

# 深海科学概論 深海の物理 第1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/>  
[fujio@aori.u-tokyo.ac.jp](mailto:fujio@aori.u-tokyo.ac.jp)

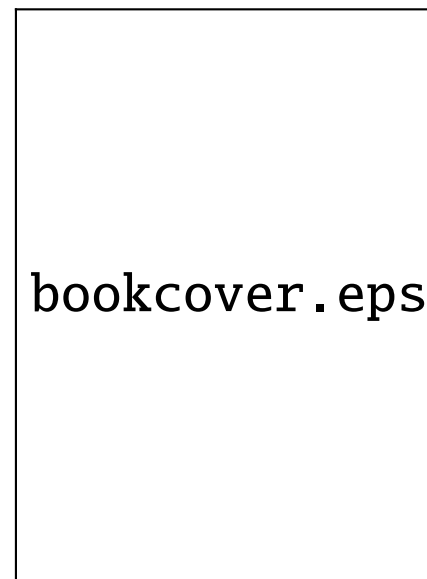
2010/6/11

最終更新日 2013/10/2

## 「深海」の「物理」

海洋の「物理」… 海洋物理学 (physical oceanography) 気象学

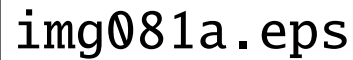
- 海水の動き (流れ, 波) を調べる
  - ◆ 運動の様子 (記述的)
  - ◆ 運動の原因 (力学的)
- 物理量 (運動に関係する量)
  - ◆ 流速, 流量, …
  - ◆ 水温・塩分, 水圧 CTDで測定
  - ◆ 密度, 音速, … CTDの値から計算



海洋物理学  
全般の入門書  
980円

海洋物理学の「深海」… 深層 (deep layer), 深層水 (deep water)  
深層循環 (deep circulation, abyssal circulation)

- 海水の性質や運動の違いによって, 「層」や「水」を定義する
- 一般には, 深さではなく, 密度が層に対応する.

A rectangular box containing the text 'img081a.eps'.

img081a.eps

Broecker (1987)

深層循環といえは、コンベアベルト  
しかし、現実の流れは単純でない

A rectangular box containing the text 'Rahmstorf.eps'.

Rahmstorf.eps

Rahmstorf (2002)

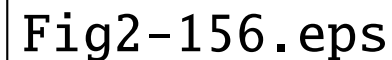
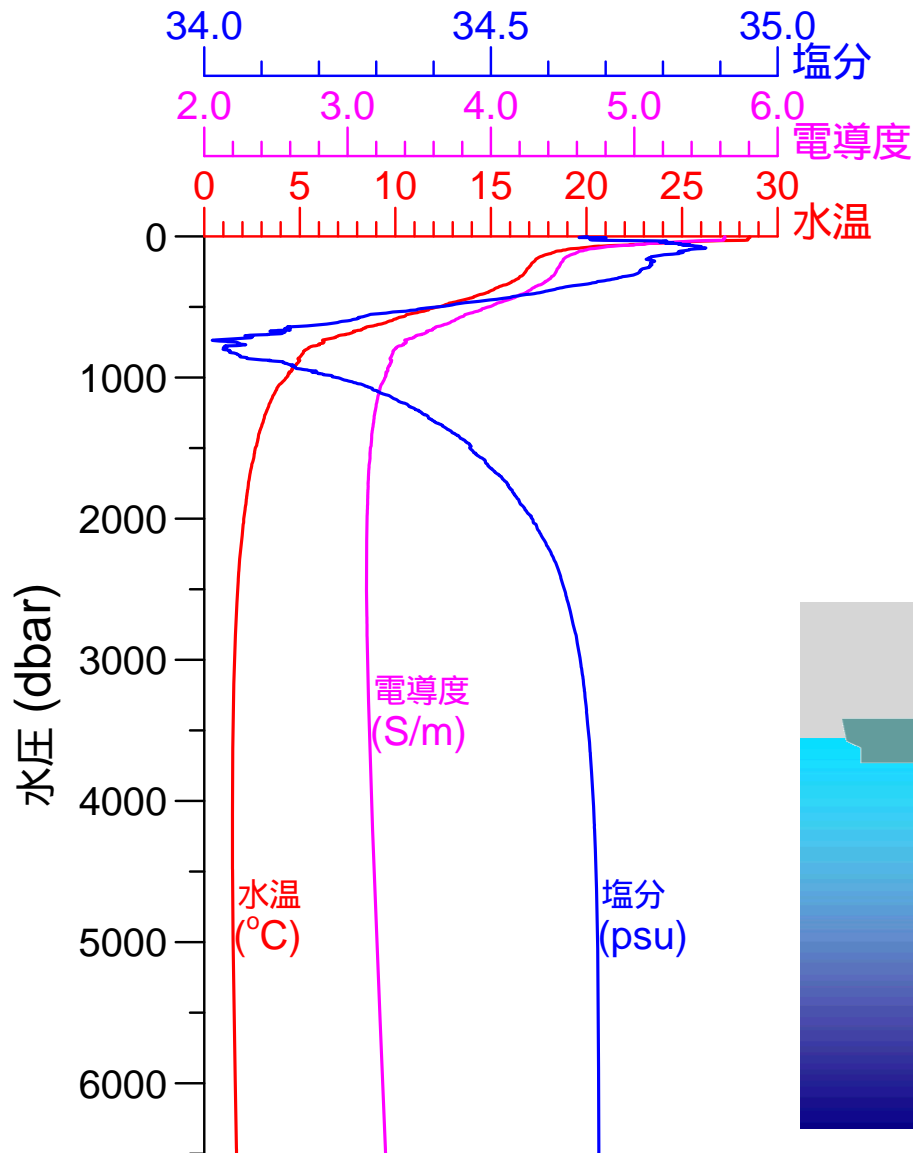
A rectangular box containing the text 'Fig2-156.eps'.

