



全学自由研究ゼミナール 2005年

世界をめぐる深層海流

藤尾伸三

fujio@ori.u-tokyo.ac.jp
<http://cer.ori.u-tokyo.ac.jp/fujio/>

東京大学 海洋研究所

深層流に関する話題

dayafter-gcb.eps

地球温暖化 国連会議 ニューデリー

The day after tomorrow

dayafter-gcb2.eps

dayafter.eps

- 約1万年前に起きた気候大変動の証拠があります。氷の中の温室効果ガスが示すように、地球温暖化が2世紀に及ぶ氷河期を招いたのです
- よく分かりません。地球の温暖化が問題なのでしょう？ 氷河期？
- 逆説的ですが、地球の温暖化が寒冷化を招くのです。北半球の気温を左右するのは北大西洋海流。赤道一帯から太陽熱を北に運びます。しかし地球温暖化が極地の氷を解かし海流の流れを変え、ついには流れを止めるので温暖な気候は失われる

ブロッカーのコンベヤーベルト

broecker.eps

glacial.eps

- 温かい水が海面付近を太平洋・インド洋から北大西洋北部に流れる
冷たい水が海底付近を北大西洋北部から太平洋,・インド洋に流れる
北大西洋北部では水は海面から海底に沈降, その他では上昇.
- 氷河期の最後に表れた, 北大西洋に見られる一時的な再寒冷期の説明.

海洋深層水



サントリー 100%深層水

海洋深層水 100% 使用

海は人間のふるさと。その奥深く水深330mから汲み上げた海洋深層水を100%使用しました。

塩分(ナトリウム)を限りなく除去

塩分(ナトリウム)を99.9%除去し、カロリーゼロで今までにないすっきりと飲みやすい美味しさになりました。

栄養成分(500mlあたり)

| | | | |
|--------|--------|-------|--------------|
| エネルギー | 0kcal | カルシウム | 5.5mg |
| たんぱく質 | 0g | カリウム | 0.04mg |
| 脂質 | 0g | ヨウ素 | 0.42 μ g |
| 炭水化物 | 0g | リン | 3.50 μ g |
| ナトリウム | 1.3mg | セリン | 0.30 μ g |
| マグネシウム | 37.6mg | | |

硬度・・・330mg/L(硬水)

海洋深層水を100%使用しミネラル分を調整しています。

採水地: 三浦半島三崎沖
約5000m 水深300m

海洋深層水



AKO 海の深層水 天海の水 硬度250

[いのちのふるさと]

海洋深層水は、非常に長い年月の間、深い海で眠っていた海水が、室戸沖で湧昇流となってあらわれたものです。人間の健康に必要なさまざまなミネラルを含んだクリーンな海水で、生きとし生けるものに多大な恵みを与えます。

[からだが求める水]

本品はクリーンな海水から塩分をぬき、硬度調整して飲みやすくした健康生活飲料です。

栄養成分表示 (500mlあたり)

| | |
|--------------|--------|
| エネルギー・たんぱく質・ | |
| 脂質・炭水化物 | 0 |
| ナトリウム | 9.3mg |
| マグネシウム | 25.0mg |
| カルシウム | 8.9mg |
| カリウム | 8.6mg |

採水地: 高知県室戸沖2200m 水深344m

海洋深層水の成分

| 名称 (採水地) | Na | Mg | Ca | K | 硬度 | Na | Ca | K |
|-------------------|----------------|------|-----|-----|------|--------|-----|----|
| | 水1ℓに含まれる量 (mg) | | | | | Mgを100 | | |
| 平均海水 (塩分約35) | 10800 | 1290 | 412 | 380 | 6319 | 837 | 32 | 29 |
| 天海の水 (室戸) | 19 | 50 | 18 | 17 | 250 | 37 | 36 | 34 |
| マリンゴールド (室戸) | 37 | 4 | 1 | 2 | 17 | 1057 | 34 | 54 |
| スーパーマリンゴールド (室戸) | 135 | 17 | 6 | 7 | 84 | 799 | 36 | 40 |
| マリンゴールド硬度300 (室戸) | 552 | 58 | 22 | 27 | 295 | 947 | 38 | 46 |
| 深海の恵み (室戸) | 0 | 6 | 2 | 2 | 27 | 0 | 32 | 36 |
| 室戸の水 (室戸) | 40 | 35 | 22 | 14 | 199 | 114 | 63 | 39 |
| 海洋深層水100% (三浦沖) | 3 | 75 | 11 | 0 | 336 | 3 | 15 | 0 |
| 深海天然ミネラル水 (三浦沖) | 20 | 38 | 9 | 1 | 180 | 52 | 24 | 2 |
| 深海の泉 (駿河湾) | 258 | 31 | 10 | 10 | 153 | 827 | 32 | 33 |
| めぐみ (久米島) | 50 | 44 | 10 | 2 | 205 | 112 | 22 | 5 |
| 球美の水 (久米島) | 18 | 54 | 16 | 15 | 261 | 33 | 30 | 28 |
| Vittel (フランス) | 7 | 20 | 91 | 5 | 309 | 37 | 457 | 25 |
| Volvic (フランス) | 12 | 8 | 12 | 6 | 62 | 145 | 144 | 78 |
| 六甲の美味しい水 (神戸) | 17 | 5 | 25 | 0 | 84 | 325 | 483 | 8 |

- 「塩分」は海水 1ℓ に含まれるイオンの総重量 (g) に相当 … 電気伝導度で計る (ほぼ, 水を蒸発させて残る固体の重さ, 主に, NaCl, MgCl)
- 海水のイオン構成比は場所にどこも同じ 淡水と混ぜても薄められるだけ. 塩分をはかれば, 各イオンの量が分かる

海の深さと面積

上段: 平面図

高度5km以上の陸

深度5km以上の海

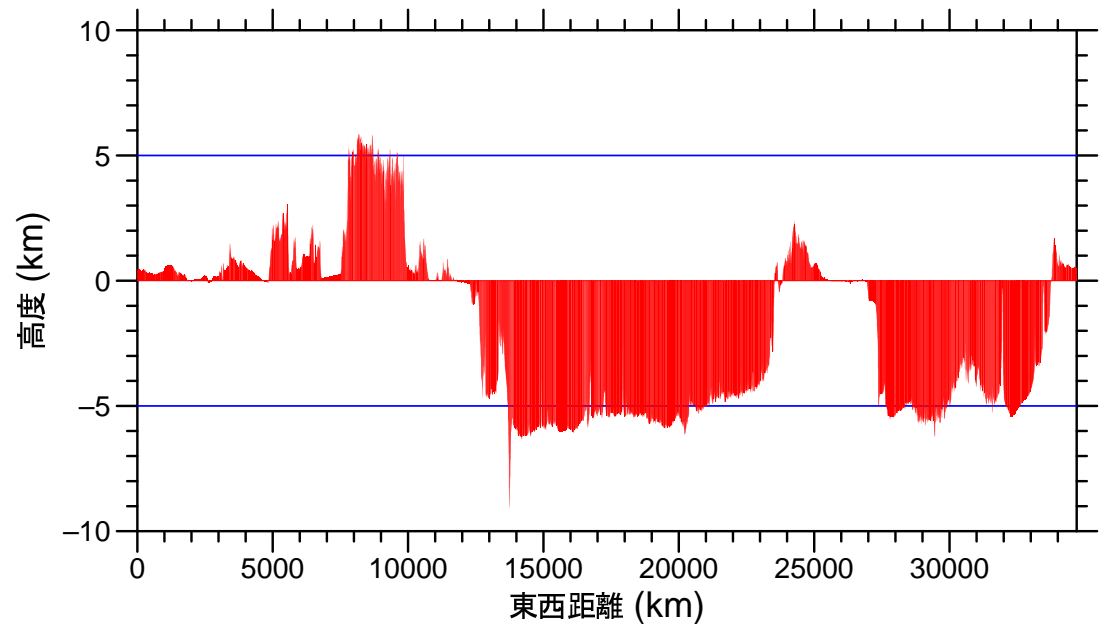
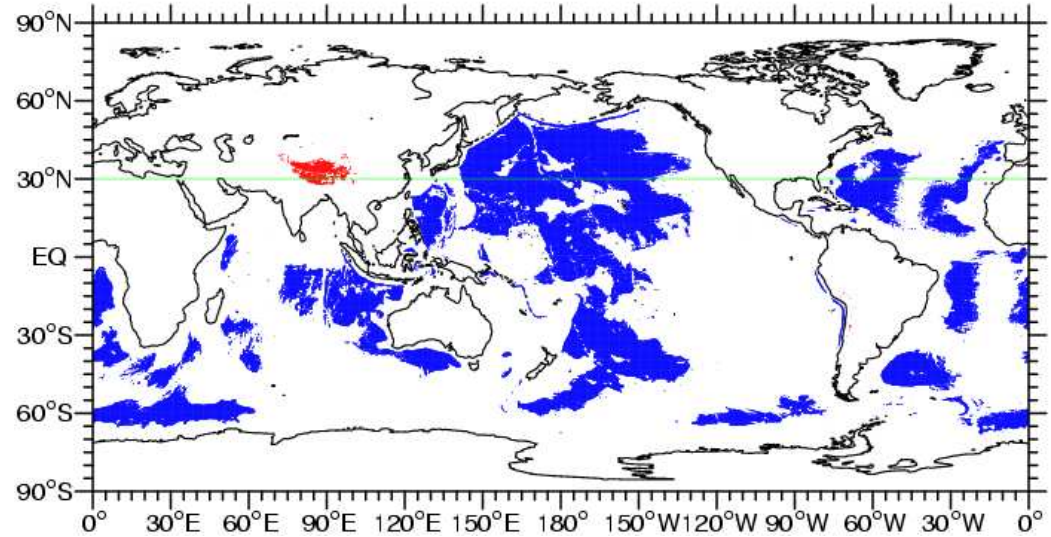
下段: 断面図 (北緯30度)

