

深海科学概論 深海の物理 第2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

2010/6/18

最終更新日 2013/10/2

水塊による深層循環研究

水塊 (water mass, 水温・塩分の関係が等しい水の集まり) 水型 (water type)
↑ 同じ起源を持つ水 (同じ海域で沈んだとか, 同じ水塊が混合したとか)

近代的な記述は20世紀以降 (ドイツのMeteor号: 1920年代)

表層も含めて, 1942年の Sverdrup らの「The Oceans」におおむね記載

- 定量的評価 (流速や流量の大きさ) があいまい
- 水塊が一様だと難しい… 北太平洋など
- 時間変動や局所的な構造が不明

仮定 { 海底は平ら (本質的ではない仮定), 深層は1層のみ
2箇所 of 局所的な沈降と, その他すべてで一様な湧昇

stommel.eps

コンベア・ベルトが登場する前はよく使われた模式図

- 各大洋の西側に強い流れがある (西岸境界流)
- それ以外では, 極向きの流れ (内部領域)

fujio@aori.u-tokyo.ac.jp

- 水柱は引き伸ばされると, 極側に動く (縮められると, 赤道側に動く)
(ただし, ほかに力がかからない場合)

↑ Sverdrup バランス (ポテンシャル渦度の保存)

地球自転による角運動量が保存するため

深層では水は引き伸ばされる (湧昇しているため)

→ 水は極側に動く

流速は湧昇速度による (ほか, 緯度, 水深など)

- すべての水が極向きに動くと, 赤道側の深層水が無くなる

→ どこかに赤道向きの流れが必要 … 深層西岸境界流

↑ まさつが働くので, Sverdrupバランスにならない

西岸境界流の向きや流量は, 沈降する水, 湧昇する水, 内部領域の流量とのバランスで決まる

定常状態が仮定される

StommelArons-1.eps

Stommel (1957) による大西洋の循環の模式図

風成循環 (上層のみ)

熱塩循環 (上層と下層で逆向き)

stommel1957-1b.eps

stommel1957-1a.eps

stommel1957-1c.eps

合成された循環

下層 = 深層循環
熱塩循環の下部

地衡流 … 圧力傾度力とコリオリ力がバランスした状態の流れ

- 北半球では高圧部を右に見る (低気圧 → 反時計回り)
- 赤道のごく近傍を除いて, 大規模な流れ (黒潮や深層流) は「ほぼ」地衡流

圧力 p の水平分布から地衡流 $u = (u, v)$ が計算できる

$$v = \frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad u = -\frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial y}, \quad f = 2\Omega \sin \phi: \text{コリオリ係数}$$

圧力は静水圧として, 海水の密度 ρ の鉛直分布から計算できる
ただし, 基準となる深さ z_0 での圧力 (あるいは流速) が必要

$$p(x, y, z) = \underbrace{p(x, y, z_0)}_{\text{積分定数}} + \int_{z_0}^z \rho(x, y, z') dz'$$

無流面の仮定 … どこかに地衡流ゼロの深さがある (圧力が水平に一定値)
その深さを基準面にすれば, 地衡流の大きさが計算できる

- { 表層では, 深層に無流面を仮定してよい (深層の流速分が誤差となる)
深層では, 水塊の上下の境目に仮定する (NADWとAABWの間など)
無流面があるとは限らない (海底まで同じ向きに流れる)

インバース法 … 保存則を使って, 基準深度での流速を推定

- フロート (SOFARは, 音を出し, RAFOSは音を聴く)
- 係留流速計 (海底からロープを立ち上げて, 流速計を海中に固定 ← 係留系)

