, 5°Cの4000m水 → 表面 4.56°C
- ポテンシャル温度 (温位) θ = 断熱的に表層 (基準面) まで移動した時の温度

塩分: 単位なし or Practical Salinity Unit (PSU)

- 塩分 = 溶存物質の全含有量 (g / 1kgの水) : ‰; 1960年代まで
- 実用塩分 PSS-78: 電気伝導度比で決める: 単位なし or PSU
- TEOS-10: 電気伝導度比ではずれる分を補正した、より絶対塩分に近いもの (2010年～)
- 表面塩分は、蒸発と降水の差で決まる。 + 移流・河川・海氷
- 塩分は passive tracer として水塊の流れの方向を見るのに使える。

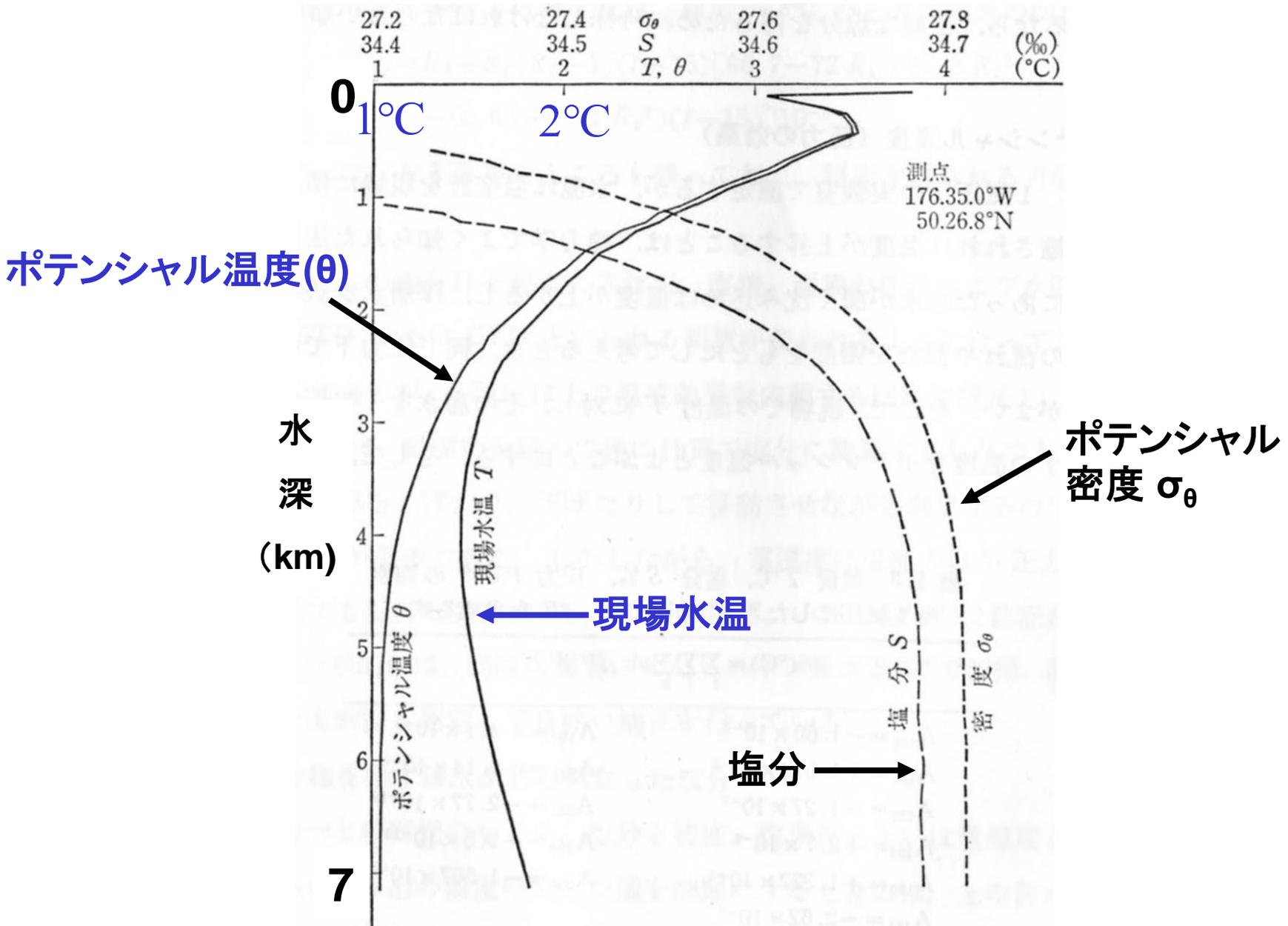
密度： (kg /m³) ただし、1000を引く

- 表面:1021 (kg/m³) → 10000m深:1070 (kg/m³)
変化が小さいので1000を引いて表現する
- 現場密度 $\sigma_{s,t,p}$ = density - 10000 (kg/m³)
(塩分s, 現場水温t, 圧力p)