一番高い山

エベレスト 8,848m

一番深い海

マリアナ海溝 10,920m



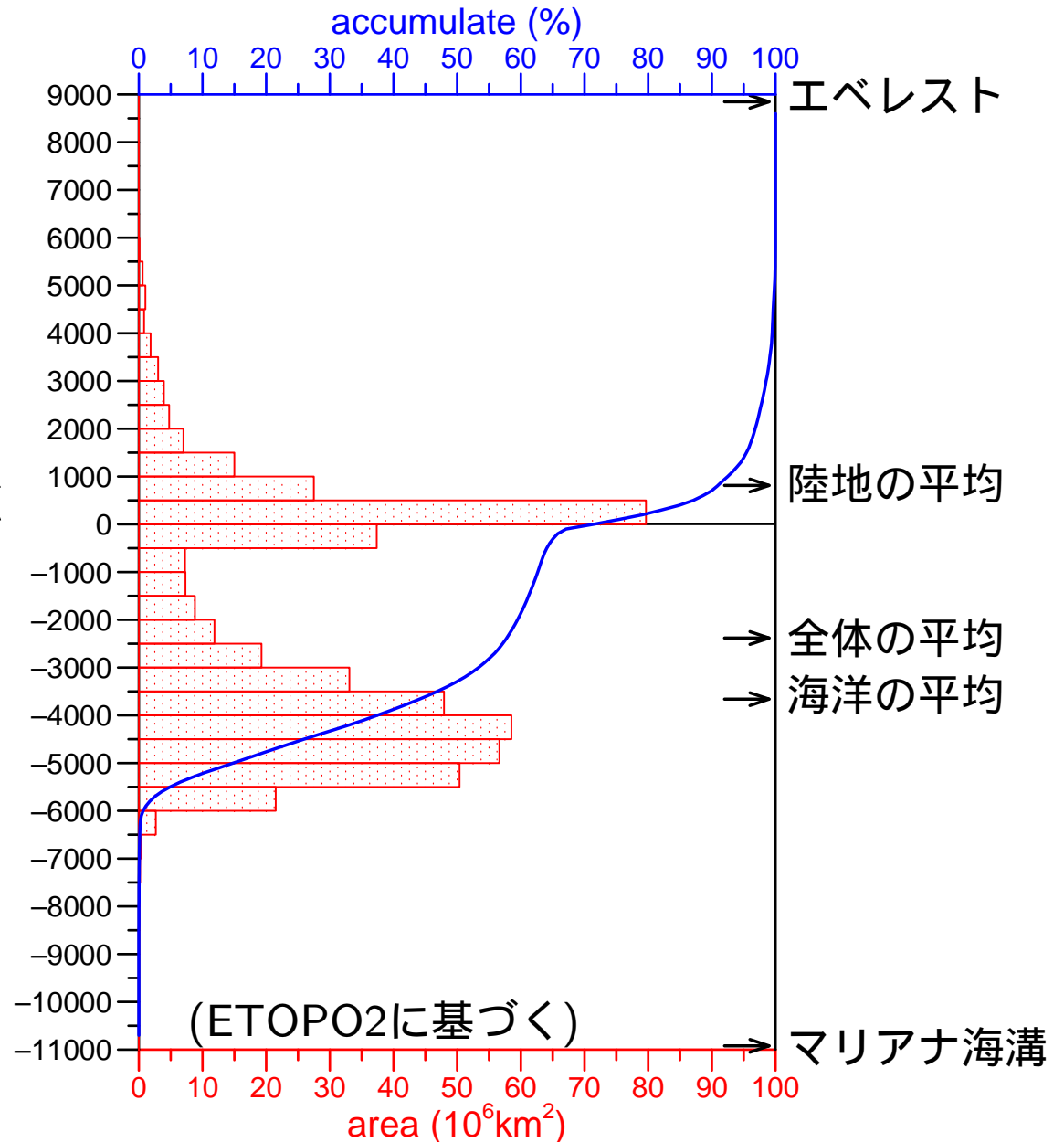
海の深さと面積

- 海洋は地表面積の7割
- 最深点 … 10,920m
マリアナ海溝
チャレンジャー海淵
- 平均水深 … 3800m
3000 ~ 6000mが多い
3000m以深で地表の5割強

| | |
|-------|---------|
| 陸地の平均 | 840m |
| 全体の平均 | -2,440m |
| 海洋の平均 | -3,800m |

資料によって、多少、異なる

- 瀬戸内海
平均水深は約30m



How deep can they go?

http://seawifs.gsfc.nasa.gov/OCEAN_PLANET/

| | |
|---------|----------------------------------|
| 0m | 船舶 |
| 127m | 素潜り (Francisco Ferreras) |
| 145m | スキューバ (Brett Gilliam) |
| 274m | 海藻 |
| 600m | 潜水服 |
| 900m | 軍用潜水艦 |
| 914m | Johnson Sea Link (有人潜水艇) |
| 923m | William Beebe (Bathysphere,1934) |
| 1,150m | マッコウクジラ |
| 1,219m | Ben Franklin (有人潜水艇) |
| 1,500m | ゾウアザラシ |
| 1,500m | 巨大イカ (Architeuthis dux) |
| 3,810m | タイタニック号 沈没点 |
| 4,000m | Alvin (有人潜水艇) |
| 5,000m | タコ |
| 5,639m | 海綿動物 |
| 6,000m | Jason (無人潜水艇) |
| 6,527m | しんかい16500 (有人潜水艇) |
| 8,370m | 深海魚の最深記録 |
| 9,789m | 端脚類 |
| 10,912m | Trieste (有人Bathyscaphe,1960) |

howdeep.eps

海面付近の流れ

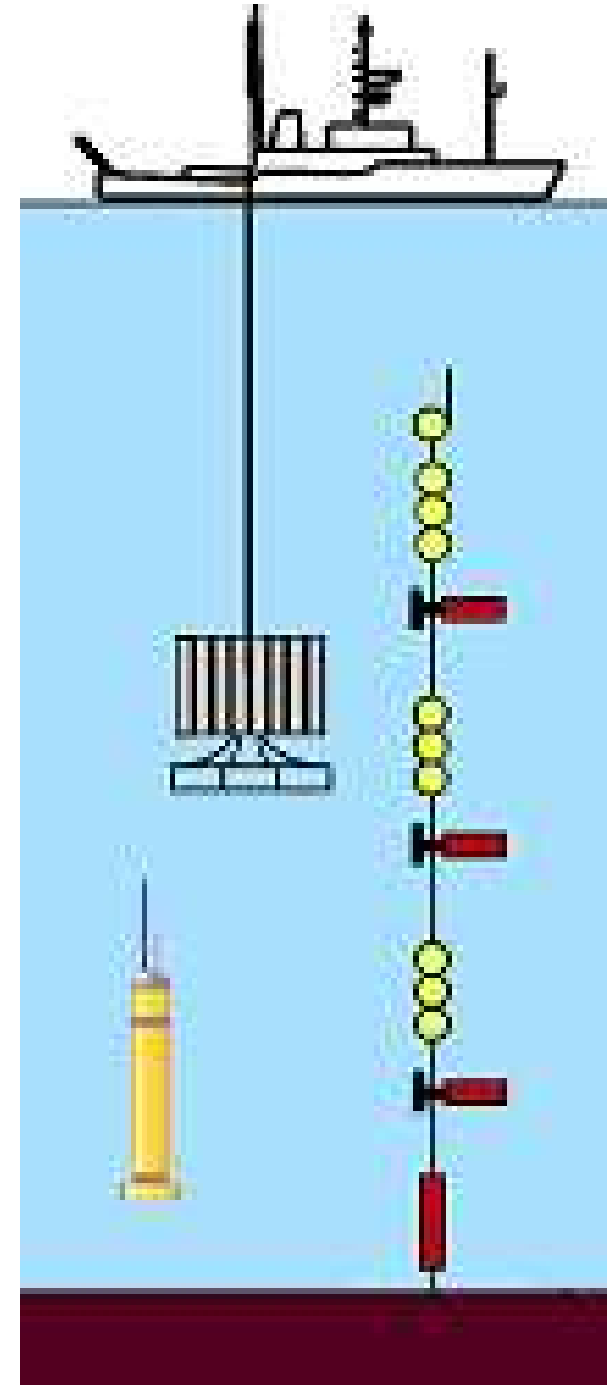
current.eps

Open University
“Ocean circulation”