measure.eps

海の環境
100の危機

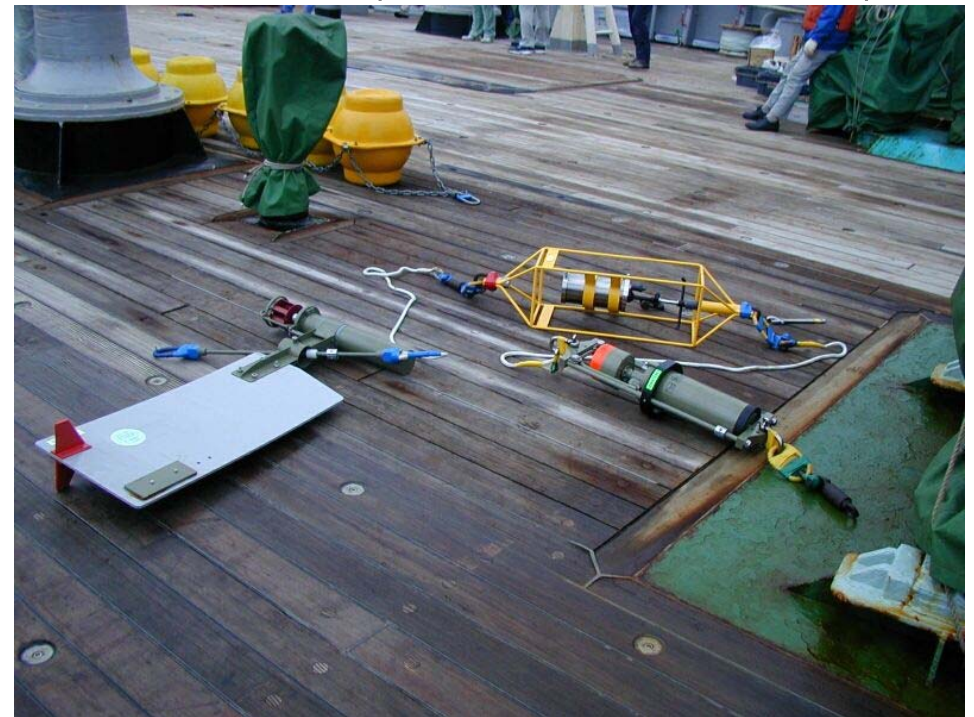


深海係留

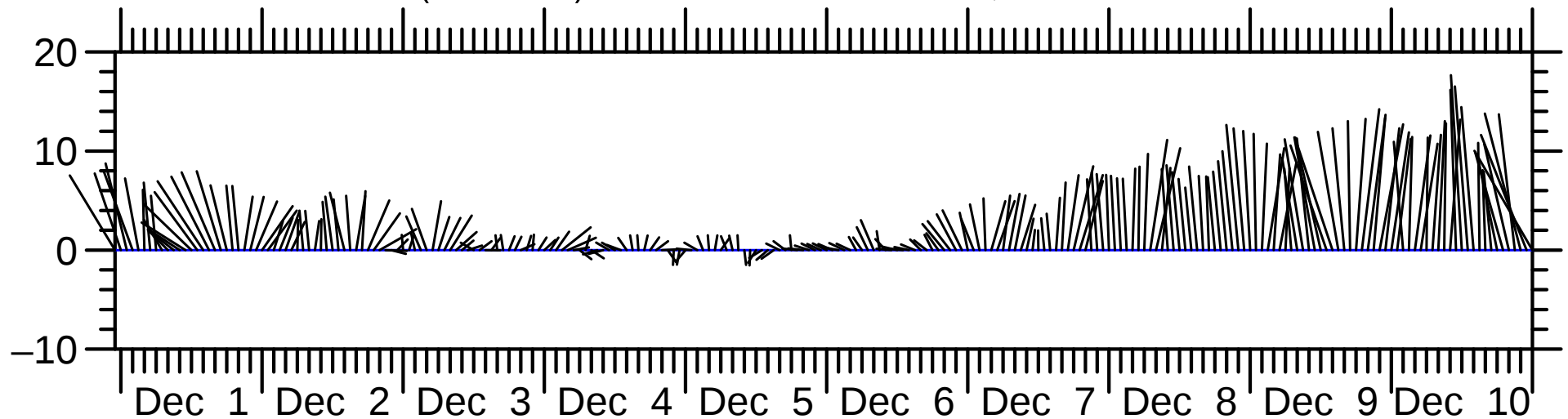
- 系の全長は数千m以上 (富士山以上)
- 高水圧・長期 (1 ~ 2年) に耐える

← 設置風景

↓ 流速計各種 (ローター式, 音響式)



1時間毎の計測結果 (10日分) … 計測深度4300m, 水深6000m

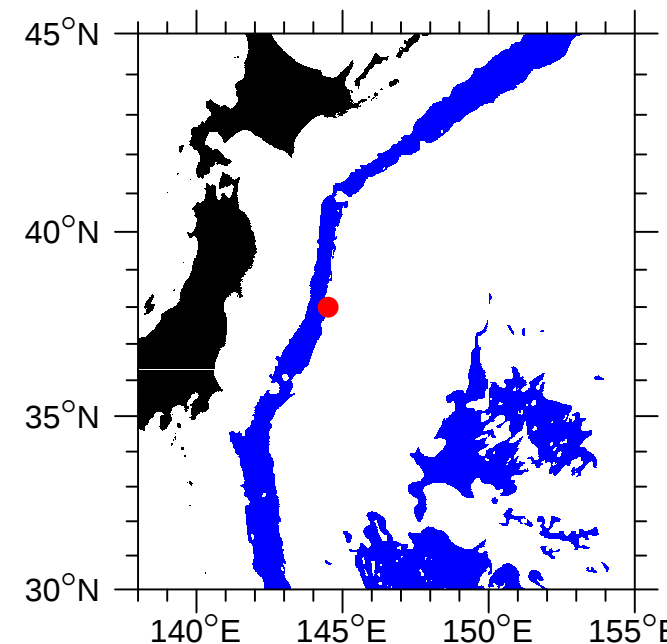


スティック・ダイアグラム … 図の上が北向き.
(流速ベクトルをずらしながら書いた図)