Fig2-156.eps

Schmitz (1996)

# 水温・塩分の鉛直分布

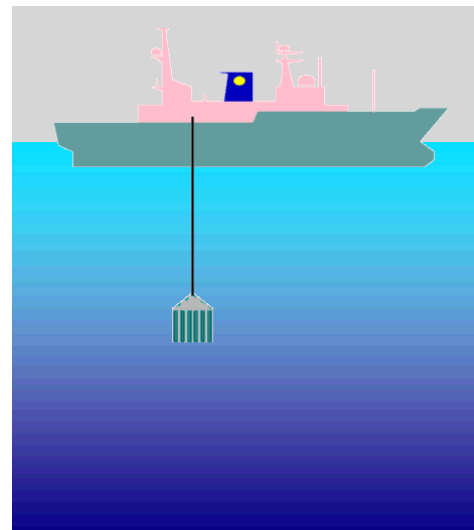
## 八丈島東方の観測例



## CTD (Conductivity-Temperature-Depth)

「電導度・温度・深度計」

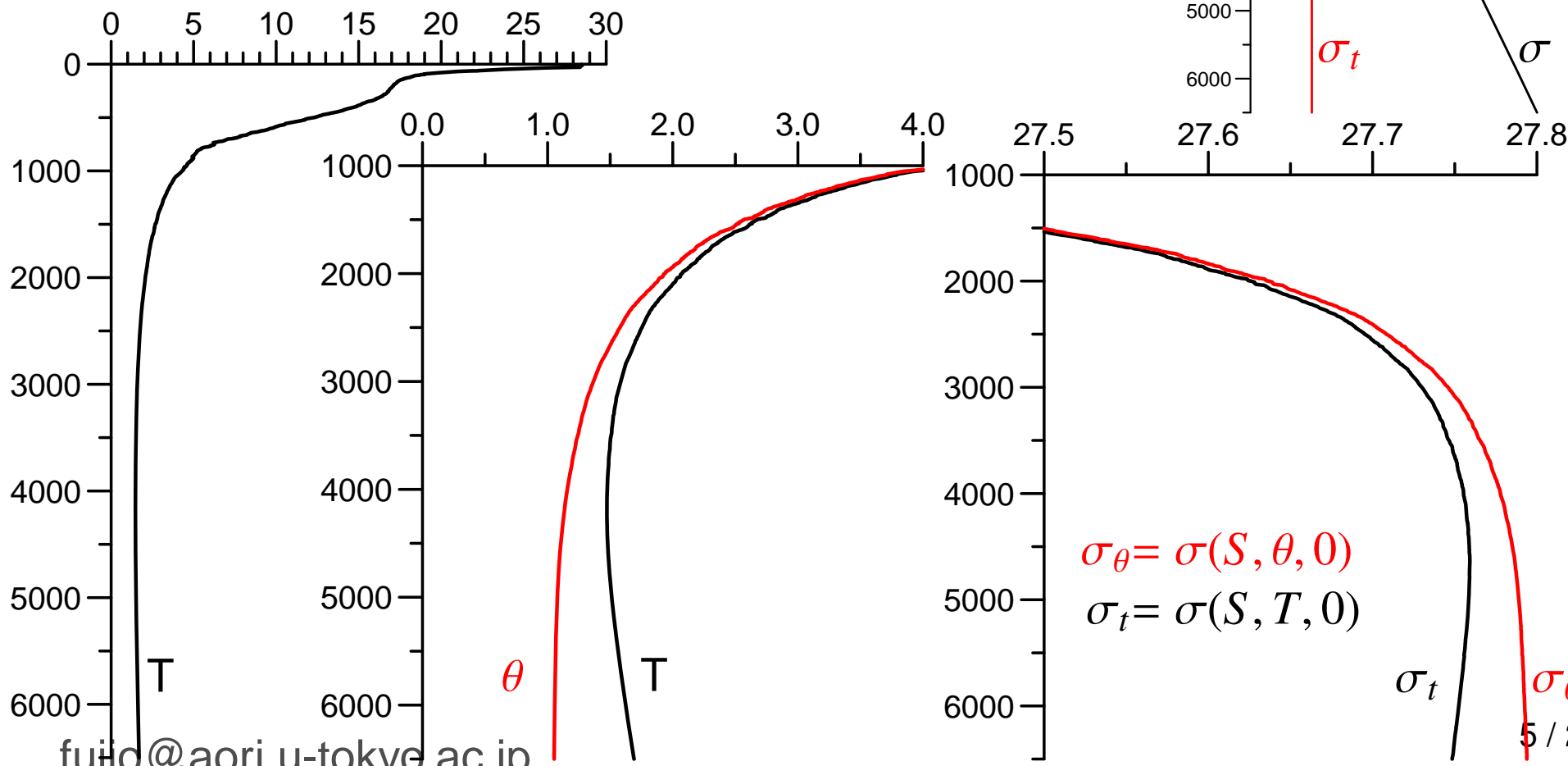
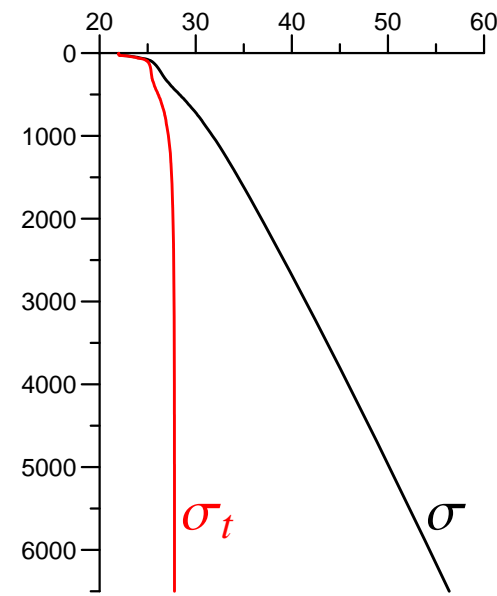
- 深さではなく, 水圧を測定  
 深度 1 m は約 1 dbar  
 (1 dbar =  $10^4$  Pa = 約 0.1 気圧)
- 塩分 (電導度・水温・水圧から計算)  
 1978年以降, 溶存物質ではなく, 電導度を使って定義する (実用塩分)