同じ水温・塩分の水でも圧力のかけ方で密度が変わる

$$\sigma_{35,0,0} = 28.13, \quad \sigma_{35,0,4000m} = 48.49,$$

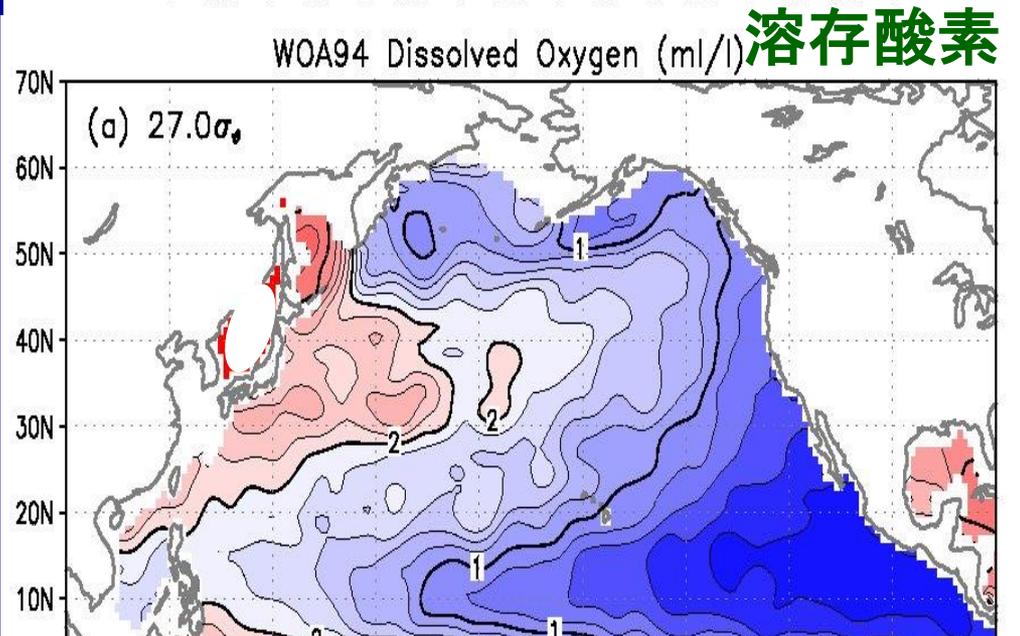
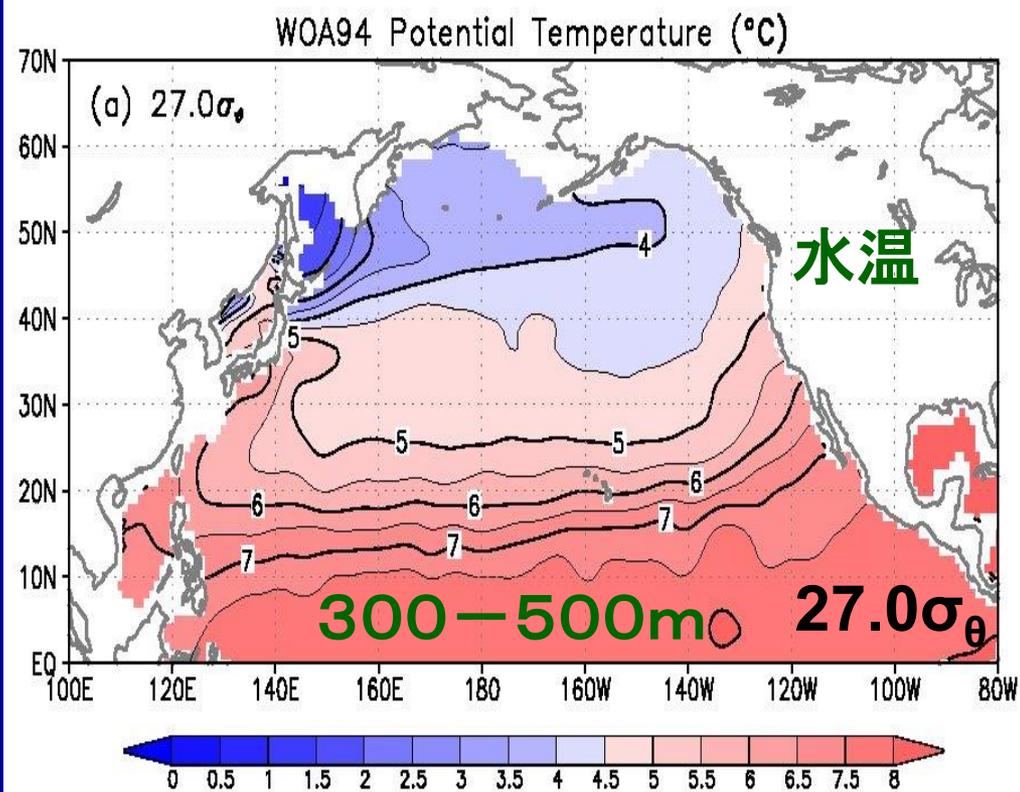
- ポテンシャル密度(温位) σ_{θ} : 保存量なのでよく使う
各深度にある水を断熱的に基準面まで移動した時の密度 -1000(kg/m³)
表面を基準面とした $\sigma_{\theta} = \sigma_{s, t=\theta, p=0}$ を使うことが多い
- 水温の比較的高いところでは、密度を決めるのは水温で塩分ではない。
一方低温域では、密度は塩分で決まる部分が多い。