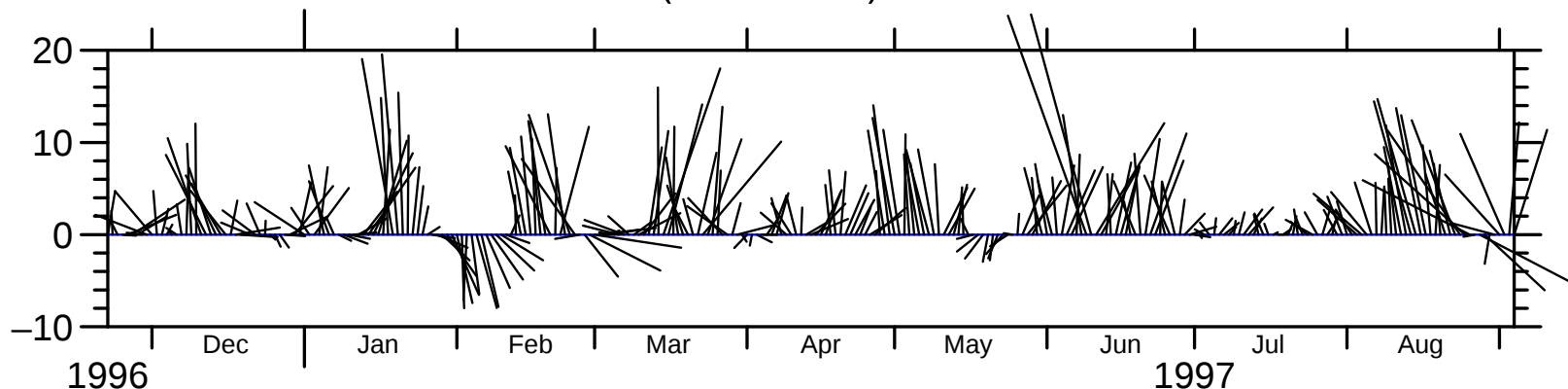
- 1日以下 … 潮汐成分, 慣性振動
- 流速には, それ以上に大きな変動がある

一般に, 北太平洋の深層流は,

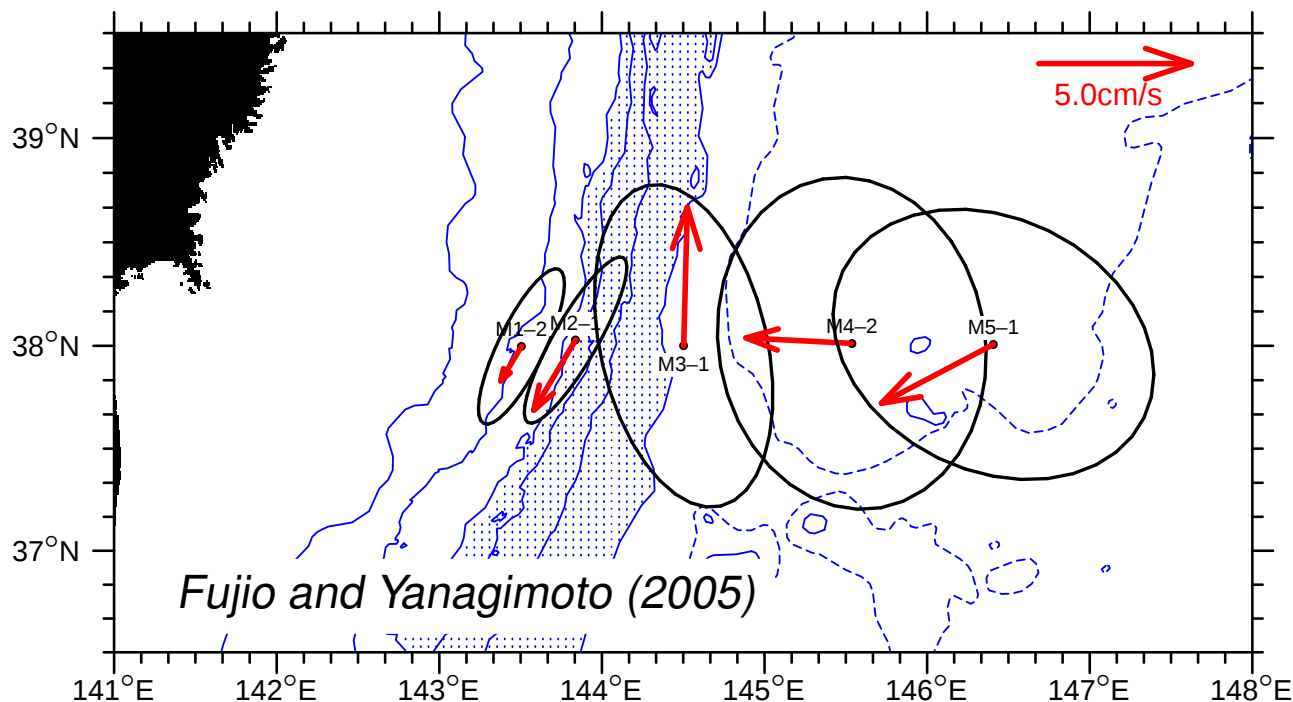
- 海底でもっとも強く, 浅いほど弱い(2000m以深)
- 流向は深さによらない



