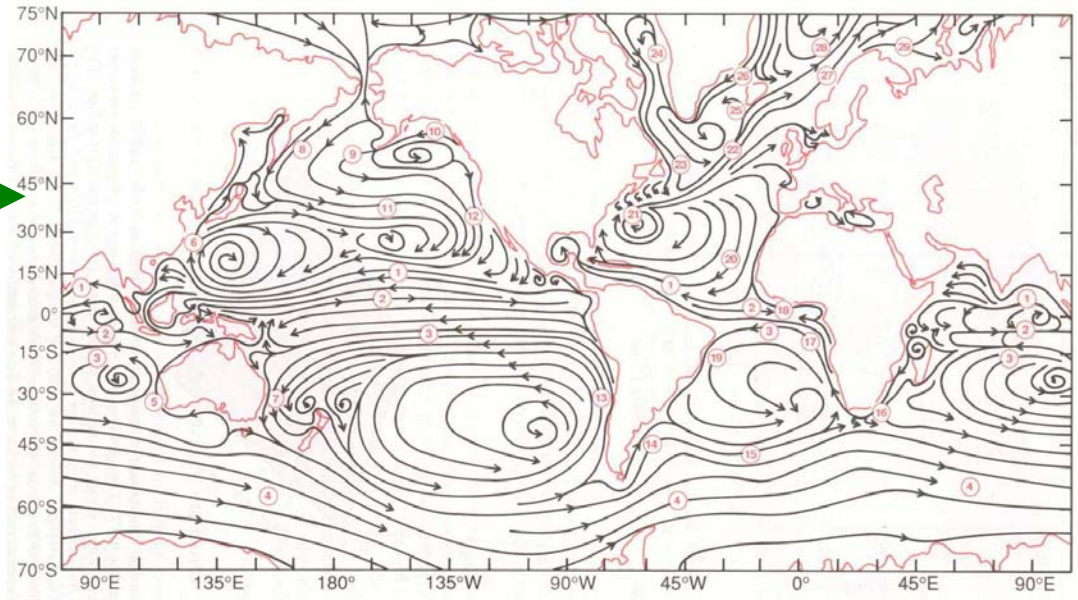
2013.12.15 **第5回 自動チューニング技術の現状と応用に関するシンポジウム**

