

流体地球科学 第3回

東京大学 大気海洋研究所 准教授
藤尾伸三

<http://ovd.aori.u-tokyo.ac.jp/fujio/2017chiba/>
fujio@aori.u-tokyo.ac.jp

2017/10/20

最終更新日 2017/10/23

前回のポイント

- 海水の密度 ρ (実用塩分と絶対塩分で用いる計算式が異なる) 浮力
 - 水圧, 塩分...線形的に増加
 - 温度...高温ほど, より減少 (体積が増加) 海面上昇
- 海水の結氷温度は 0°C より低い...塩分 35g kg^{-1} で約 -2°C
海水は結氷温度で密度が最大になる (凍りにくい)
- ポテンシャル温度 (温位) θ , ポテンシャル密度 ρ_{θ}
基準圧力に断熱的に移動させた場合の温度や密度 (大気は 1000hPa , $T < \theta$)
海洋は水圧 0 (海面) が基準 圧力が下がるので, 水は膨張し, 温度低下. $T > \theta$
- CTD...温度・塩分・圧力を計測する.
- 深さ方向に, 水温の勾配で層に分ける (層の深度は季節や場所で異なる)
 - 混合層, 季節水温躍層, (永久) 水温躍層: 海面にあった水
 - 深層 (水温があまり変化しない. $1000 \sim 2000\text{m}$ より下): 極域の水
- 比熱: 海水 $4000\text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ($4 \times 10^6\text{ J m}^{-3}\text{K}^{-1}$), 空気 1000 (1.2×10^3)
大気圧は 10m の水圧と同じ (同じ質量) 大気は 2.5m の水の比熱と同じ
- 地表が受け取る熱 (熱フラックス W m^{-2})
 - 太陽放射 (短波放射, 日射): 太陽から直接, 到達する熱
 - 正味の長波放射: 大気の放射熱と地表の放射熱の差 (失う熱)
 - 顕熱: 大気との熱伝導で失う熱 潜熱: 蒸発によって失う熱

安定成層・不安定成層

- 安定成層: ポテンシャル密度が下ほど大きい
- 不安定成層: 対流が生じる

- 同じ密度の水が占める海
 - 塩分が同じとすれば, 温度は下ほど高い ... (圧力の寄与を相殺)
 - 温度が同じとすれば, 塩分は下ほど低い
 - 水が上に動く 周囲よりも軽いので, さらに上昇
不安定なので, 存在しない
- 同じ温度・塩分の水が占める海
 - 圧力は下ほど大きいので, 密度は下ほど顕著に大きい
 - ポテンシャル温度は下ほど低く, ポテンシャル密度は下ほどやや大きい
 - 水が上に動く 膨張して温度が下がる 周囲の水よりも重い 下に戻る
- 同じ水 (ポテンシャル温度・塩分が同じ) が占める海
 - 下の水は圧縮されて温度はやや高い
 - ポテンシャル密度が同じ (中立成層)

温度とポテンシャル温度の違いは, 1000m より浅ければ気になくてよい

海面の水温と熱フラックス

海面水温

(World Ocean Atlas 2009)

赤道が高く, 極域が低い
特に, 赤道太平洋の西側が高温

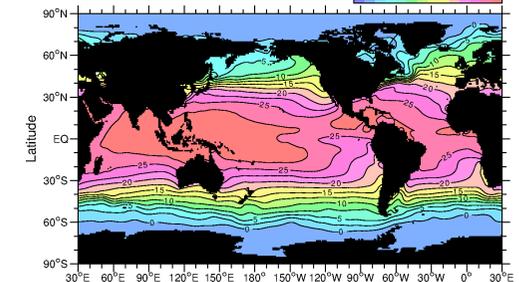
熱フラックス (推定誤差は大きい)
(NCEP reanalysis-2, 1991-2010 年)

加熱 { 南極周極流
赤道太平洋の東側
海の東端
冷却...海の西端

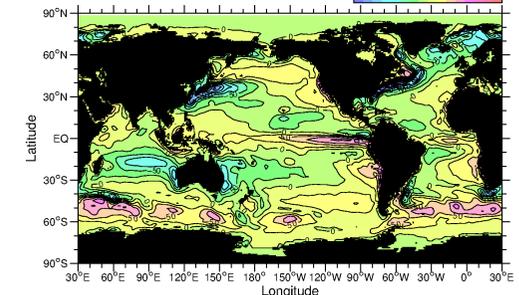
{ 日本の東 黒潮
アメリカ東海岸 湾流

加熱場所に入った熱は海流で冷却
場所に運ばれる (熱輸送)