1日ごとに平均した時系列 (9ヶ月分)



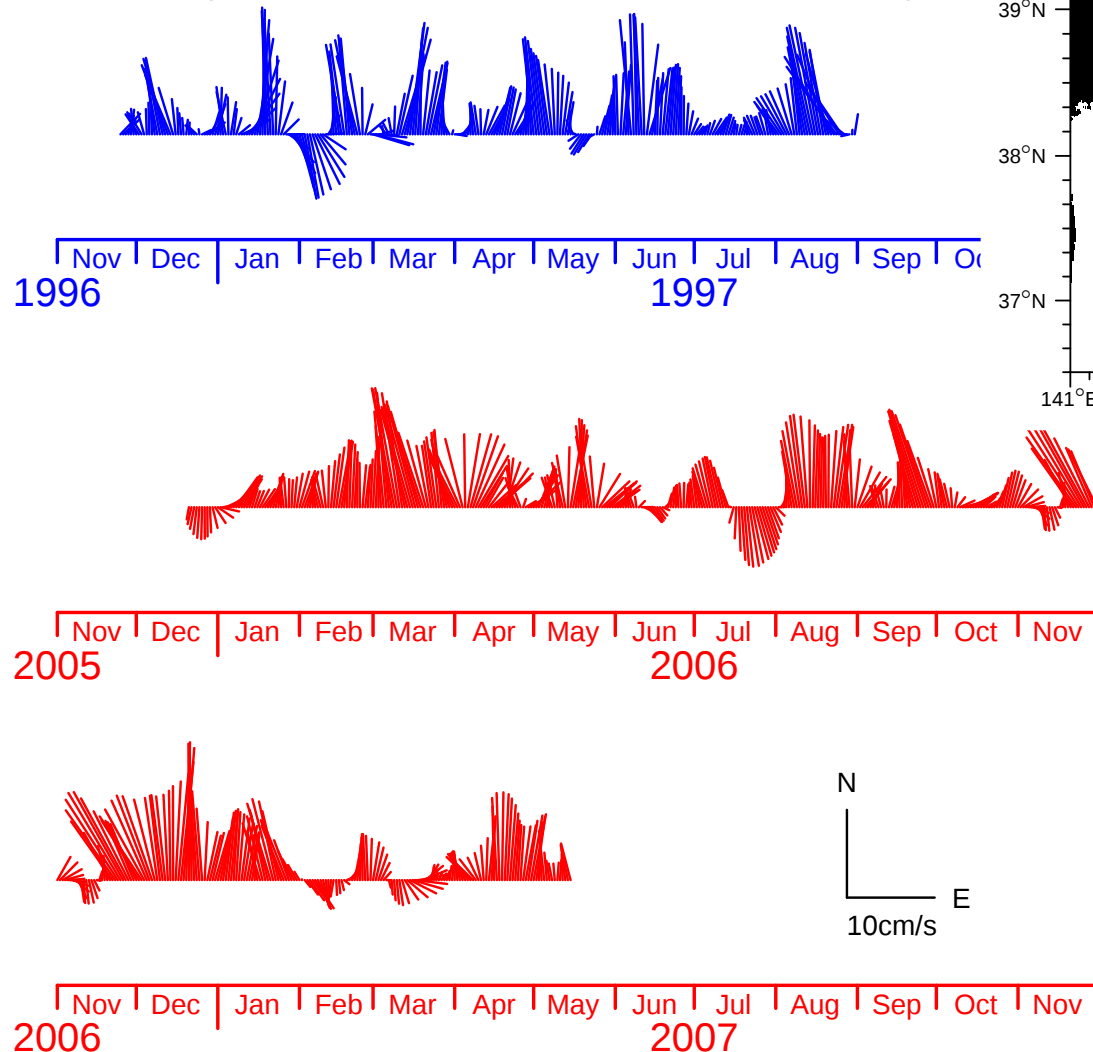
平均流速 (矢印) と標準偏差 (楕円) … 上の時系列は M3-1



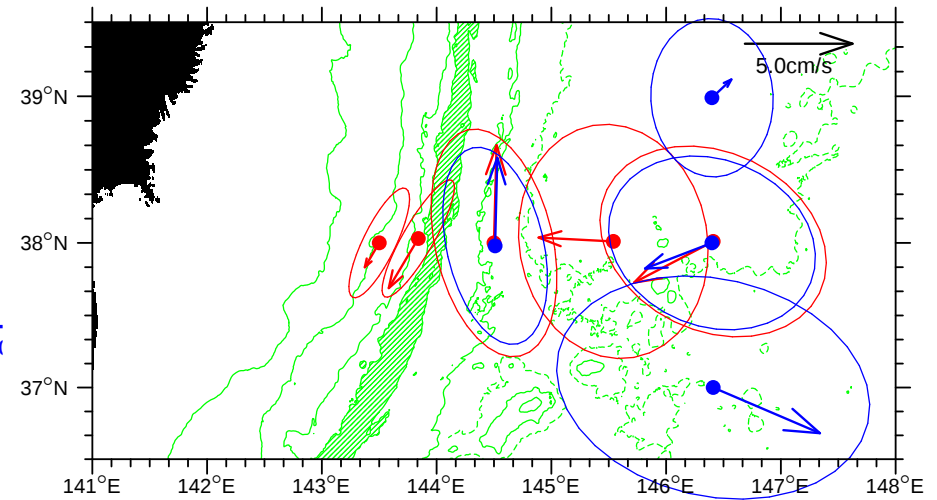
- 最大流速は20cm/s以上
- 平均すると 5cm/s 程度

長期間の計測が必要
→ 信頼できる観測は
1970年代以降

時系列 (日本海溝東斜面上 6000m深)