海洋シミュレーションの現状・今後と自動チューニングへの期待

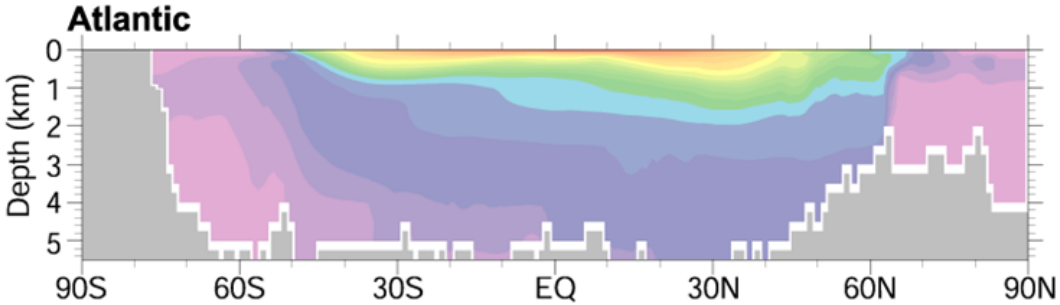
羽角 博康
東京大学大気海洋研究所

海洋の大規模循

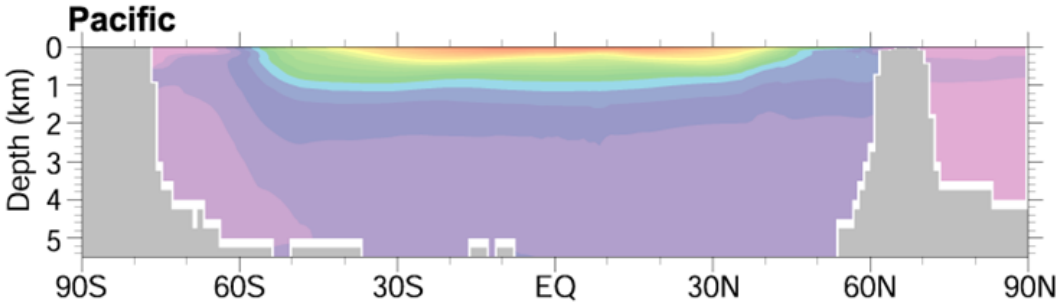
海流（よく見るこんな）➡
- 海上風が原因
  （風成循環）
- 深さ 0~500 m 程度に限定
  ← 温度躍層の存在
  ← 深層循環の存在