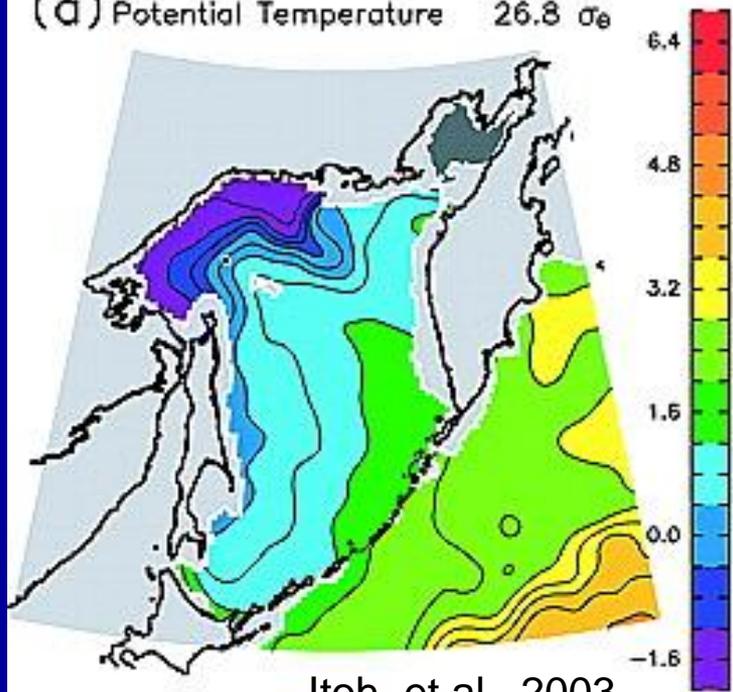
北部北太平洋でのポテンシャル水温と現場水温

海水は同じ密度面(等密度面)に沿って流動する。
等密度面上での水温・酸素などの分布を見ると、海水の起源や流動の様子がわかる

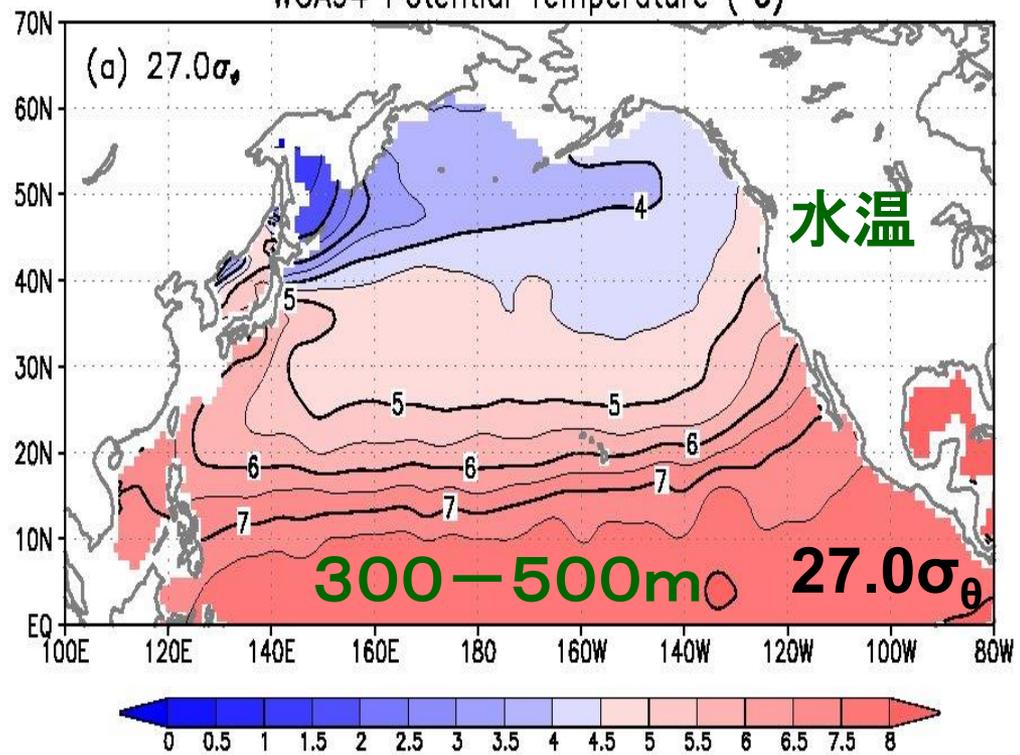
溶存酸素: 酸素は表面から大気より取り込まれるが、海洋内部では生物生産により消費され、徐々に減少する。