- 海上を吹く風が作る … 風成循環
- 航海に海流は重要 … 大航海時代
- 基本的には水平循環 (渦巻き)

深層の流れをどうやって調べるか

- **CTD (電導度・水温・深度計)・採水器**
ワイヤーの先に温度計や採水用ボトルなどを付け、船から降ろす。
富士山よりも長いワイヤー
- **係留系**
ロープの一方に重り、他方に浮きを付けて、海中に投入。重りで海底に固定され、浮きでロープを直立させる。
ロープの途中に流速計などを結び、深さごとに流れを測定
- **中立フロート**
水といっしょに流れ、位置を音波を発信(受信)して決める…受信局(発信局)を別に係留する。
はかりたい深度になるように、浮力を調整



深層の流れをどうやって調べるか

- **CTD (電導度・水温・深度計)・採水器**
ワイヤーの先に温度計や採水用ボトルなどを付け、船から降ろす。
富士山よりも長いワイヤー
- **係留系**
ロープの一方に重り、他方に浮きを付けて、海中に投入。重りで海底に固定され、浮きでロープを直立させる。
ロープの途中に流速計などを結び、深さごとに流れを測定
- **中立フロート**
水といっしょに流れ、位置を音波を発信(受信)して決める…受信局(発信局)を別に係留する。
はかりたい深度になるように、浮力を調整



深層の流れをどうやって調べるか

水圧について

10m深くなると, 約1気圧上昇 … 6000mでは, 約600気圧

カップヌードルの容器を6000mまで沈めると …

深層の流れをどうやって調べるか

水圧について

10m深くなると, 約1気圧上昇 … 6000mでは, 約600気圧

カップヌードルの容器を6000mまで沈めると …



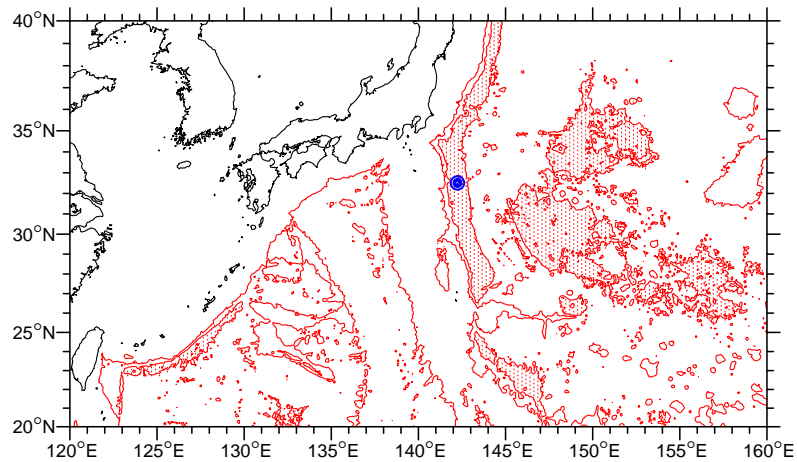
水温の鉛直分布

水温 (現場水温)

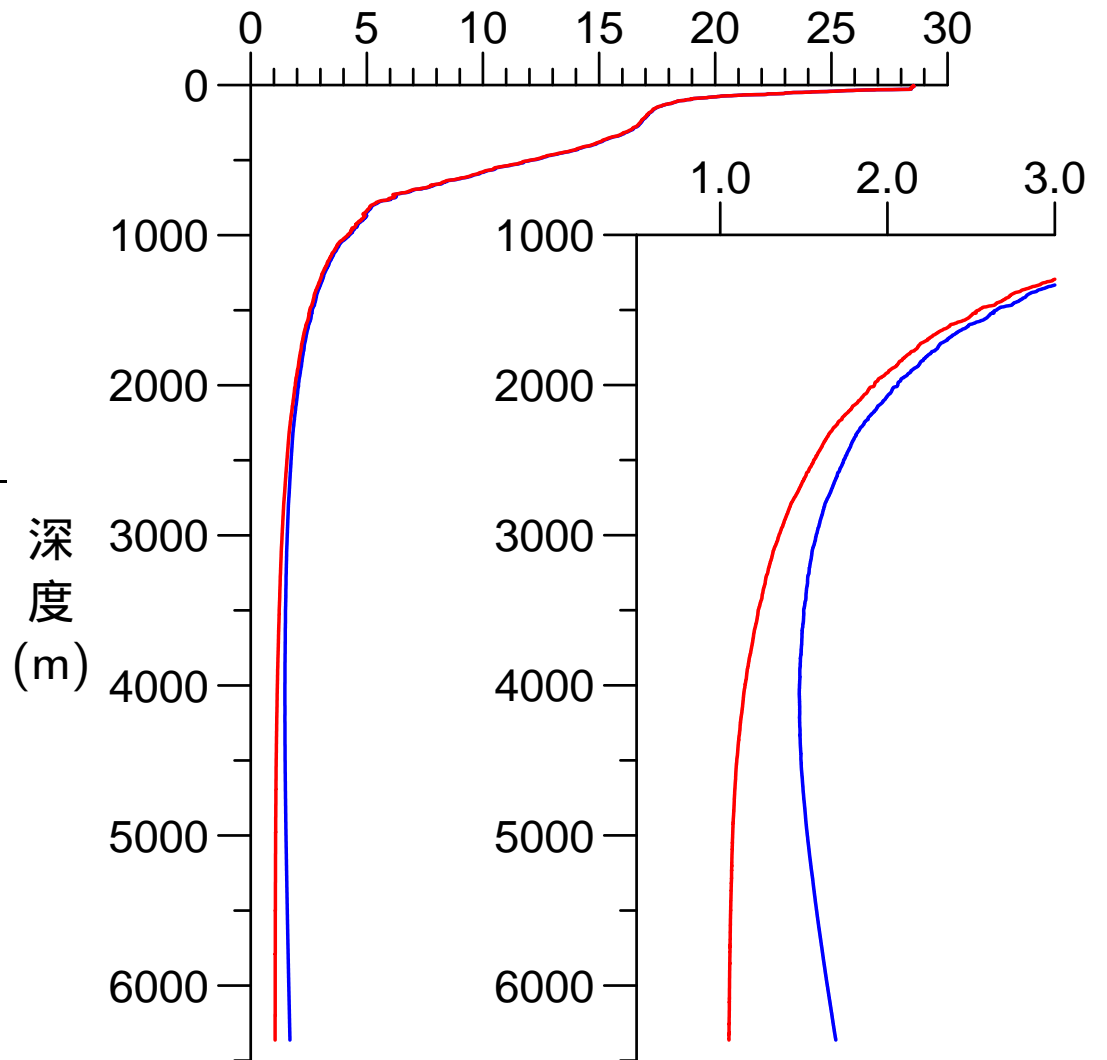
ポテンシャル水温 … 圧縮による
昇温を差し引いた水温

- 海面は大気で温められる
- 1000m以深は冷たい … なぜ?