大西洋



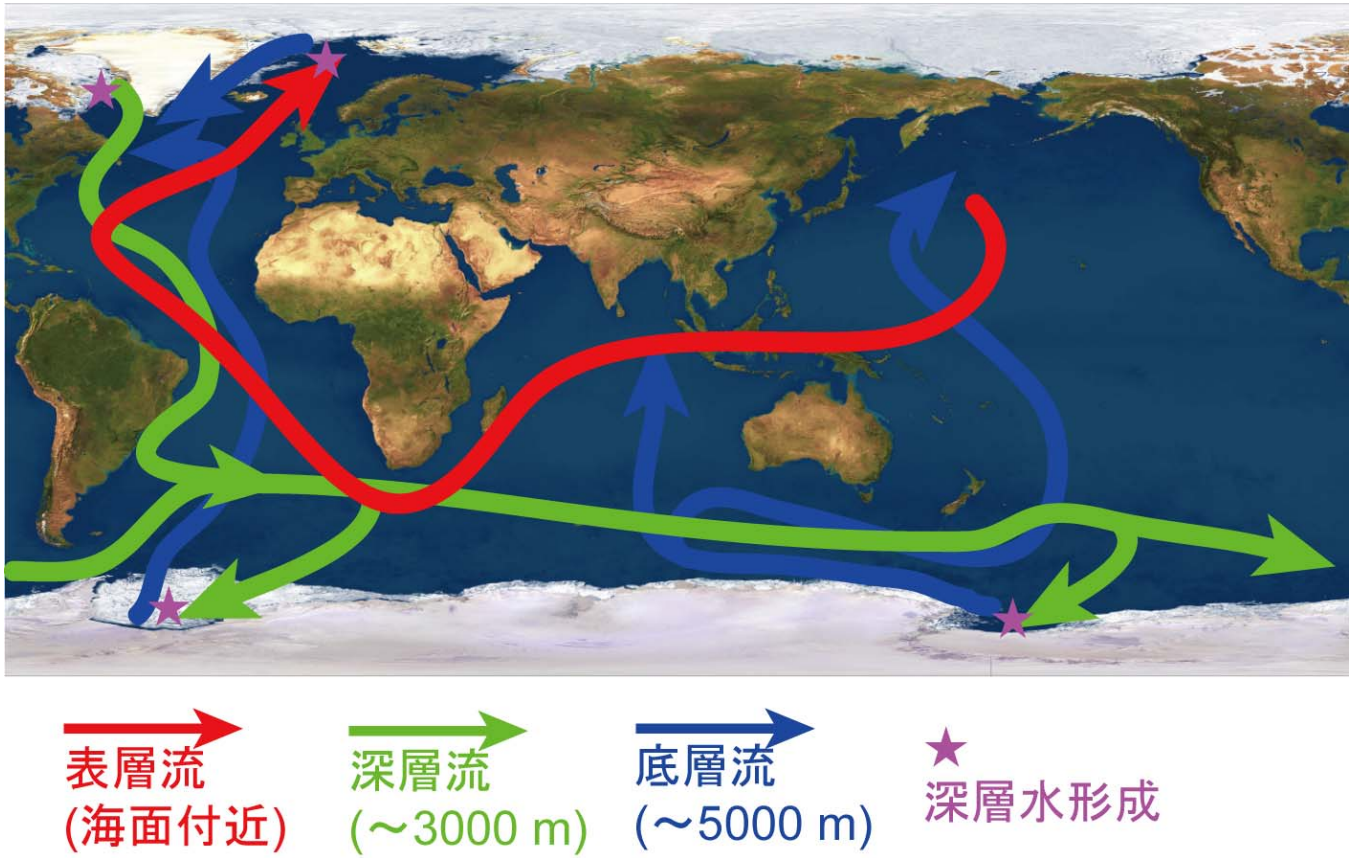
太平洋



東西平均水温

海洋の大規模循

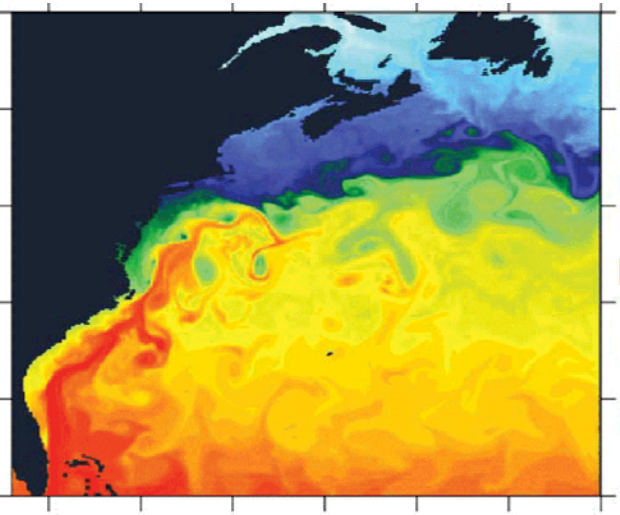
深層循環（深層海流）
- 海水密度差が原因　（熱塩循環）
- 海面から海底までにわたり全大洋をつなぐ、最大規模の海洋循環 → 全球規模熱塩循環