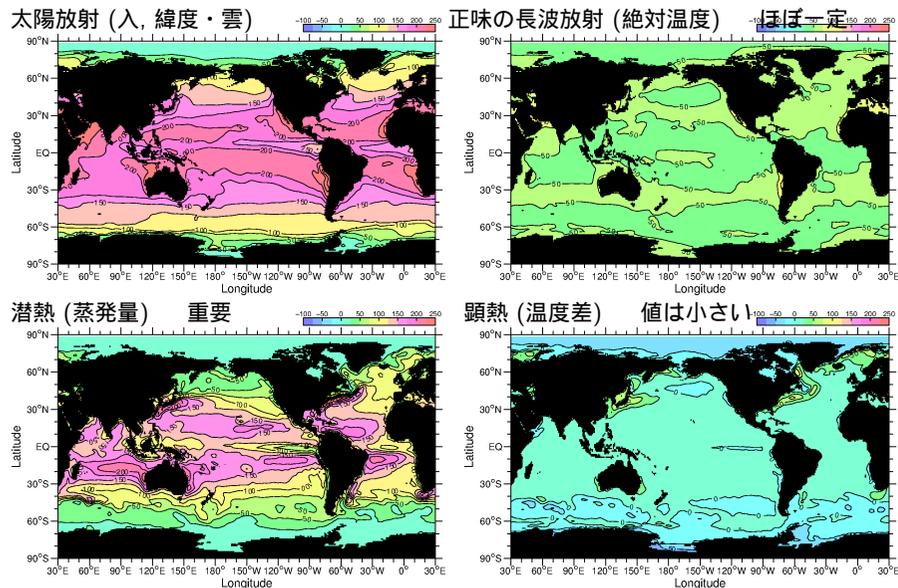
年平均の海面水温



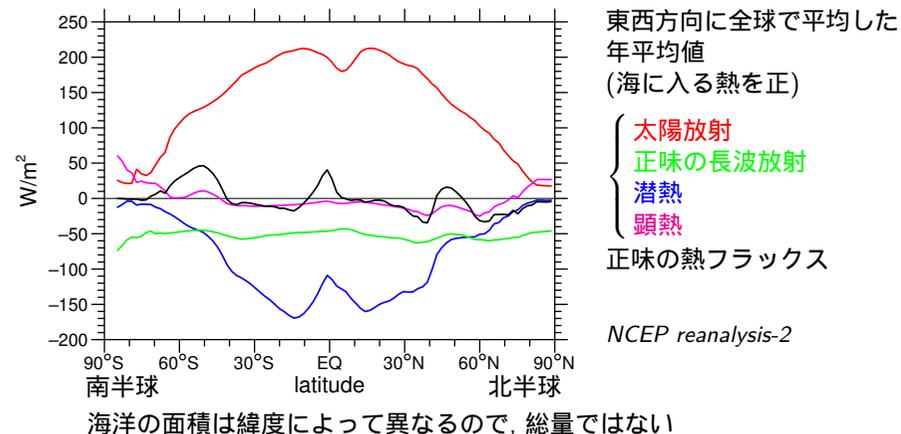
年平均の熱フラックス



年平均の熱フラックス



海面熱フラックスの緯度分布



- 全体の分布は、太陽放射と潜熱の分布で決まっている (長波放射は一定値、顕熱は小さい)
- 低緯度で海洋が受けとった熱は、主に海流によって高緯度に運ばれ、放出される...南北熱輸送 気候に対する寄与 (例: 温暖なヨーロッパ)

南北熱輸送

大気 (乾燥空気, 水蒸気), 海洋

Bryden-a2.png

Bryden and Imawaki (2001)

Fig2.png

Trenberth (2002)