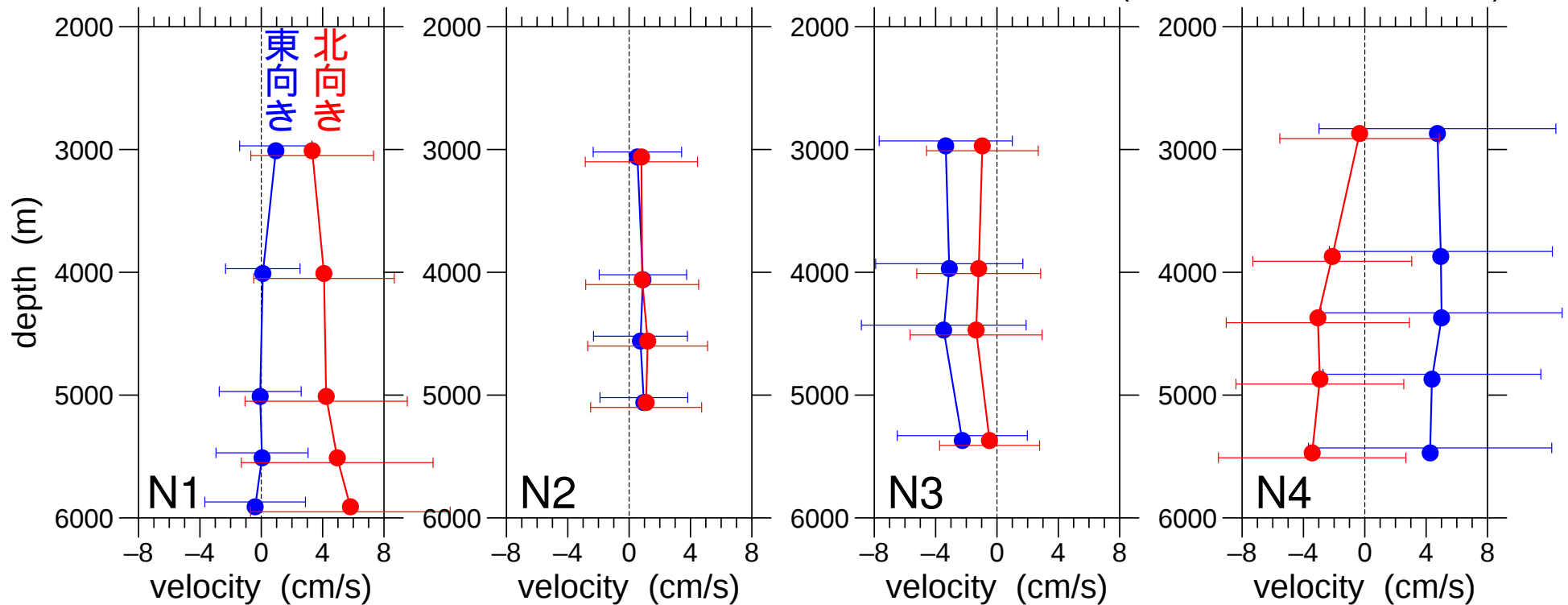
期間平均流速



9年後にほぼ同じ位置で測定した流速の比較

- 流速変動に季節性はない
- 平均流には経年的な差はない
- $5\text{cm/s} = 4.3\text{km/日}$
 $= 1500\text{km/年} = \text{緯度}15\text{度/年}$
 (場所による違いがない場合)