観測点 … 伊豆小笠原海溝上



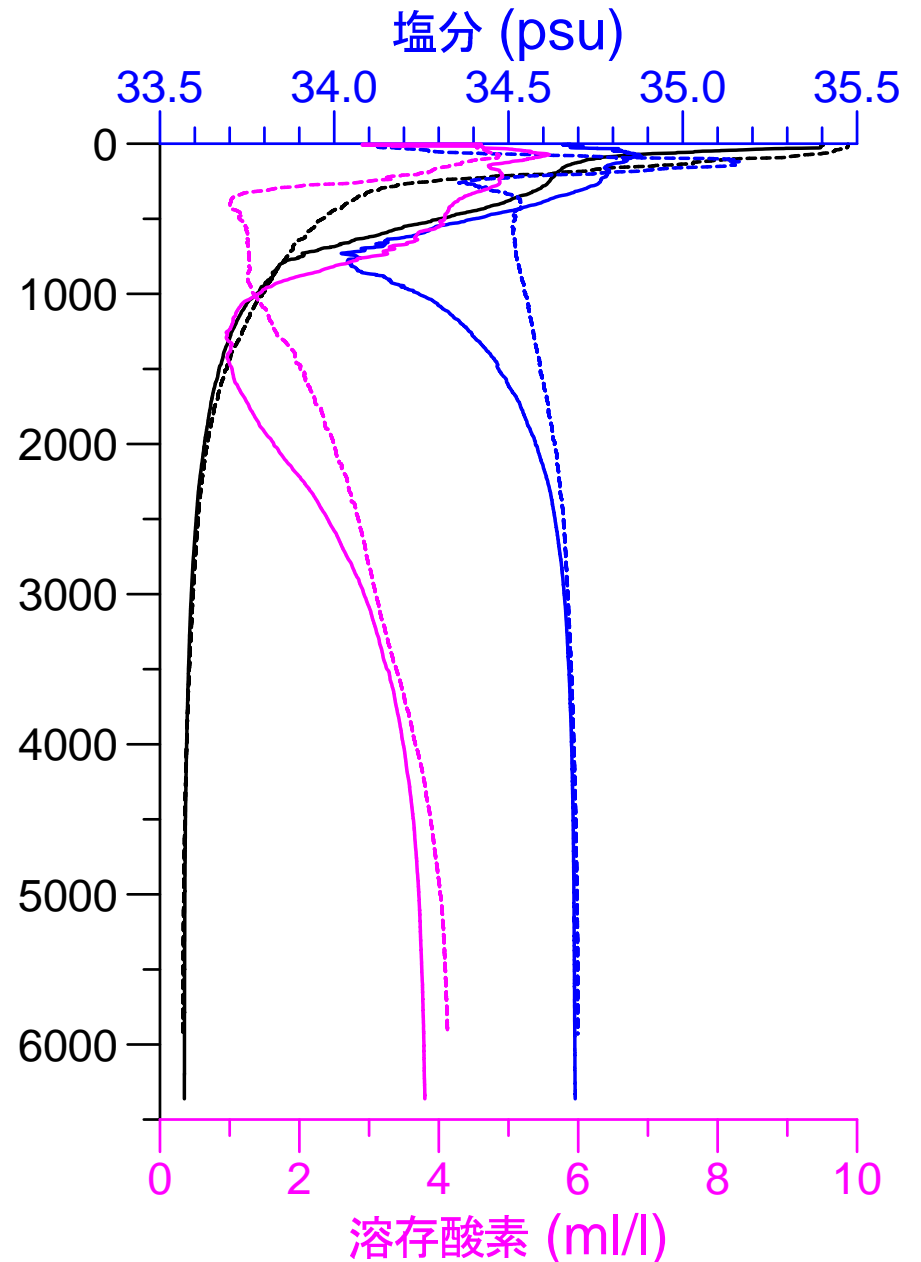
赤色: 4000m, 6000m 等深線



水温, 塩分, 溶存酸素

黒線は, ポテンシャル水温 (0 ~ 30度)
実線は, 日本近海, 破線は赤道付近

- **ポテンシャル水温**
 - … 海面での加熱・冷却
- **塩分** … 海面での蒸発・降水
海中では変化しない (混ざる)
海面から沈んだ値を保持.
深層は, 同じ値
- **溶存酸素** … 海面で飽和
海中では生化学的に消費
時間とともに減少
深層は, 酸素が多い … 新しい
- 海底付近にどこかから水が来ている



深層水の形成

- 重い水 (密度が大きい水) は, 沈む.
 - * 自分と同じ重さの水のところまで沈む.
 - * もっとも重い水が海底上.

海水の場合, 水温が低い程, 重い … 淡水は4°C.で最大

塩分が高い程, 重い
- 流れるに従って, 少しずつ, 上層の水と混ざる
上層から温められる.
 - * 酸素, 放射性炭素 … 時間とともに減少.
 - * 海底上の水の特性を調べると, 深層水の経路が分かる.

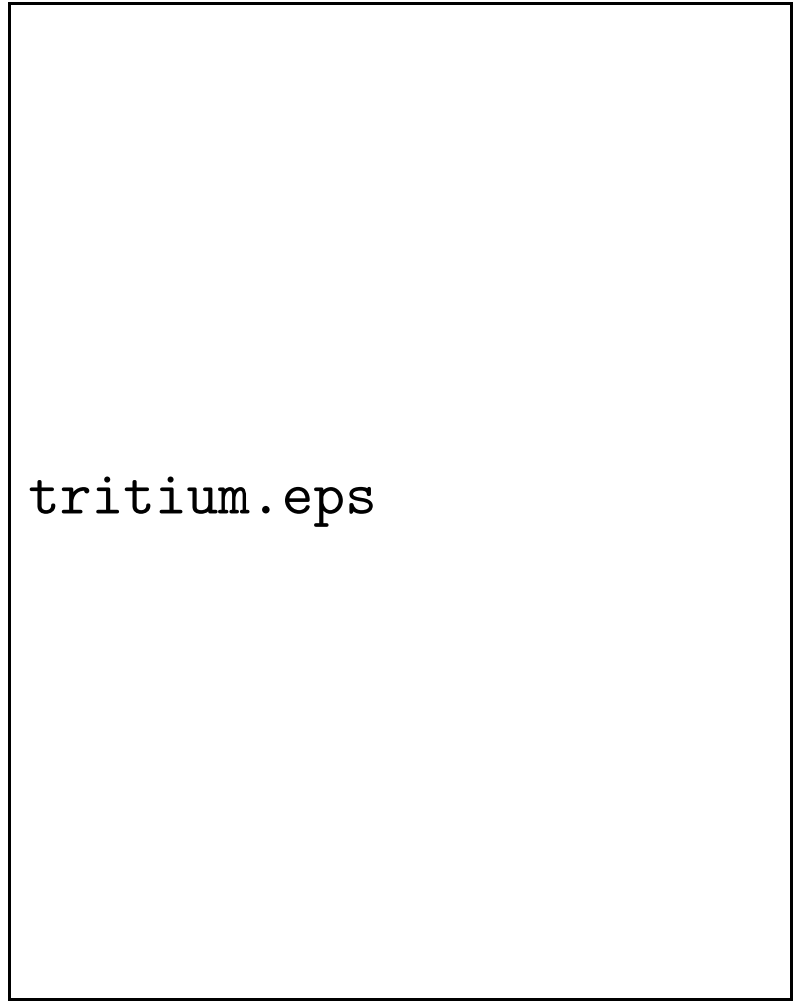
北大西洋での沈降

大西洋の西側に沿う鉛直断面図.

- トリチウム (北大西洋のみ)
 - * トリチウムは1950年代以降, 水爆実験により大量に大気中に放出された.
 - * 1972年よりも1981年の方が南に流れている.