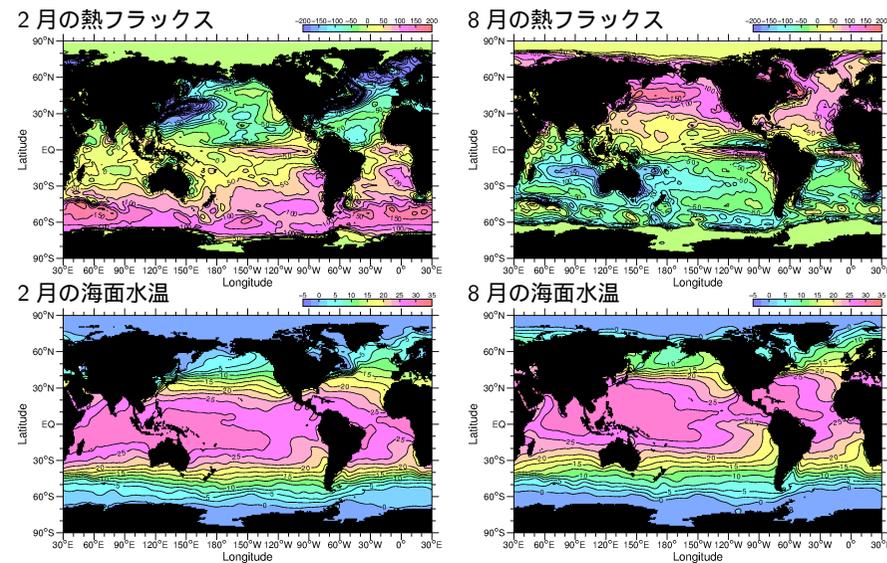
熱輸送 (単位 $1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$)

- 普通は、熱は低緯度から高緯度へ運ばれる 太陽放射をならす
- 南大西洋は例外的 冷たい深層水が極向き (南向き)

trenberth-3a.png

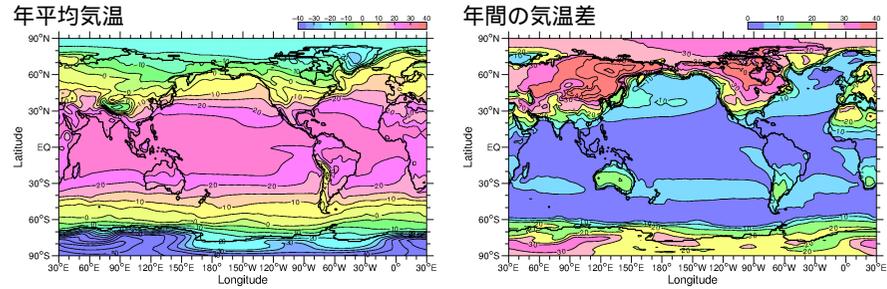
Trenberth and Cane (2001)

海面熱フラックスと水温の季節変化



熱フラックス...主に太陽放射の変化 (夏: 加熱, 冬: 冷却)
海面水温...フラックスほどは変化しない 熱容量が大きい

気温の年較差



海面の高さに補正した気温 (気温は高いほど低い) NCEP2 reanalysis-2

- 大陸上と比べると、海洋上の気温の季節変化は小さい
 - 偏西風帯 大陸の西側は東側に比べて、やや差が小さい
 - 海が多くを占める南半球は、大陸上も北半球より小さい
- 大陸と海洋の温度差 季節風

地球上の水

oki2007a.png

沖 (2007)

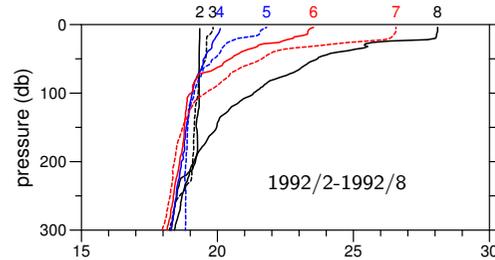
大部分は海水。残りは雪氷、地下水
 { 水は、循環する
 溶存物質は、海洋にとどまる

海洋	96.5%	大気	0.001%
地下水	1.7%	湖・河川	0.01%
氷河・積雪	1.7%		

季節躍層と混合層

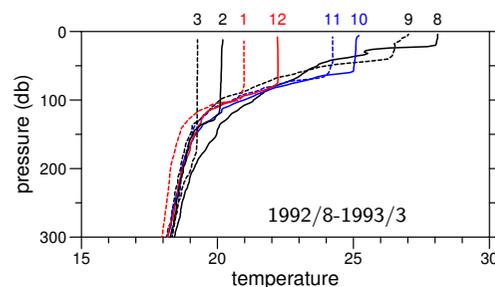
冬から夏: 季節躍層が発達

- 海面が暖められる
海水の密度は減少
軽くなる
- 安定な成層
熱は拡散 (伝導) により、少しずつ下に伝わる



夏から冬: 混合層が発達

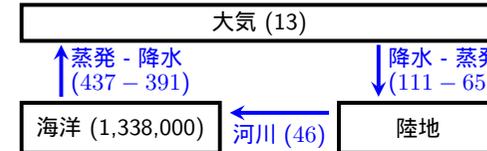
- 海面が冷やされる
海水の密度は増加
下の水より重くなる
- 不安定な成層
対流により、上下に水が混ざる
水温・塩分などが同じになる
密度が同じになる深さまで。