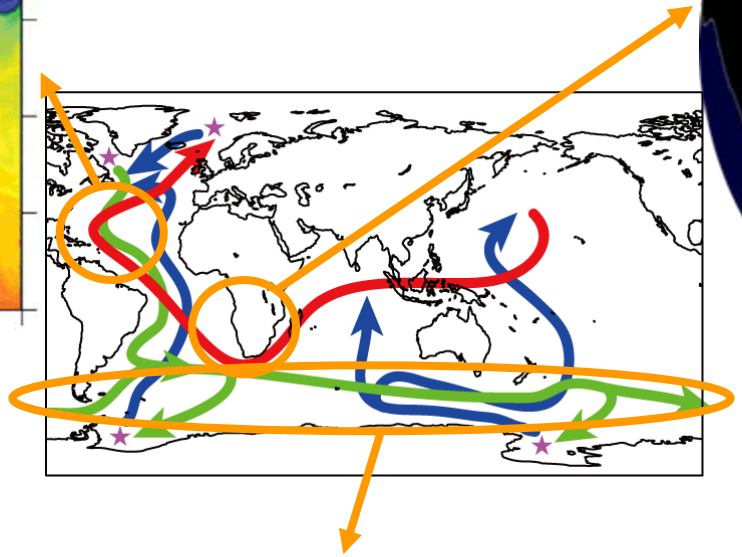
※ 表層ではこれに風成循環が重なる

全球規模熱塩循

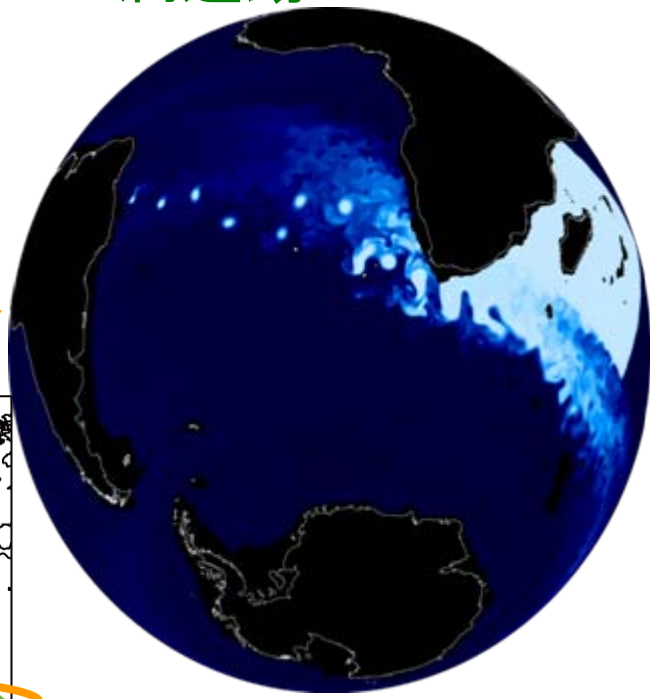
全球規模熱塩循環の経路の実態

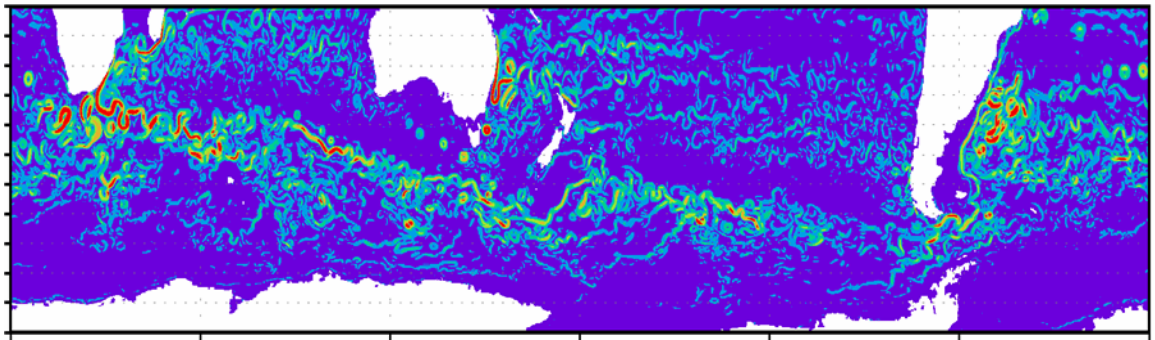


風成循環とも
一部重なる



O(10) km の
渦運動

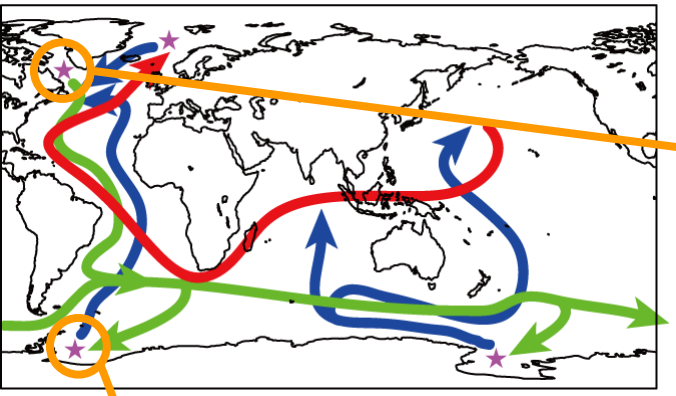


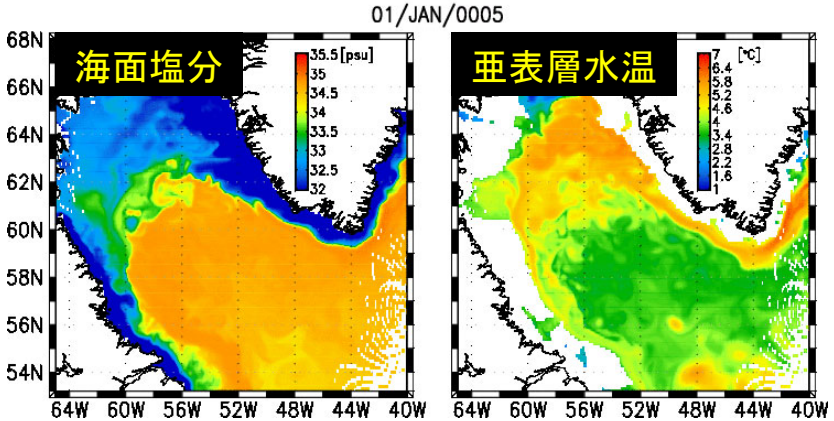


O(10) km 幅の
強海流(群)