大気から絶ってからの時間(海水の年齢という)が長いほど、溶存酸素量は小さくなる。



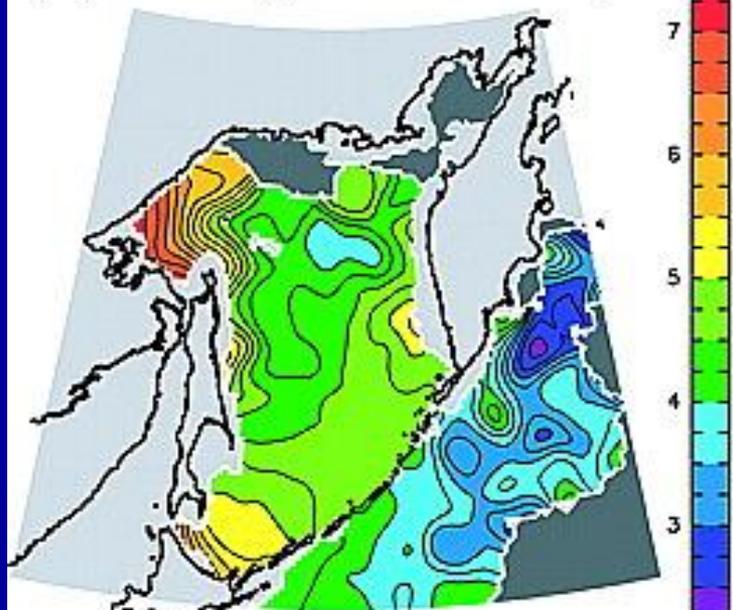
(a) Potential Temperature $26.8 \sigma_\theta$



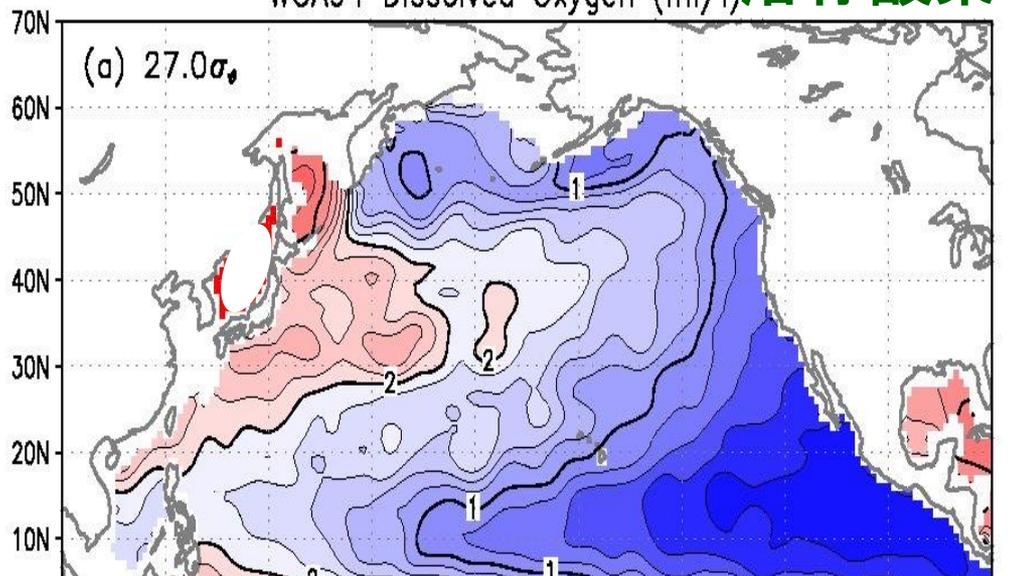
WOA94 Potential Temperature ($^{\circ}\text{C}$)