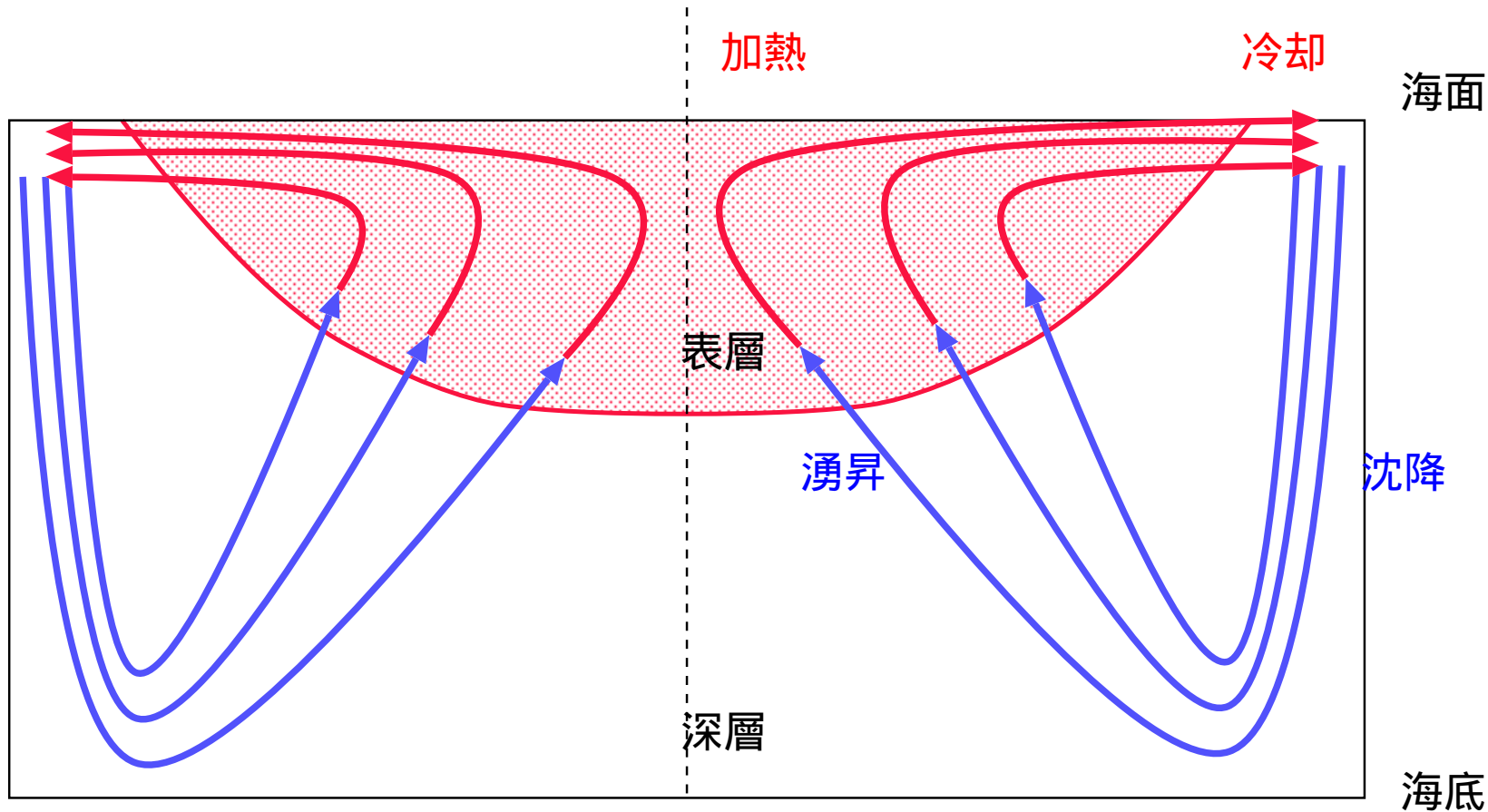
GEOSecs



tritium.eps

Toggweiler (1994)

南北循環



南極

赤道

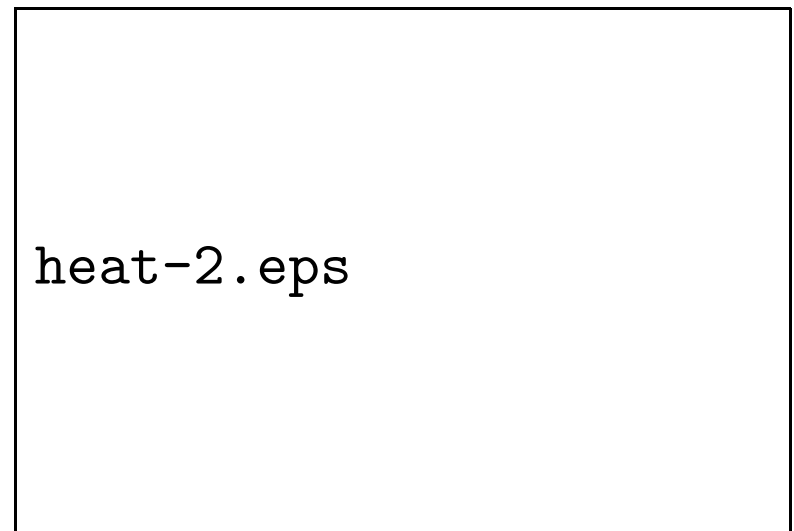
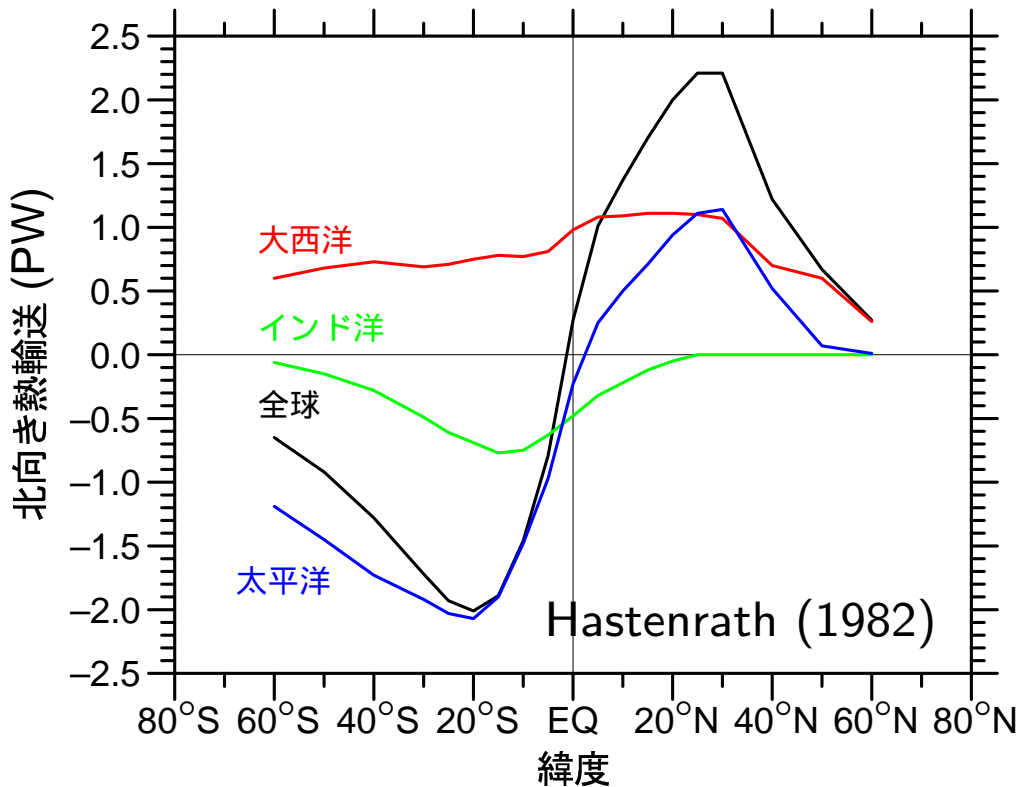
北極

高緯度側で、冷たい水が沈降し、低緯度側で湧昇する

- 冷たい水が赤道側に $\dots T < T_0, v < 0 \longrightarrow$ 熱は極方向に
- 温かい水が極側に $\dots T > T_0, v > 0 \qquad \dots v(T - T_0) > 0$