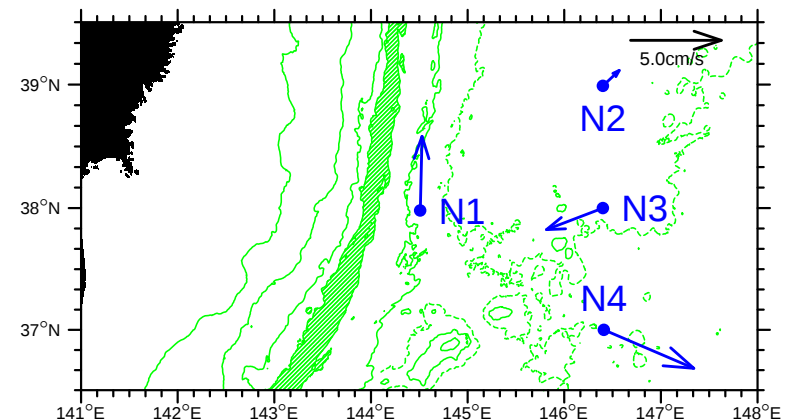
北向きと東向きの流速成分の平均流速と標準偏差 (少し上下にずらす)



北太平洋では、
深層の流速は深くなるほど大きくなる傾向
(密度差により海底上を流れるため)

深いほど流れが弱いわけではない

時間変動の大きさはそれほど深さによらない



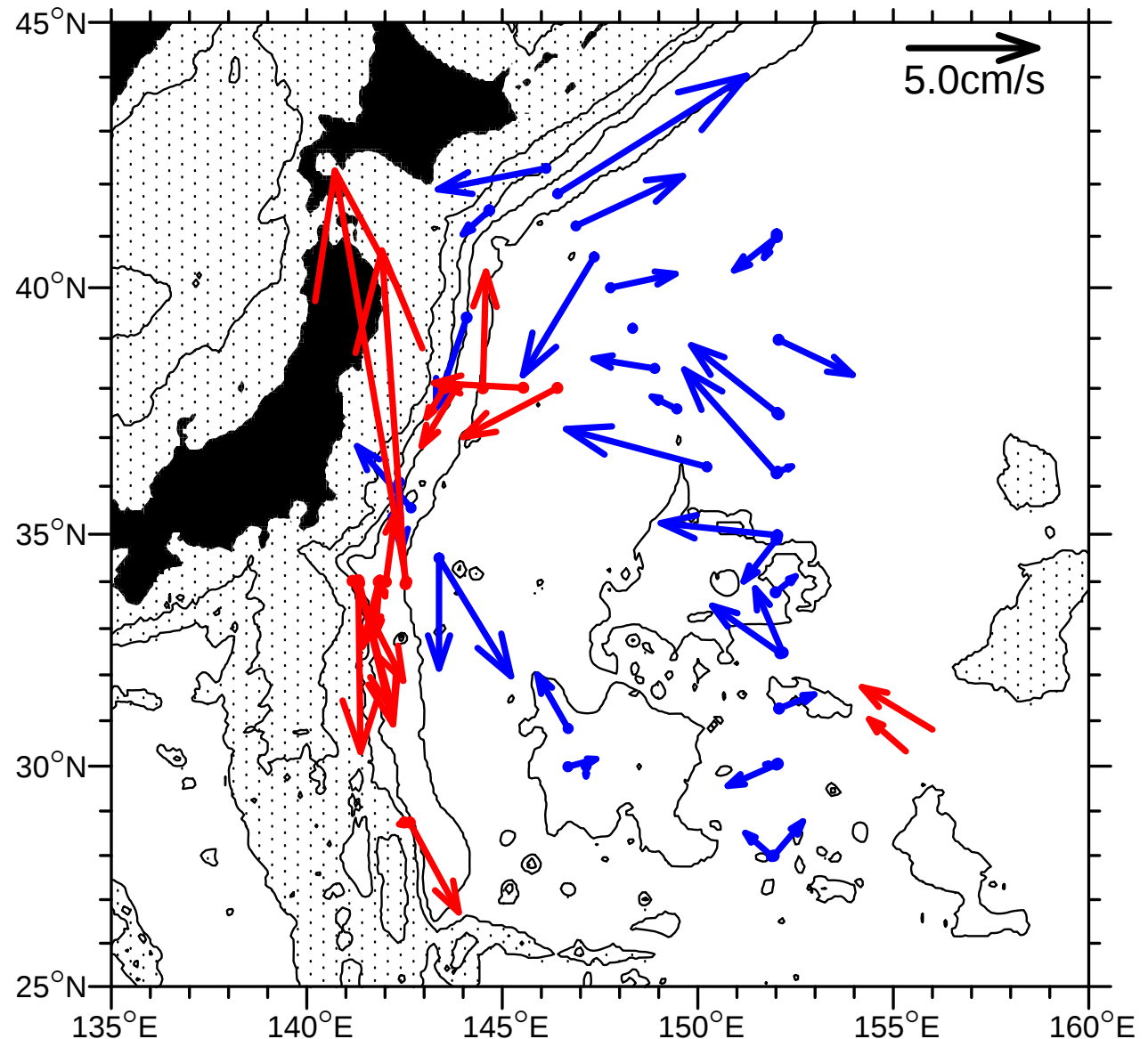
日本東方における平均
流速 (4000m付近)