## 鉛直分布の特徴

- 深いところでは水温・塩分はほぼ一様
- 水温は深いほど低く, 塩分は極小・極大を持つ

- 圧縮されて海水の密度は増す (5000m深...1050 kg/m<sup>3</sup>)  
圧縮されて, 水温が高くなる
- ポテンシャル温度 $\theta$ は, 通常, 深さとともに単調に減少
- ポテンシャル密度 $\sigma_\theta$ は, 必ず, 深さとともに単調に増加



## 最初(?)の深海観測

Deacon (1971) のレビューによれば …

1751年に Henry Ellis が  
Stephen Hales の作成した測定装置で実施

1752年 … フランクリンの罎

1735年 … Hadley の大気循環

- 25°13′N, 25°12′W (アフリカ西岸沖)

- 結果

気温・海面水温は 84°F (28.9°C)

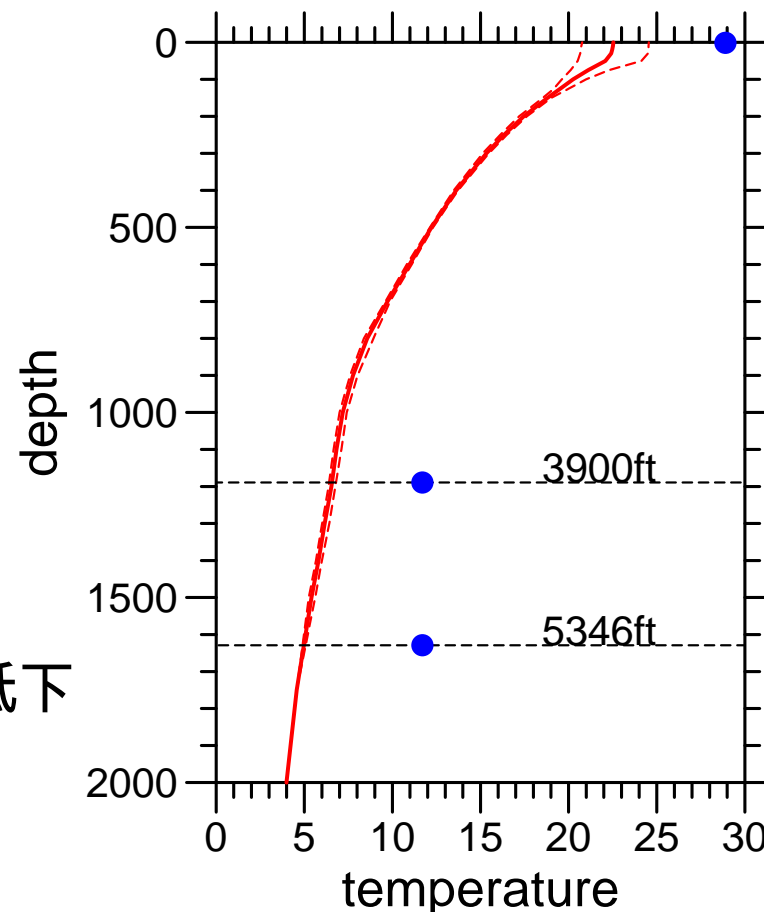
3900feet (1189m) で 53°F (11.7°C) まで低下

5346feet (1629m) まで変化しない.