(c) Oxygen $26.8 \sigma_\theta$



WOA94 Dissolved Oxygen (ml/l) 溶存酸素

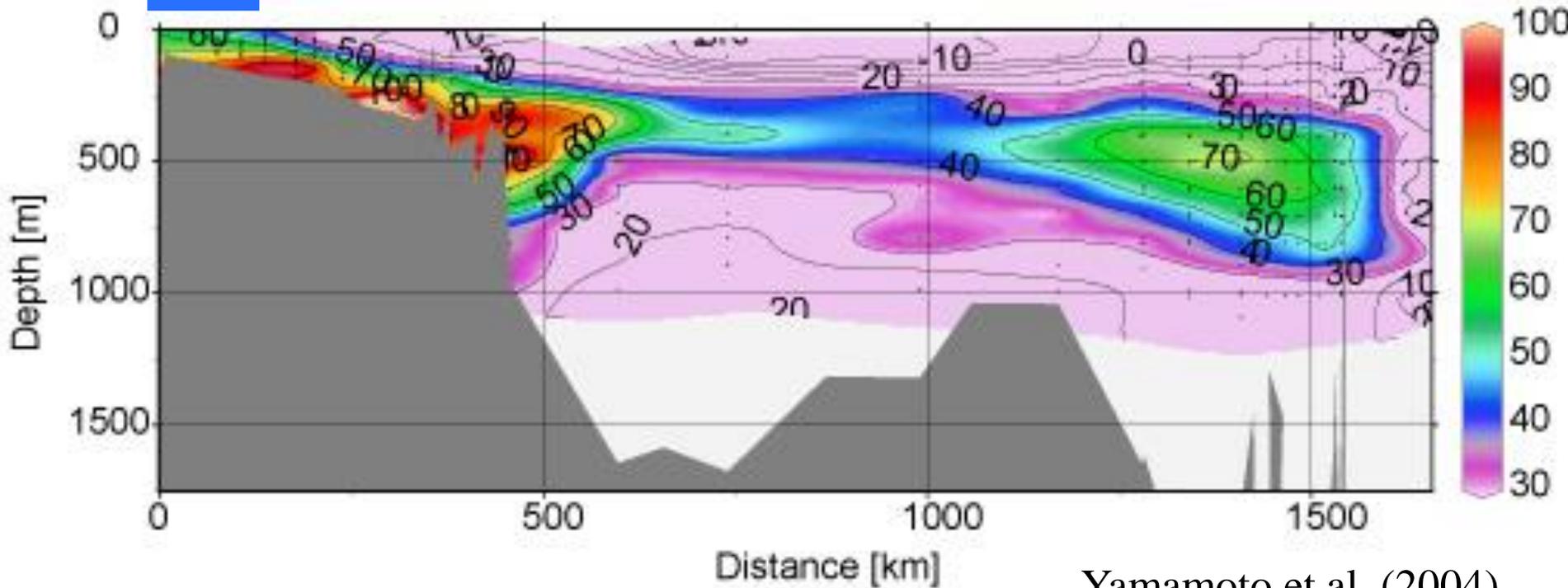


フロン(CFC)の断面図：近年に大気と接した水は高い値

オホーツク海 高密度陸棚水の形成→中層水へ

北太平洋

高海氷生産