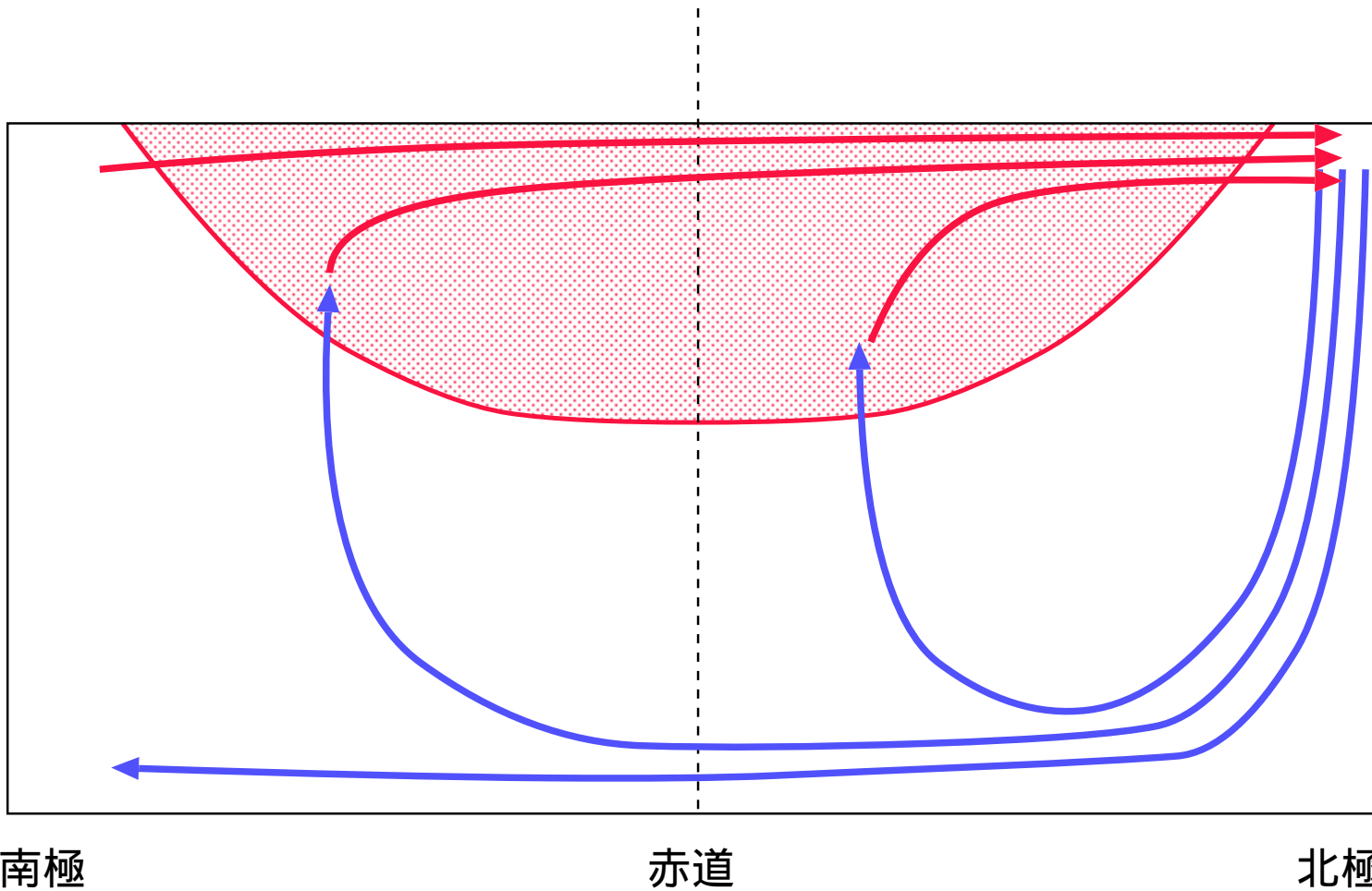
南北熱輸送

- 全球の熱輸送は、ほぼ南北対称
海は低緯度で受けた熱を高緯度まで運ぶ・・・大気の熱輸送の約半分
流れがないと、水温は低緯度で高く、高緯度で低くなる一方.
- 南大西洋は熱を低緯度に (冷たい水を寒い方に) 運ぶ



Houghton et al., (1996)

大西洋の南北循環



- 深層で高緯度側に冷たい水が運ばれる。

放射性炭素 (C14) と海水の年齢

- 年齢は海面で0 (沈降してからの年数)

大西洋 … 北大西洋の2000mは新しい

c14-atlantic.eps

age-atlantic.eps

太平洋 … 北太平洋の2000mは古い

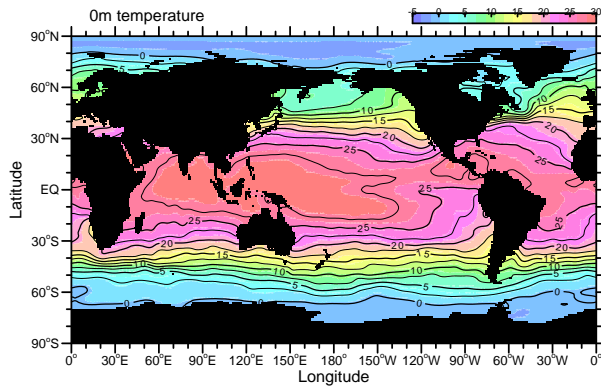
c14-pacific.eps

age-pacific.eps

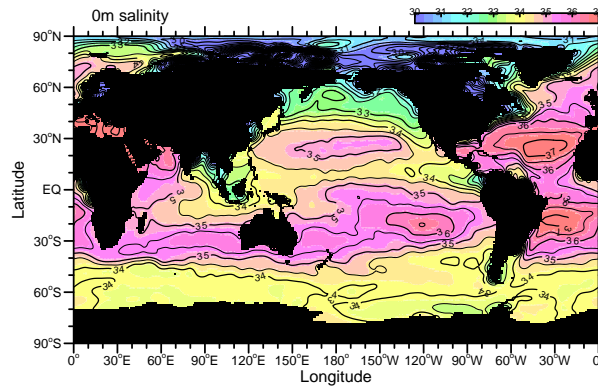
C14 … Ostlund and Stuiver (1980), Stuiver and Ostlund (1980)
年齢 … Tsunogai (1985) 左右を反転

なぜ北大西洋で沈降するか

海面水温

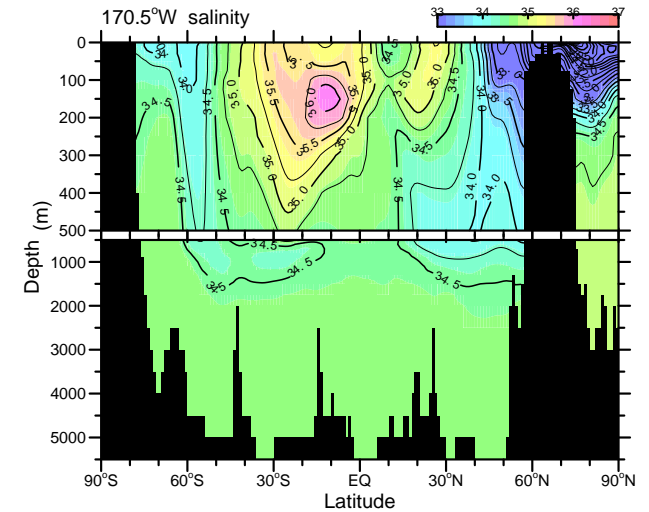


海面塩分

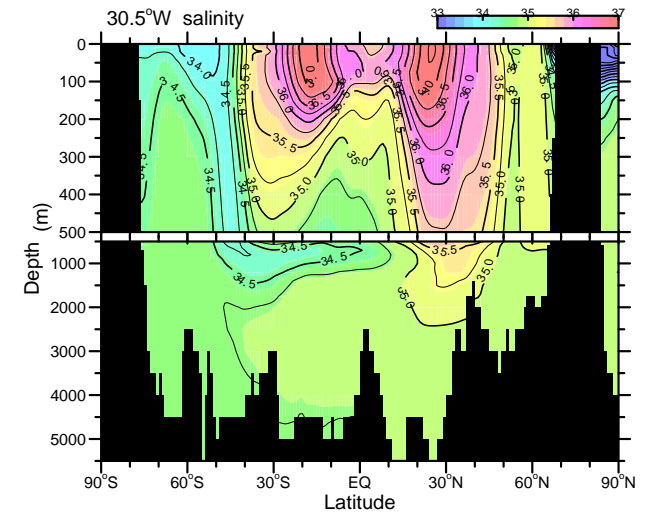


塩分の南北断面図

太平洋



大西洋



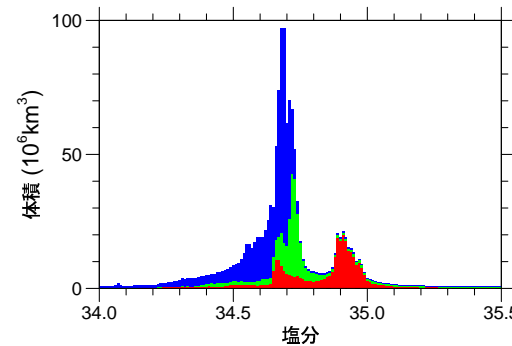
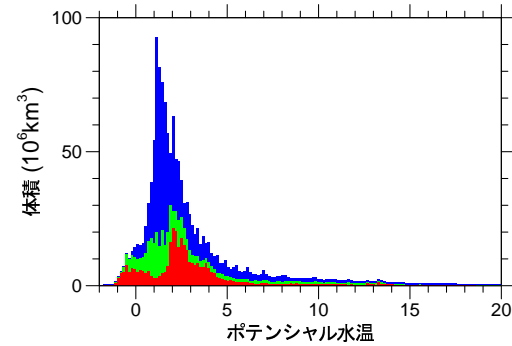
- 大西洋の方が海面塩分が高い
蒸発が多い. 地中海からの流出
- 海水があまり冷えなくても沈降できる.
北大西洋深層水
- 沈降した水の方, 南から温かい水が来る
蒸発がさかんになる

海水の体積ヒストグラム

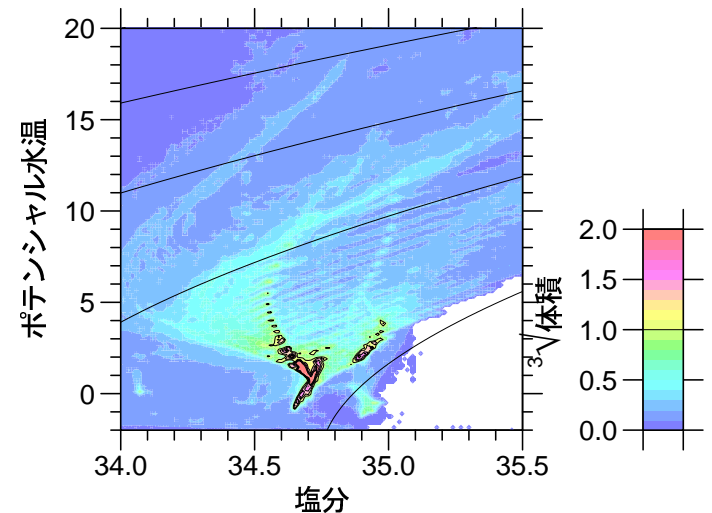
ポテンシャル水温, 塩分でわかる

(World Ocean Atlas 2002 に基づく)