混合層の下には、季節躍層が残る
 季節躍層の下には、最寒時の混合層

バミューダ沖の観測例

水循環と塩分の変化



循環量: $10^3 \text{ km}^3 / \text{年}$
 貯留量: 10^3 km^3

- 地表全体の降水量 $(391+111) \times 10^3 \text{ km}^3 / \text{年} = 16 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (海洋が 12)
黒潮や湾流が運ぶ水は $50 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
- 平均の蒸発量, 降水量 (= 循環量 ÷ 表面積)
 海洋: $3.6 \times 10^8 \text{ km}^2$ 1.21 m/年, 1.09 m/年
 陸地: $1.5 \times 10^8 \text{ km}^2$ 0.43 m/年, 0.74 m/年 (東京 1.47m/年)
- 平均滞留時間 (貯留量 ÷ フラックス) ... どれぐらいで入れ替わるかの目安
 大気: $13 \div (391+111) = 0.026 \text{ 年} = 9.5 \text{ 日}$ 海洋: $1338000 \div 437 = 3060 \text{ 年}$

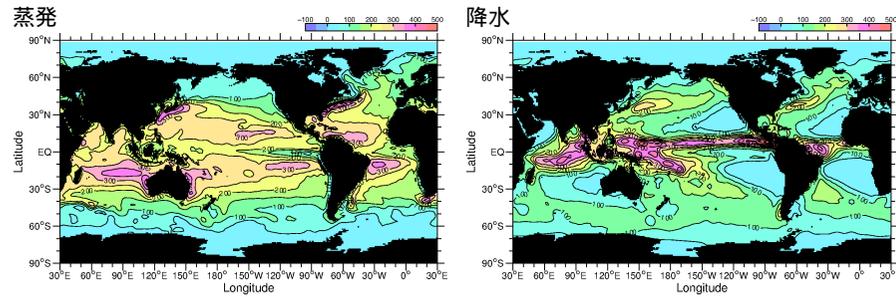
塩分の変化 (食塩水の濃度問題)

- 降水, 河川流入... 海水は薄められる 塩分は減少
- 蒸発 ... 海水は濃くなる 塩分は増加

1cmの雨が降って、1mまでの海水が混ざれば、1% 塩分が下がる
 (もとの塩分が 35 g kg^{-1} であれば、 34.65 g kg^{-1})

水フラックスの分布

年平均値の分布 ... NCEP reanalysis-2



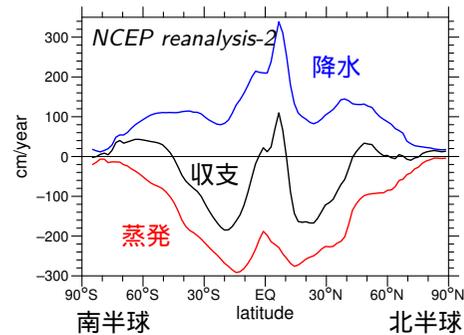
- 蒸発 (= 潜熱フラックス)
 - 低緯度ほど盛ん (水温・気温が高い). ただし, 赤道付近は小さい
 - 日本の東やアメリカ東岸 暖流 (暖かい水) + 偏西風 (大陸の乾燥した空気)
- 降水
 - 赤道付近で集中的降水

水フラックスの緯度分布

ハドレー循環によって, 海面上の湿った空気は赤道方向へ運ばれ, 上昇赤道付近に強い降水 (ITCZ: 熱帯収束帯)