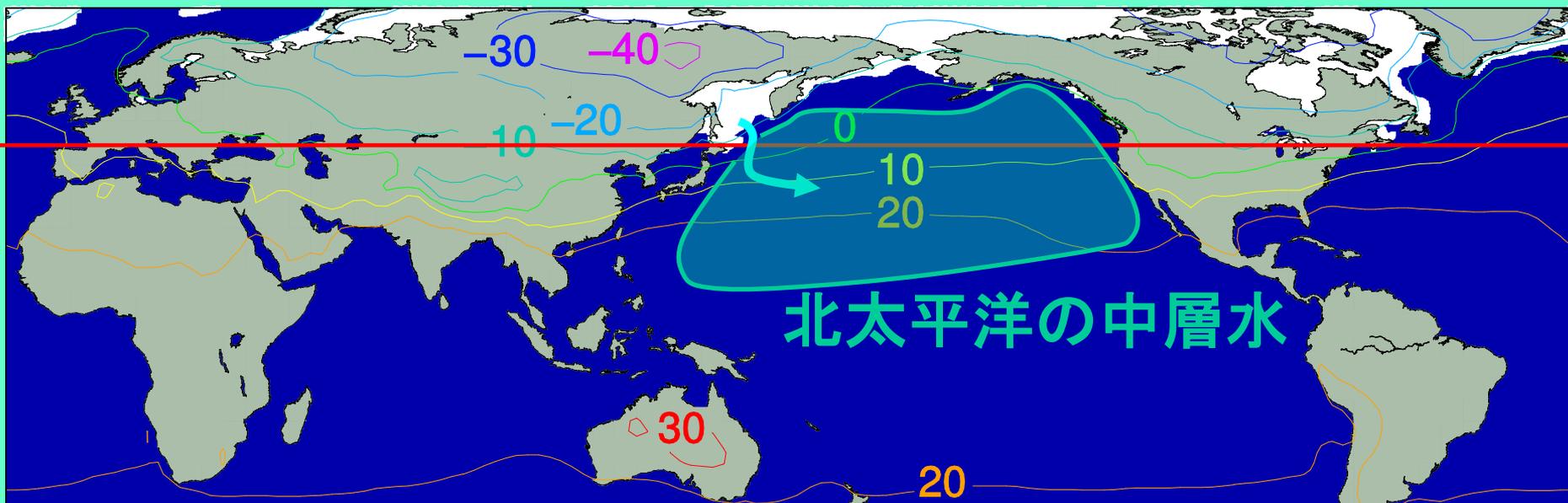


Yamamoto et al. (2004)

オホーツク海は北太平洋の心臓である！

グローバルな目でみたオホーツク海

2月の海氷分布と平均気温(2001年)

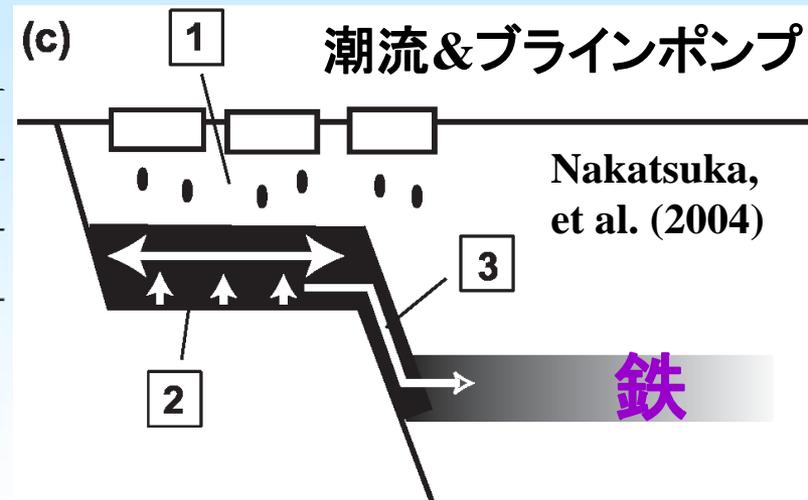
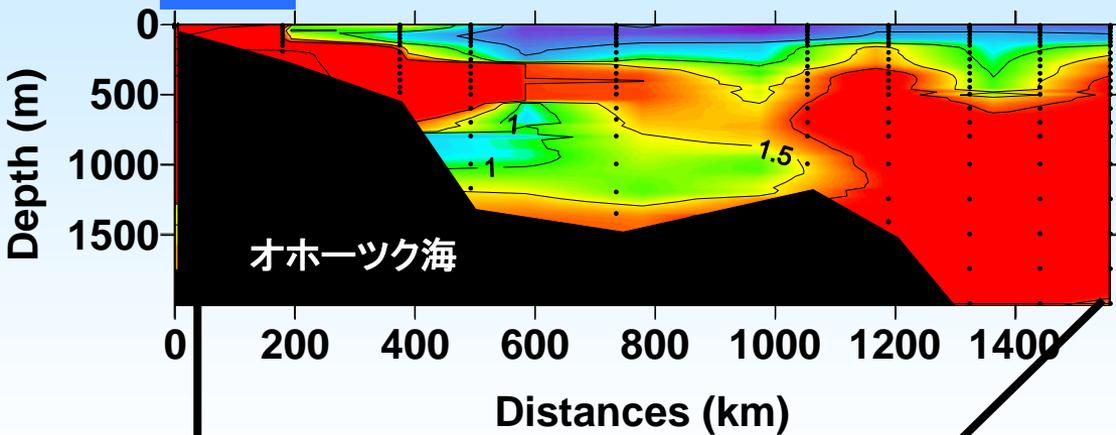