- 多くの水は, 似た水温, 塩分の値
 - ポテンシャル水温 1 ~ 2°C …… 33%
 - 10°C未満 …… 92%
 - 塩分 34.6 ~ 34.7psu …… 35%
 - 34.2 ~ 35.1psu …… 92%
- TSダイアグラム …… 水温と塩分が軸
等値線は密度の等値線を表す
- 深層水 (冷たい水) が多くの体積を占める (密度はほとんど変わらない)
- 大西洋にしかない水 …… 塩分が高く, 水温が少し高い



太平洋
インド洋
大西洋



深層循環図

ストンメル (1958)

stommel.eps

ブロッカー (1989)

broecker.eps

シュミッツ (1995)

schmitz2.eps

ブロッカーの循環像の問題点 シュミッツの改変

- 南極での沈降がない
北大西洋北部とほぼ同量 (10×10^6 t/s … 毎秒10メガトン)
 $10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s} = 3 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{yr}$ 両方あわせると, $6 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{yr}$.
海の体積が $1370 \times 10^6 \text{ km}^3$ だから,
水が入れ替わるには $1370 \times 10^6 / 6 \times 10^5 = \text{約}2000$ 年. … 置換時間
- 南極周極流がない … 南極大陸を巡回する
周極流 … $130 \times 10^6 \text{ t/s}$, 黒潮 … $50 \times 10^6 \text{ t/s}$

深層循環図

シュミッツ (1995)

- 流れが1つしかない
 - * 深さによって, 異なる
 - * 海底地形によって, 深層水の分岐・集合が起きる
- 弱い流れについてはよくわかっていない

schmitz3.eps

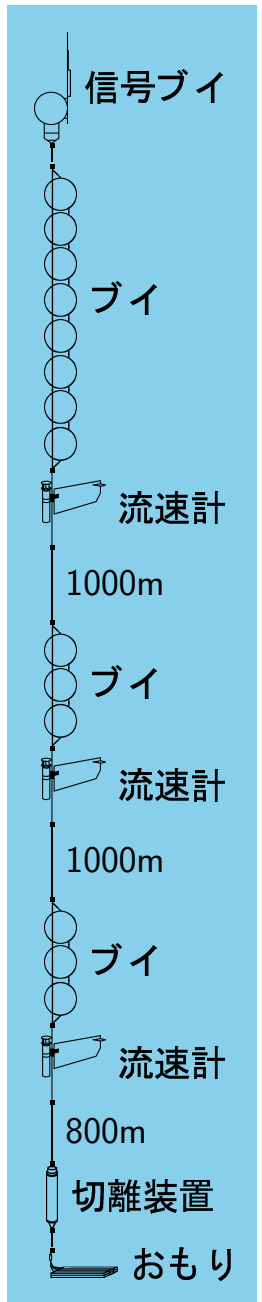
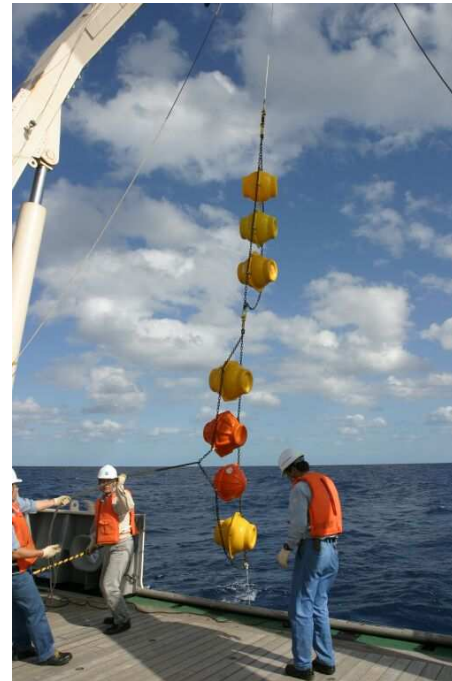
北太平洋には流路がほとんど書かれていない

- 北太平洋では, 海底への沈降がない
 - すべて南極周極流から分岐して, 南太平洋を通る
 - 一種類しかないため, 移動経路の追跡が難しい
 - 古い水

流れを直接, 測る (流速計)

係留系と流速計

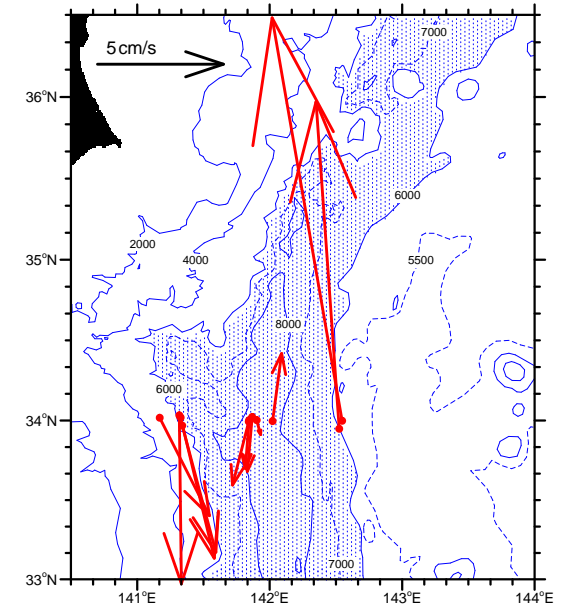
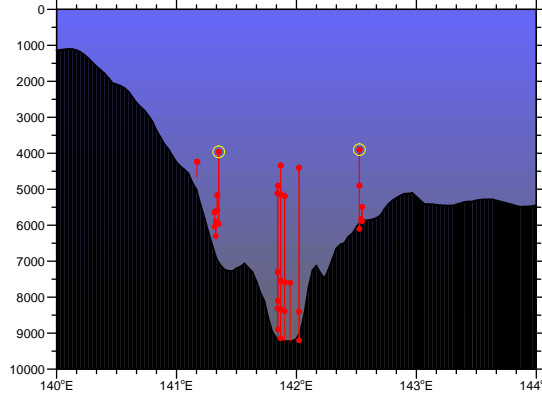
ローター型 (流向・流速)
超音波型 (ドップラーシフト)



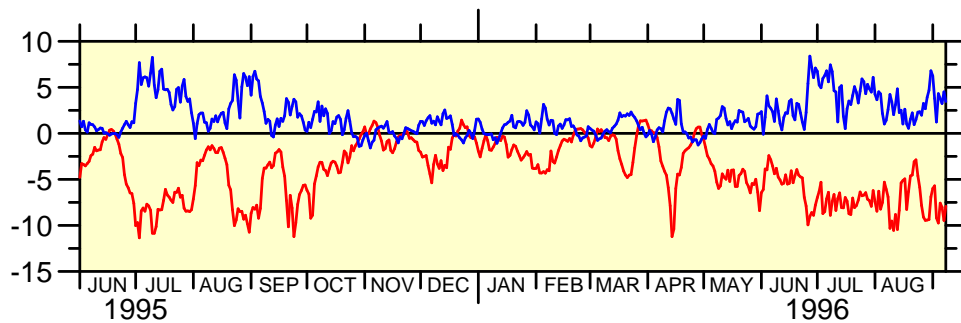
伊豆小笠原海溝の係留系

北緯34度ではかった流速
日平均値 (潮汐を含まない)

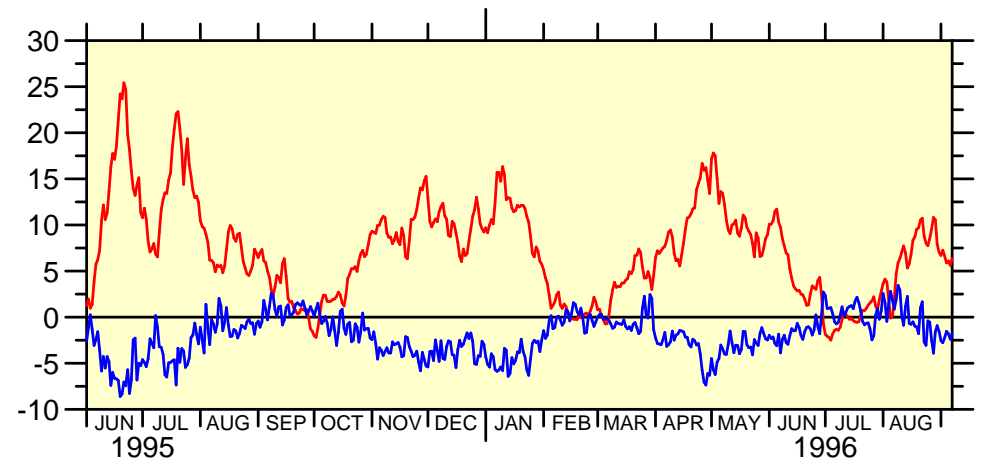
- 4ヶ月の変動
強い場合は30cm/s以上
- 15ヶ月の平均
西側で5cm/sの南下流
東側で10cm/sの北上流
最深部は流れが弱い