全球規模熱塩循

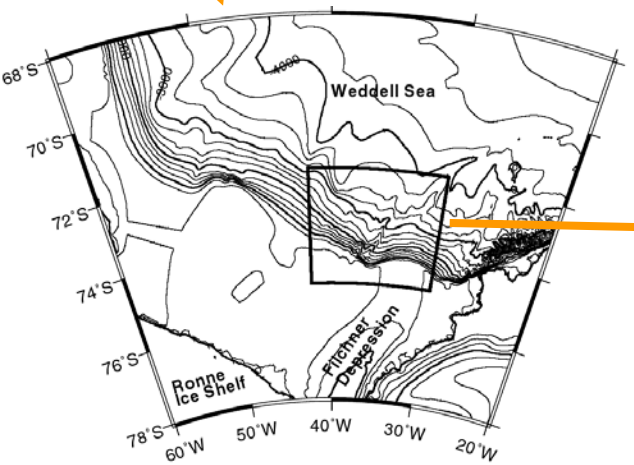
全球規模熱塩循環の始点: 深層水形成（高密度水沈降）

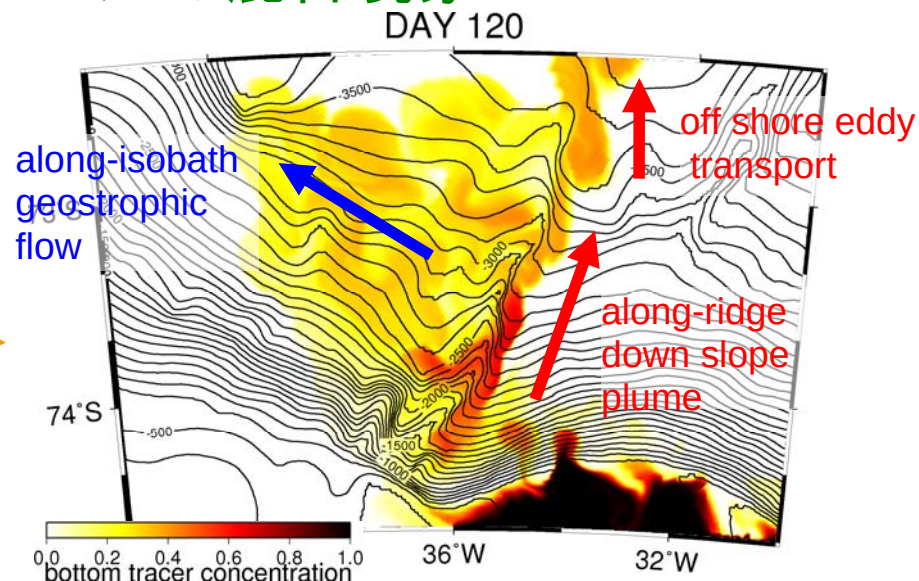




O(1) km スケールの流れや渦

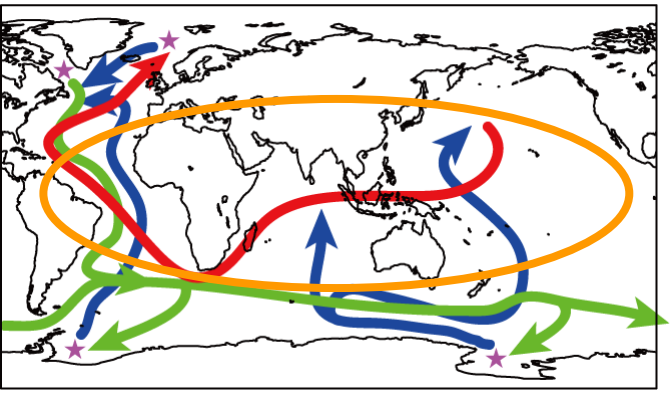
O(1) km >> スケールの混合現象



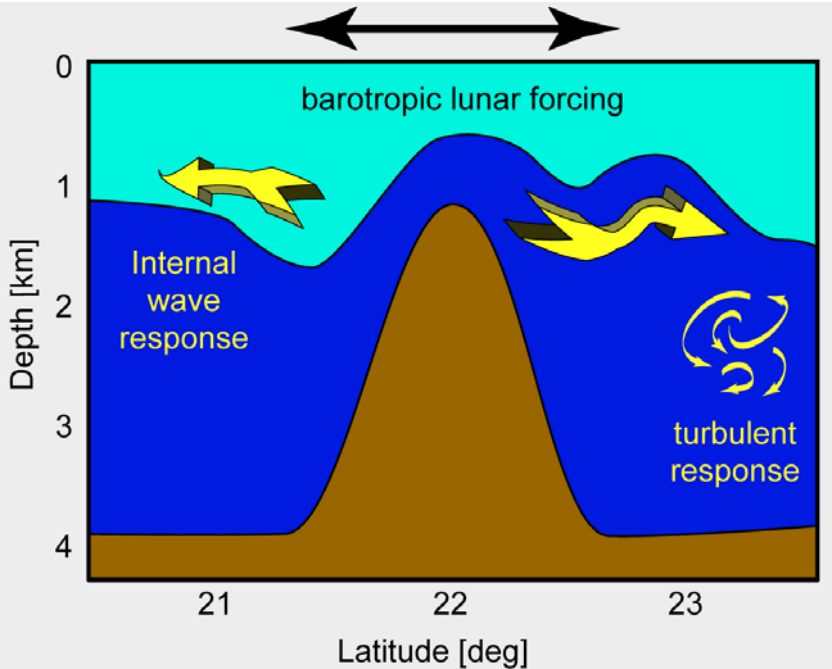


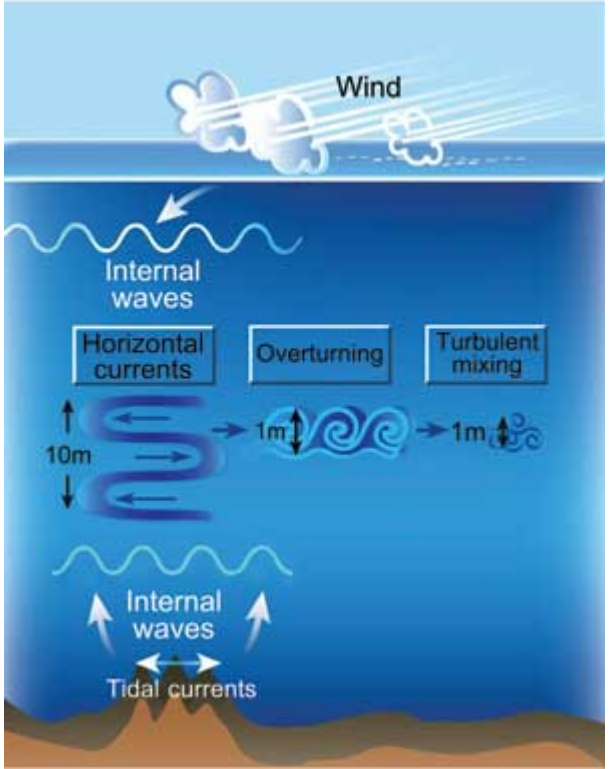
全球規模熱塩循

全球規模熱塩循環の終点: 乱流混合に伴う上昇



O(1) km スケールの内部波動
（成層流体中の波動）
↓ 砕波（地形・成層状態による増幅）
O(1) m 以下スケールの乱流混合





全球規模熱塩循

海洋循環のスケールレンジ

- 全球規模（~100,000 km）循環は、中小規模（10~100 km）の様々な構造からなると同時に、微小規模（1~1,000 m）過程にコントロールされる
- 微小規模過程の働き方は、全球規模循環が形作る大規模海洋場（温度構造など）にコントロールされる
- 空間スケールの違いは時間スケールの違いにも対応
  全球規模: ~1,000 years
  微小規模: ~1 day