収支は { 中緯度: 蒸発
低緯度・高緯度: やや降水

海全体: 蒸発 > 降水 河川で戻る

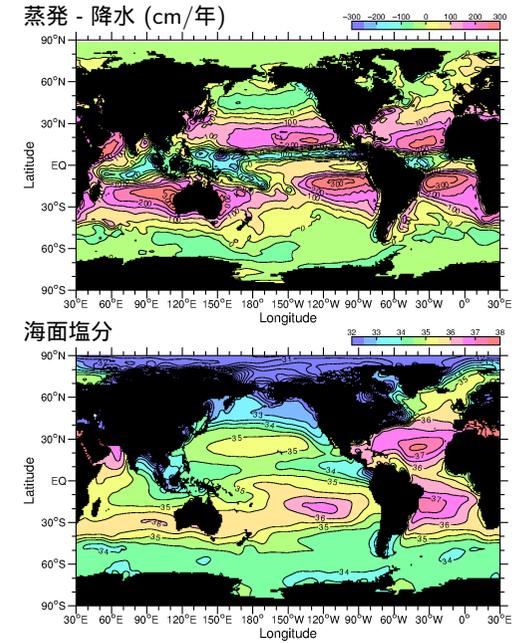


atmos-sect.png

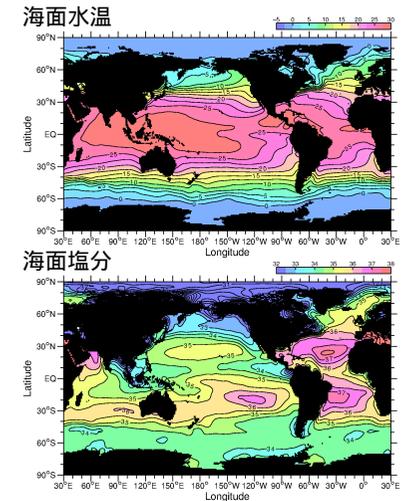
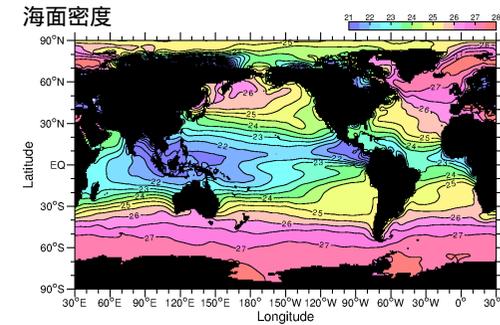
Open University

淡水フラックスと海面塩分

- 塩分 淡水フラックス
中緯度で高く, 低緯度・高緯度で低い
- 大西洋の塩分は他に比べて高い
- 地中海の塩分はきわめて高い
北極海の塩分はきわめて低い



海面密度

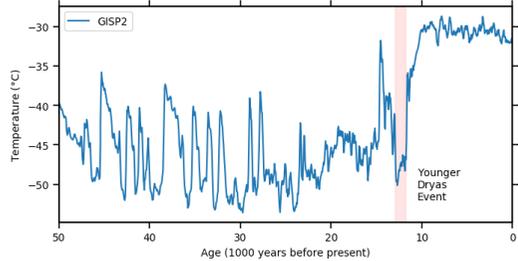


- 全体の分布は, 水温による (高温 = 低密度)
高緯度ほど, 密度は高い (水は重い)
- 北太平洋よりも北大西洋の密度が高い (塩分の影響)
沈降 (北大西洋 北太平洋の対流)
- 南極大陸周辺も, 高い 沈降

塩分と水温の違い

水温が高くなる 熱の放出が増える すぐにもとに戻る
 塩分が高くなる 降水が増えるわけではない なかなか回復しない

グリーンランドの気温 (5万年前から現在まで)



氷床コアから再現
 Alley (2005) のデータを作図

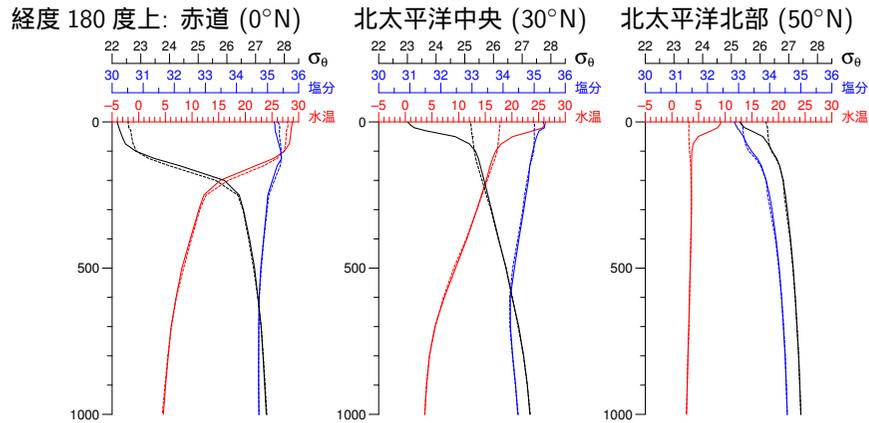
最終氷期末の再寒冷期
 (約1万3千年前)
 ヤンガードライアス期

ブロッカーの仮説

氷河の融解水が大量に北大西洋に流れ込む
 軽い水が海洋表面を覆う
 水が沈まなくなる
 海洋の流れが大変動 (コンベアベルト停止)
 気候が大変動 (北大西洋沿岸の寒冷化)