深海は塩分が高い

- 現在の観測水温より 5°C ぐらい高い  
 上げているときにあたたまった?  
 温度計がずれてた?

- その後の Count Rumford (1800) らの理論のきっかけとなった



赤線は夏と冬の気候値

## Rumford の熱対流理論

Count Rumford (1800)

極域で海底に沈んだ冷たい水が、海底上を赤道向きに流れる。  
気候に影響

von Lenz (1847)の模式図



vonLenz.eps

両極付近で沈んで、赤道で湧き上がる  
大気の Hadley 循環を上下逆転させたもの

1870年代 … イギリス船 Challenger 号の世界一周

1920～30年代 … ドイツ船 Meteor 号の大西洋

wuest-cat1-temp.eps

wuest-cat1-sal.eps

*Wüst (1936)*

wuest-track2c.eps

大西洋全域  
海底までの水温, 塩分, 溶存酸素の観測

「水塊」を定義した



推測される流速 (Merz and Wüst, 1922)

Mertz-Wuest.eps

- 南北非対称  
(北極側から沈降した水の方が優勢)

vonLenz.eps

Lenz (1847)

## 現代の観測との比較 (塩分)

wuest-cat1-sal.eps

Wüst (1936)

wuest-track2c.eps

A16-ctdsal-1.eps

WOCE (1990年代)

A16-cruetrk-1.eps

観測点数が増え, 細かな構造  
測線の位置が多少, 違う点に注意

<http://www.bsh.de/aktdat/mk/AIMS/atlas/sections.html>

## 水温や塩分の分布から流れを推定する

保存量 … 時間が経っても変化しない

- ⎧ 流線に沿って, 値が変化しない (定常の場合)
- ⎧ 水が混ざると変化する (中間の値を取る)

非保存量

- 溶存酸素
- 放射性物質, ...

ポテンシャル温度 深海での圧縮効果を除いた温度

- 海面で熱フラックスにより変化し, 低緯度が高く, 高緯度が低い
- 深くなるほど, 水温は低い 冷たいほど, より高緯度の海面で沈んだ水

塩分

- 海面で降水・蒸発により変化し, 中緯度で高く, 高緯度・赤道付近で低い.
- 500 ~ 1000m付近に塩分の極小値 同じ海面塩分

ポテンシャル密度 深海での圧縮効果を除いた密度

- ポテンシャル密度が周囲よりも大きいと, 沈降する
- ポテンシャル水温と塩分から決まり, ほぼ保存 ( キャベリング)

水温と塩分で水を分類すると, どの海面から亜表層に入ったか判別できる.

同じ海域に起源をもつ (同じ水温・塩分の関係を持つ) 水を「水塊」と呼ぶ.  
水塊を「追跡」することで, 流線が判別できる

大西洋の西側に沿った断面図での塩分

wuest-watl-sal.eps

極値を取る層に注目して、流れを推定する.