赤:海洋研, 青:その他
半年以上の計測期間.
観測時期は異なる.

- 場所や時期による違いが大きい
- 黒潮続流の下層では 20cm/s以上
- 海溝部分に逆向きの流れ

古典的な循環像と大きく異なる

水塊の特性からは, 流れはよくわからない



Hogg and Owens (1999) によるブラジル海盆の観測

Hogg1999-1a.eps

平均流速と標準誤差楕円

Progressive vector (進行ベクトル)

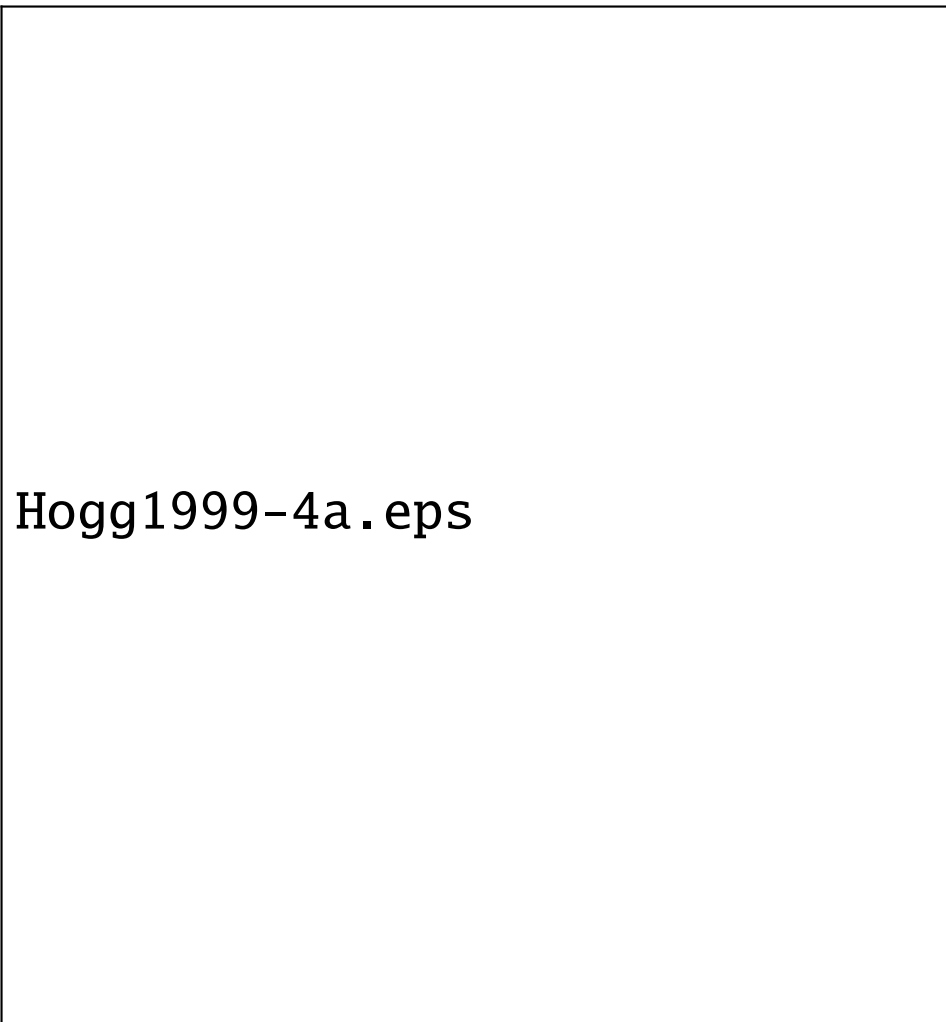
西岸域で流速は数cm/s. 観測は最長2年

Hogg1999-2.eps

Hogg1999-3.eps

スティック・ダイアグラム
(日平均流速, 上が北)

- 182: 最大で 30cm/s
(期間平均すると, 2cm/s弱)
- 非常に大きな流速変動
周期は2ヶ月以上



Hogg1999-4a.eps



Hogg1999-4b.eps

始点と終点を結んだもの

途中の軌跡 (一部のフロート)

800日 (2年強) → 平均流速は 1cm/s ならば, 緯度で約6度動く

Wunsch (2001): 「海洋大循環の文献は「多重人格障害」に悩まされている」
深層循環に限った話ではないが

1. 記述的海洋学者の古典的海洋 (← 水塊分析)
Broeckerのコンベヤベルトは, 風刺画 (caricature)
2. 解析的理論屋の海洋 (← Stommel-Aronsモデル)
3. 観測屋の変動の大きい海洋 (← 直接測流)
4. 高解像度数値モデル屋の海洋 (← 数値シミュレーション)

WOCE: World Ocean Circulation Experiment (世界海洋循環実験)

→ 人格の統合を目指す

{ 歴史的パラダイム … 海洋は変化しない, 大規模な構造
{ WOCEパラダイム … 海洋は常に大きく変動, 微細な構造

歴史的パラダイムは, 単純で低コストで, 受けがよい.

しかし, 間違っているならば (おそらく間違い), 気候の理解には危険

Broecker (1987)

および, 多くの改変図