青色 … 東西成分, 赤色 … 南北成分



海溝西斜面 (南東向き)



海溝東斜面 (北西向き)

北西太平洋の深層流

- 海溝の東西斜面上
 - … 強い北上流と弱い南下流
 - アリューシャン海溝まで続く
- 海溝の東方
 - … 総じて西向き

北太平洋の深層流は海底上でもっとも強く、2000m付近でもっとも弱い

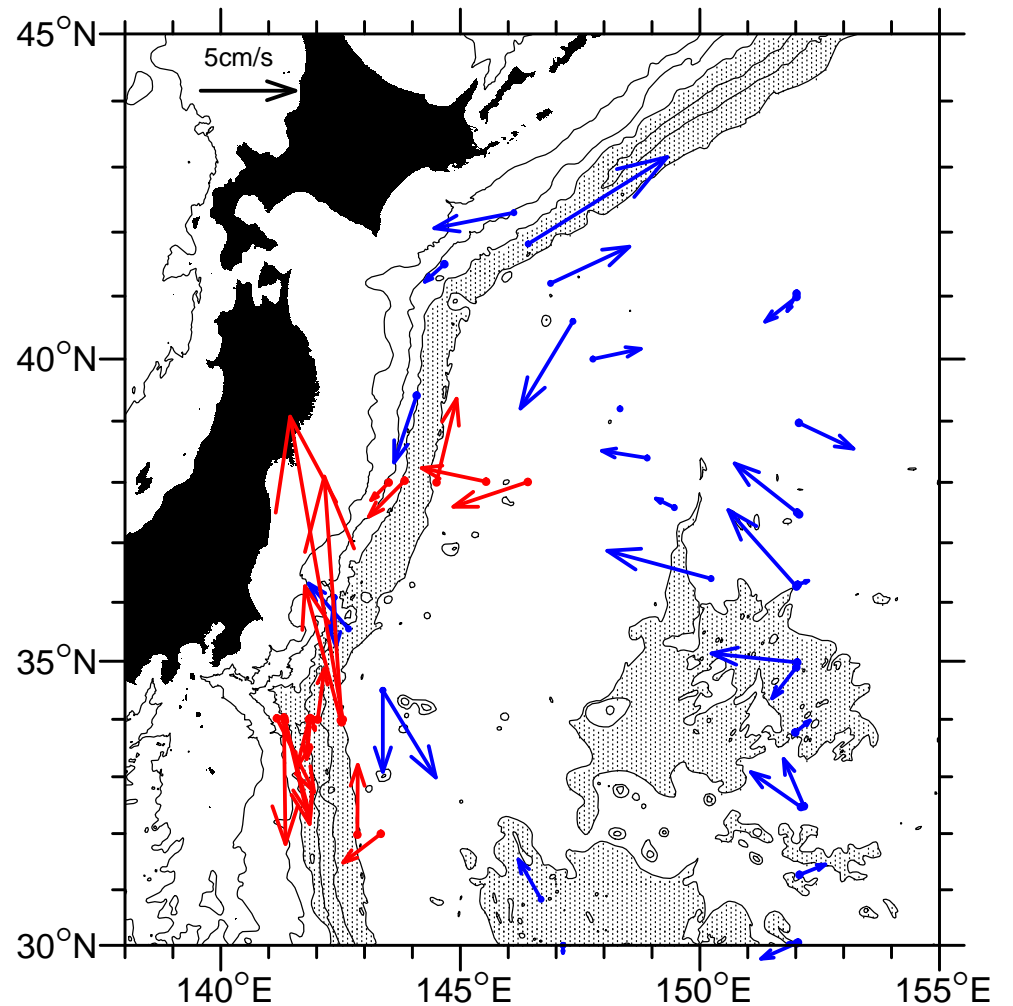
深層水が海底に沿って流れている

流速5cm/sで水が流れると、1日4km
1年で1500km (緯度で15度)

地球を一周するには約6年

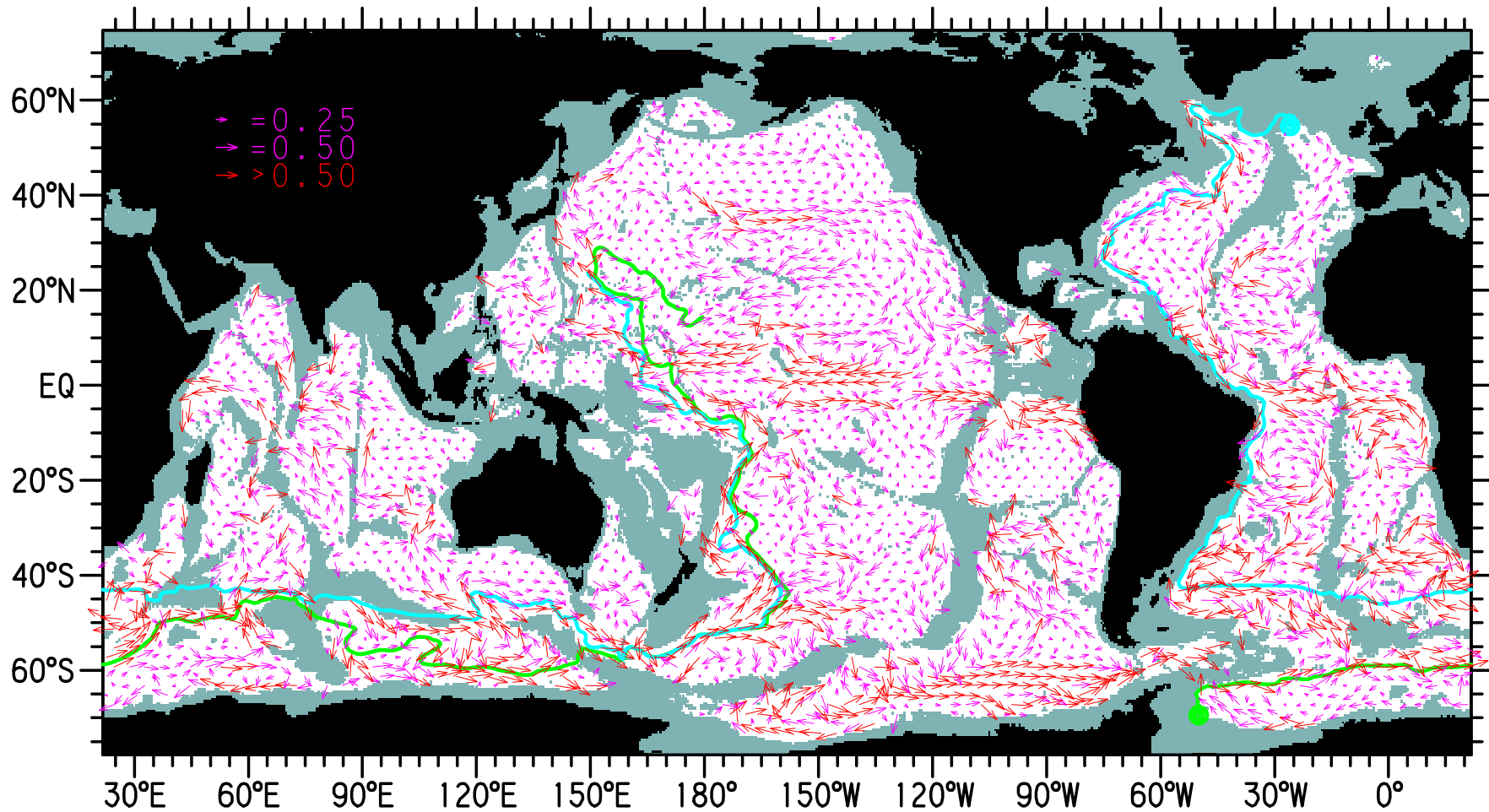
深層水の置換時間は 2000年

深さ4000m付近の平均流速



赤色: 海洋研, 青色: その他

数値シミュレーション



- 観測された密度場と風の間から流速を計算する
- 深さ 4000m の流れと海水の追跡

まとめ

- 深層循環は, 水温躍層 (深さ1000mまで) の下の流れを指す.
北大西洋北部と南極周辺海域で海面から沈んだ水が世界中の深層を占める
 水温や塩分がほとんど同じ
- 熱や物質を大気から受け取り, 南北に輸送する.
 … 深海に隔離する
 地球温暖化に重要?

北太平洋の深層流は, まだ, よくわかっていない

深層循環研究の歴史

- チャレンジャー号航海 1872～1876年
世界初の世界航海 (1985年に結果公表)
 - * イオン構成はどこでも同じ
 - * 深層の水温・塩分がほとんど同じ
- 1930年代 … ビュスト … 北大西洋深層水, 南極底層水
- 1960年代 … ストンメルの理論モデル
- 1980年代 … 深海係留観測, 数値シミュレーション
- 1990年代 … 高精度のCTD