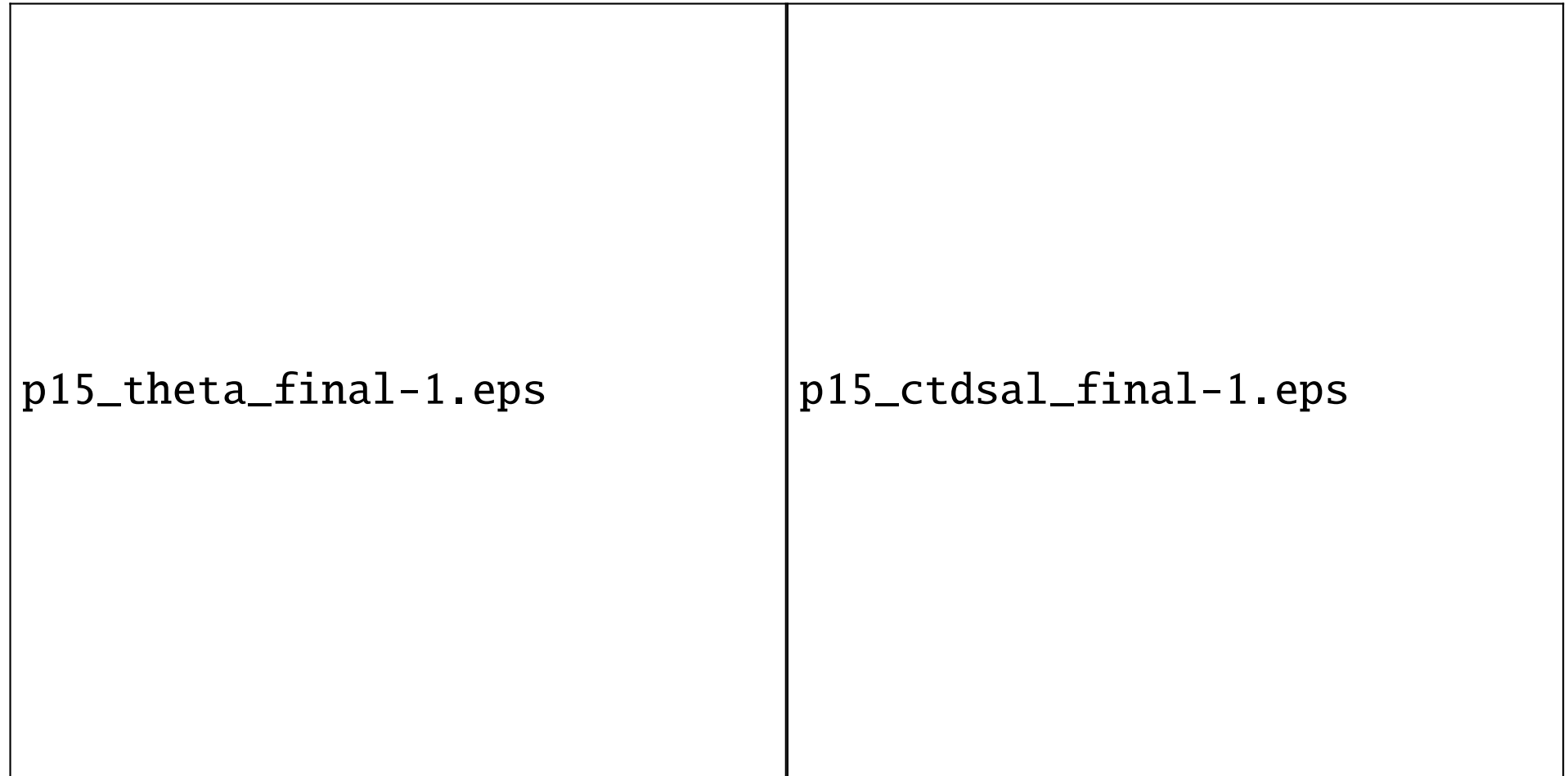
- 南極中層水 (AAIW) … 塩分極小  
南極周極流付近で亜表層へ 北上
- 北大西洋深層水 (NADW) … 塩分極大  
北大西洋で沈降 南下
- 南極底層水 (AABW) … 水温最小  
南極大陸周辺で沈降 北上

流れるにつれ、周囲の水と混合し、値は徐々に変化 (極値の程度が小さくなる)

塩分極大層の深度での流れ  
(色はNADWの割合)

wuest-nadw.eps

L. Talley ([http://www-pord.ucsd.edu/whp\\_atlas/pacific\\_index.html](http://www-pord.ucsd.edu/whp_atlas/pacific_index.html))