Nihashi et al., 2009

- ・風上が北半球の寒極 → 北半球における海氷域の南限
- ・多量の海氷生産 → 北太平洋で一番重い水ができる場所
→ 大気・陸からの熱・物質を北太平洋中層水(200-800m)へ

オホーツク海からの鉄の輸送

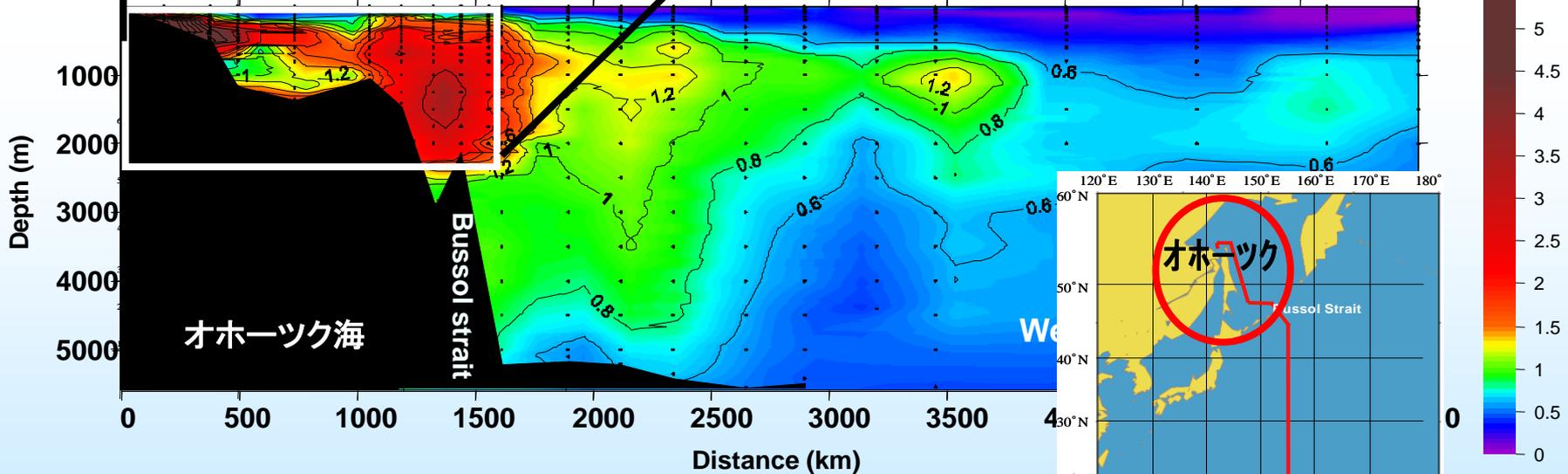
高海氷生産



オホーツク - 東経155線での鉄の断面図

Dissolved Fe

44 42 40 37.5 35 32.5 30 25 20 15 11.5



Nishioka et al., 2013

巨大魚付林： アムールオホーツクシステム

アムール川

鉄 海水生成による重い水生成



オホーツク海

北太平洋

中層への潜り込み

鉄

鉄

生物生産に不可欠
西部北太平洋の高い
生物生産を支えている

Nishioka et al.(2007)