Broecker1987.png

緯度による鉛直分布の違い



縦軸は深度 (m). 実線: 8月, 破線: 2月. World Ocean Atlas 2009

基本的には密度は水温でほぼ決まる. ただし, 高緯度では塩分が重要になる

緯度が高くなるほど海面水温は低い
 海面と深層の水温差は小さい (下限は結氷温度)
 水温が低いと, 密度への寄与は小さい

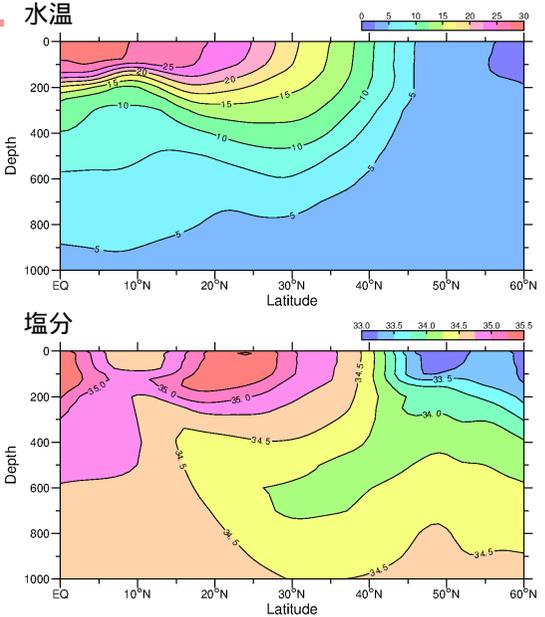
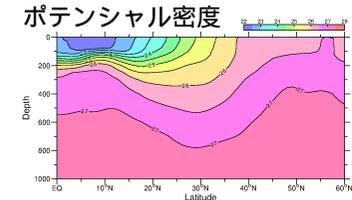
水温・塩分の南北断面図

北太平洋 (180°E), 2月気候値

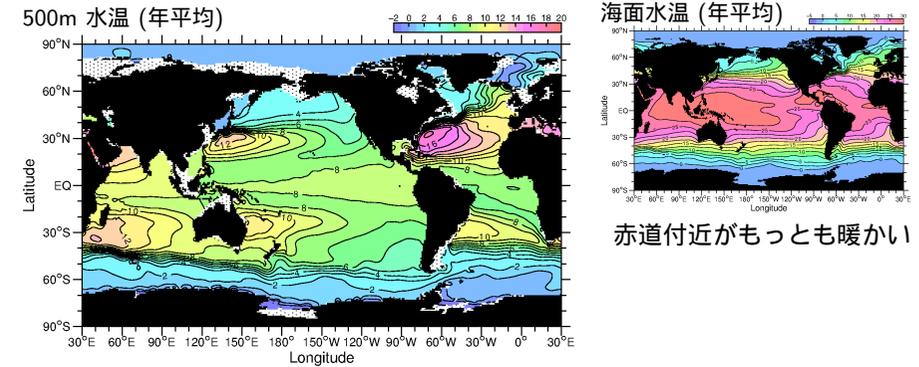
水温
 海面付近...赤道が最も高い
 混合層は北ほど厚い
 深さ 500m 付近 (永久躍層)
 ...中緯度が最も高い

亜表層の塩分の低い部分
 高緯度の海面の水が移動

水は, 同じ深度ではなく, 同じ密度の深さを流れる



水温の水平分布



- 緯度 30 度付近, 海の西側がもっとも暖かい (黒潮や湾流が流れている場所). 北太平洋よりも北大西洋の方が暖かい (塩分が高いので, 密度は高い)
- 500m は, 中緯度における主水温躍層の深さ (混合層・季節躍層の下なので, 海面熱フラックスの影響を受けない) 流れている水はほぼ同じ温度を保つ (熱拡散等で徐々に変化) ほぼ等温線に沿って水は流れている