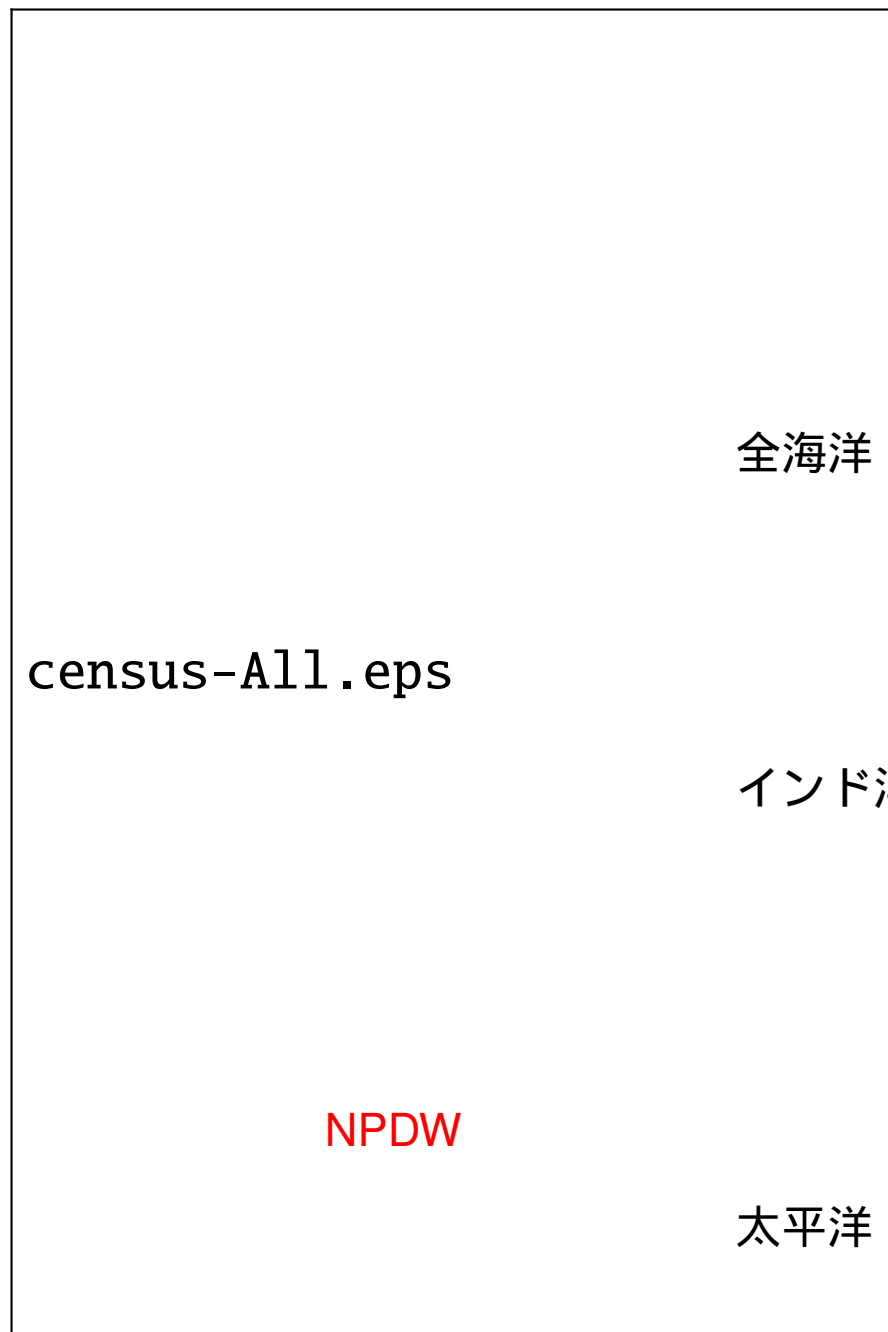
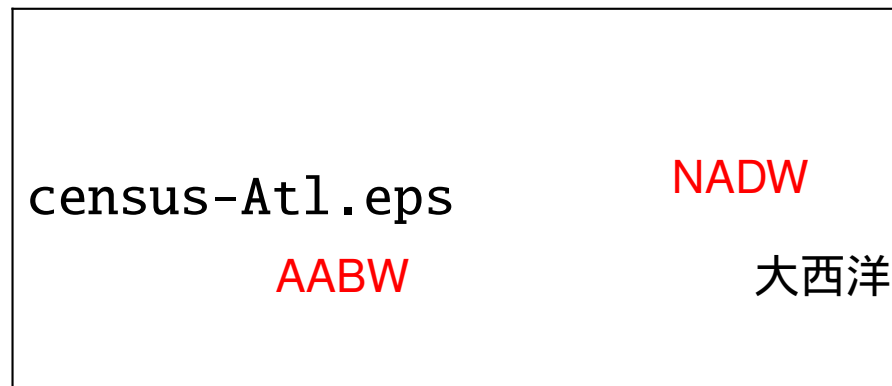
上層には, 塩分の低い中層水が分布

中層水の下側は, 南極周極流の下の冷たく, 塩分の高い水が北上

北太平洋では上層からの沈降はない

# 深層水の体積分布

データが全域を網羅していないので、注意が必要.



- 大西洋
  - { 北大西洋深層水 (NADW)
  - { 南極底層水 (AABW)
- 北太平洋深層水 (NPDW) ピーク  
太平洋で中層の水と南大洋の水が混合した「もっとも古い水」