コンベアーベルトは, 海洋大循環の特徴の一部を取り出した模式図であり, 現実の循環を表してはいない

img081a.eps

間違った理解

(誤解を招きやすい)

- 太平洋から大西洋に深層水は流れない (ドレーク海峡を通過しない)
- 太平洋の深海の水は, グリーンランド沖で沈んだ水
- 太平洋の海面の水も, グリーンランド沖で沈んで, 太平洋でわきあがった水
- グリーンランド沖の沈み込みが止まると, 湾流が止まる

Fig2-156.eps

数字は流量 ($10^6 \text{m}^3/\text{s}$)

いい加減なところも多いが, 正確にしようとする, 見栄えが悪くなる
fujio@aori.u-tokyo.ac.jp

深さ4000m
循環図

J. L. Reid

Progress in Oceanography

1994年: 大西洋

1997年: 太平洋

2003年: インド洋

Fig-5k-1.eps

等圧線 (地衡流線)

- 水は線に沿って矢印の方向に流れる
 - 線の間隔が狭いほど流速が速い
- ただし, 緯度に依存

今回のまとめ

深層循環の理論

Stommel-Arons モデル (定常状態が前提)

- { 内部領域 … 湧昇とバランスする極向きの流れ
- { 西岸境界流域 … 内部領域を補償する流れ (どちら向きもある)

深層流の直接観測

古典的手法: 水塊分析と地衡流計算を組み合わせる

↑ 水がよく混ざった状態では, 水温・塩分の分布は役に立たない

1970年代以降, 直接測流が可能 ← 係留流速計, 中層フロート

↓ 新しい循環像

- { 時間変化が大きい (表層と同じくらい)
- { 場所によって流速が大きい (海底地形の影響)

きわめて活発な流れ 古典的なゆるやかな流れ

- 単純な時間平均, 空間平均で, 両者が一致するのか?
- 将来の予測に危険はないのか? (バランスが崩れる場合)

レポートの課題と提出について

課題

海洋の深層循環が現在の気候の維持に果たしている役割について述べ、もし深層循環が弱まったら (深層水の形成が少なくなったら), 気候はどう変わると予想できるか考察せよ.

分量

A4で1枚程度.

期限

7月2日まで