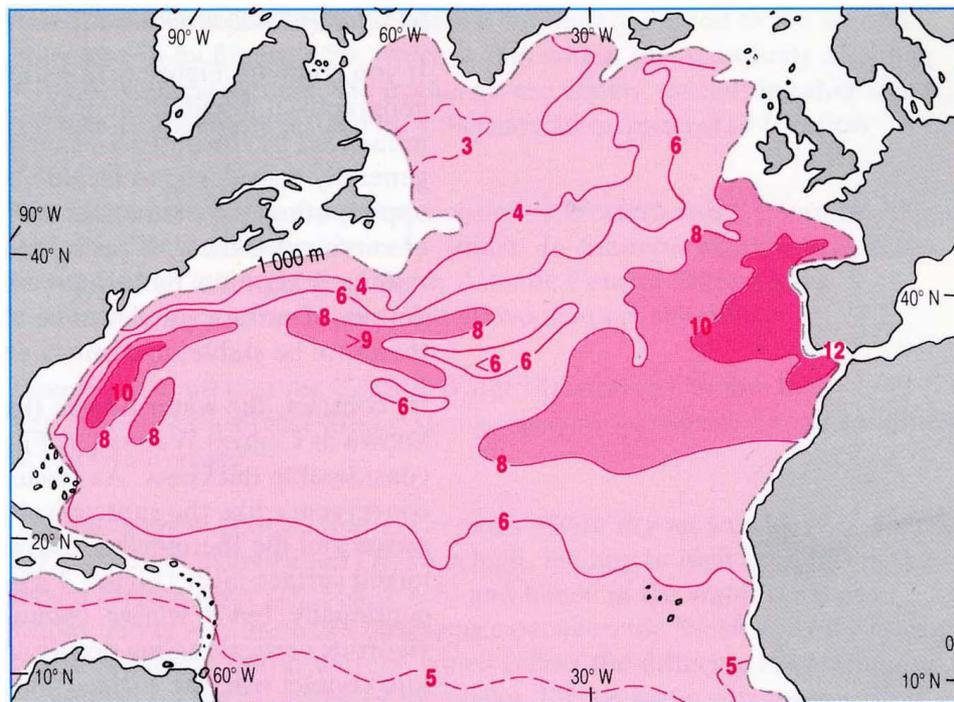
中層鉄仮説

Nakanowatari et al.(2007)

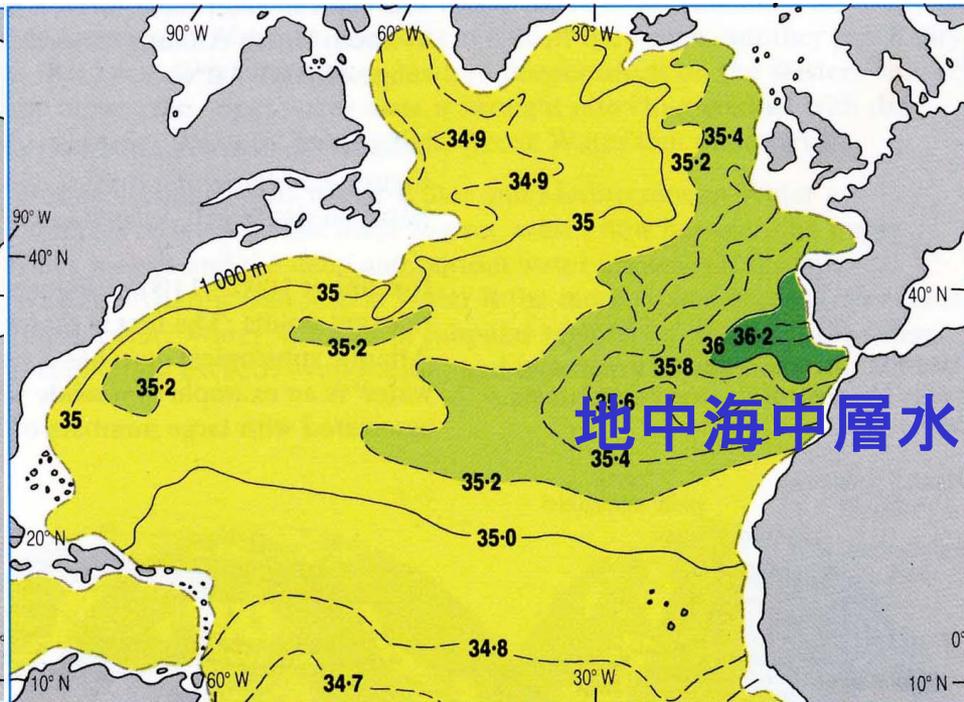
JST提供

大西洋

水温(1000m)



塩分(1000m)



地中海中層水

(a)

(b)

海洋の大循環

- 熱塩(深層)循環: 深層まで及ぶ
数cm/s程度の弱い流れ: ~1000年の時間スケール
密度差で駆動 ← 熱塩のやり取り
長期の気候変動を決める最大要因の一つ
- 風成循環: 表層~1000m位
0.5-1.5 m/sの強い流れ
風応力)で駆動 ← 運動量のやり取り
黒潮・ガルフストリーム等の海流

全海洋における主要な水塊の温度・塩分分布

山中康裕教授作成



北太平洋

南大西洋

TSダイヤグラム