ポテンシャル水温

塩分

南太平洋では, 海の西側 (ニュージーランド沖) を深層水が北上

北太平洋では, 水温・塩分はほとんど一様 コア・レイヤー法は難しい

水は特定の場所でしか沈まない  
北大西洋, 南極周辺

Fig2-8-2.eps

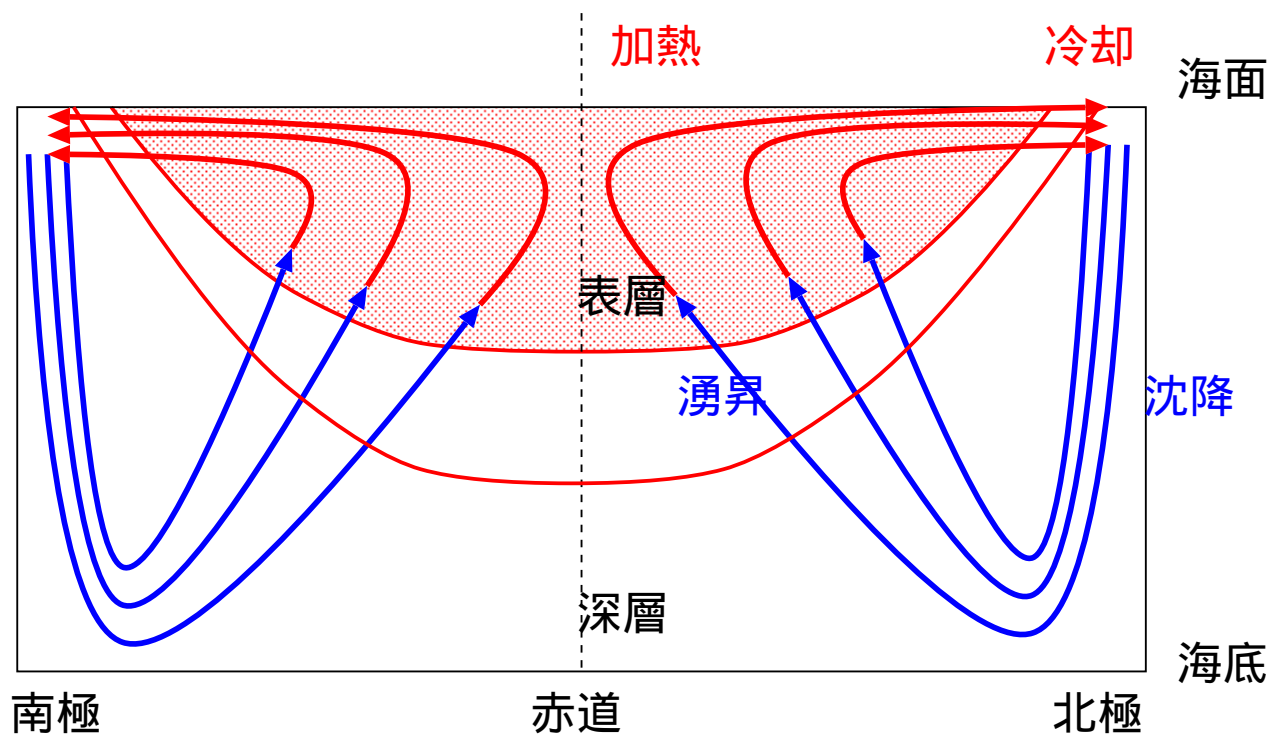
Schmitz (1996)

SLW	Surface Layer Water	NADW	North Atlantic Deep Water
SAMW	Subantarctic Mode Water	UPIW	Upper Intermediate Water, $26.8 \leq \sigma_{\theta} \leq 27.2$
RSW	Red Sea Water	LOIW	Upper Intermediate Water, $27.2 \leq \sigma_{\theta} \leq 27.5$
AABW	Antarctic Bottom Water	IODW	Indian Ocean Deep Water
NPDW	North Pacific Deep Water	BIW	Banda Intermediate Water
CDW	Circumpolar Deep Water	NIIW	Northwest Indian Intermediate Water
ACCS	Antarctic Circumpolar Current System		



# 熱対流の模式図

- 高緯度の海面の水が冷却され, 下より密度が大きくなる (不安定成層)
- 表層の水が海底まで沈降する (上下に水が混ざる) … 鉛直対流
- 赤道方向に流れながら表層へ湧昇する



- 沈降は, 海面で最も密度が大きいい点で起きる
- 湧昇は, それ以外の広い範囲

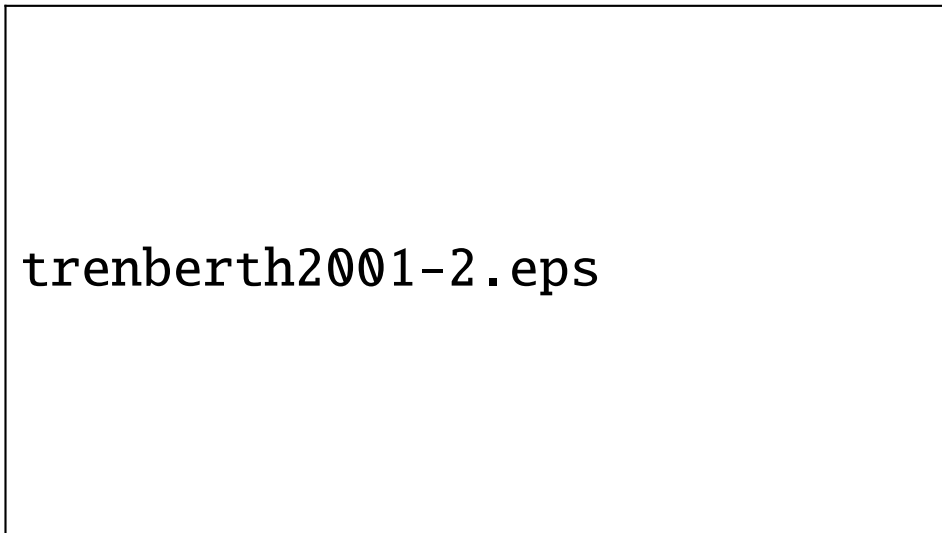
ポテンシャル温度は保存量なので, 亜表層では混ざらないと変化しない

- 水が温まる 熱が拡散によって下向きに伝わっている
- 水温が定常 上からの拡散による熱が下から湧昇する冷たい水を温める

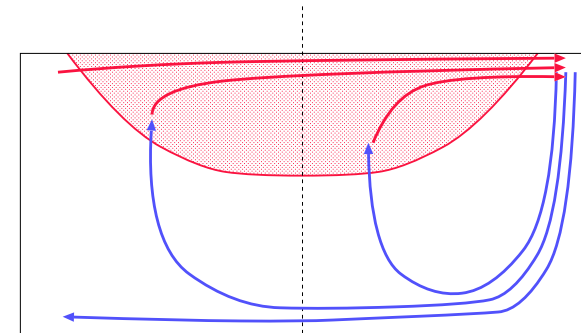
熱塩循環 … 海水の密度が場所によって異なるために生じる循環

- 密度差の原因は, 主に海面での熱フラックス (低緯度で加熱, 高緯度で冷却) の違い. ほかに, 蒸発・降水による塩分の違い
- 熱フラックスの差を解消するために海洋が熱を運ぶ (低緯度から高緯度へ) 気候にとって重要

海洋による北向きの熱輸送 (Trenberth *et al.*, 2001)



南大西洋では NADW が南下するため, 熱は北向きに運ばれる



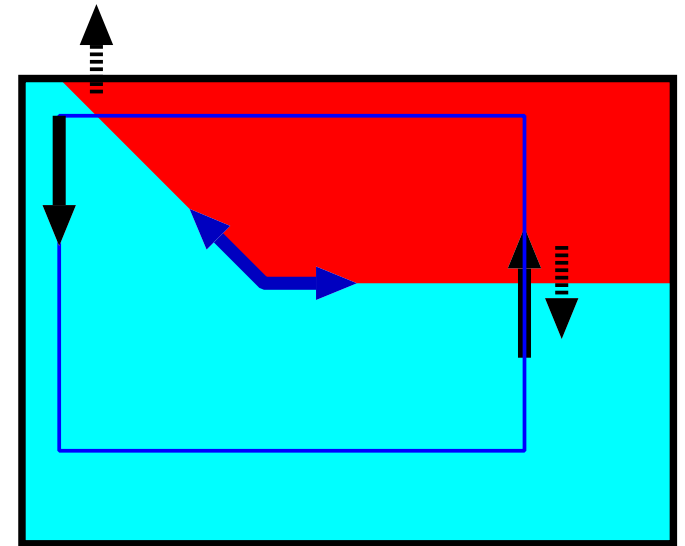
- 表層と深層で逆向きの流れ.  
流量は同じだが, 水温や塩分が異なる

熱輸送

深層循環 = 熱塩循環 (の下部)

浮力 = 密度 水温・塩分

- 水温・塩分が変化しない限り,  
水は等密度面上を流れる (あるいは海底上)
- ポテンシャル水温の変化 熱輸送



## 駆動のメカニズム

- 極域で冷却され, 重くなった表層水が沈む (沈降) … push  
新しい深層水の形成  
海面の温度差が重要 「太陽」が深層循環を作る
- 上層からの拡散で温められて, 軽くなった深層水が浮かぶ (湧昇) … pull  
深層水が上層の水と混合して変質  
拡散 … 潮汐によって水が混ぜられる 「月」が深層循環を作る
- どちらが原因で, 結果かは言えない

## 湧昇の大きさ

push 沈降量  $30 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  を深層の面積  $3 \times 10^{14} \text{ m}^2$  で割る

$w = 10^{-7} \text{ m/s}$  (Stommel, 1958) (約8mm/日, 約3m/年)

pull 太平洋深層の水温と塩分で, 鉛直方向の移流と拡散がつりあう

$w = 1.4 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  (Munk, 1966)

風によるエクマン湧昇流の1/10程度 表層では風による流れが支配的

おおざっぱに計算すると …

- 平均水深4000mとして, 海底から海面まで動く時間  
 $4000 \div 10^{-7} = 1270$ 年 (海底  $w=0$  を考慮すると, 2540年)  
深層の体積を沈降量で割っても同じ (置換時間)

- 南極周辺で沈む水 … 結氷温度, 低塩分, 特に高密度 (底層水)
- 北大西洋で沈む水 … やや低温, 高塩分, やや高密度 (深層水)

北太平洋は, 北大西洋に比べて, 塩分が低い 表層水が沈まない

一般に, 密度を決める場合, 塩分は水温ほどは重要でない. ただし, …

- 水温は-2度よりも低くならない (凍るから. 氷は浮く)  
低温付近では, 塩分が重要
- 海面水温にはフィードバックがかかるが, 塩分にはかからない  
多重解 … 同じ条件でも, 循環が一つには決まらない  
過去の履歴が重要