→ 全部を一気に扱うシミュレーションは不可能

数値海洋モデ

基礎方程式系
- 運動方程式 ≒ Navier-Stokes（回転・粘性パラメータ化）
- 連続の式
- 輸送拡散方程式（混合パラメータ化）
- 状態方程式

を構造格子で有限差分するのが最も一般的

現象の典型的速度（Δt 制約要因）
- 音波 ~1,500 m/s
- 表面波動 ~200 m/s
- 内部波動 ~1 m/s ← 興味の主対象
- 流速 ~1 m/s（深層では ~0.1 m/s 以下）← 興味の主対象

数値海洋モデ

基礎方程式系

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}-fv+\overline{f}w=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+visc.$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}+fu=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+visc.$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}-\overline{f}u=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}-g+visc.$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho u)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho v)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho w)=0$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}=diff.$$

$$\frac{\partial S}{\partial t}+u\frac{\partial S}{\partial x}+v\frac{\partial S}{\partial y}+w\frac{\partial S}{\partial z}=diff.$$

$$\rho=\rho(T,S,p)$$

(x, y, z): 直線直交座標
(u, v, w): 速度
ρ: 密度
p: 圧力
T: 温度
S: 塩分

f: コリオリパラメータ
g: 重力加速度

数値海洋モデ

方程式系の近似による Δt 制約の緩和
-音波: 海洋循環という面ではたいてい不要

- 非圧縮近似
  → 圧力場の計算に 3 次元 Poisson
- 静水圧近似: >10 km の海洋現象に対しては妥当
  → Poisson は不要に

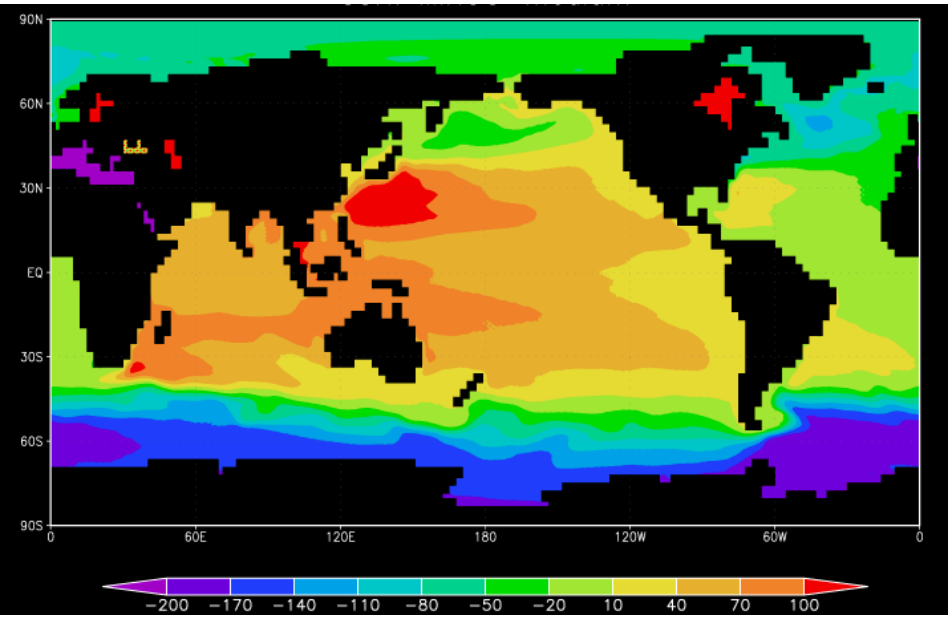
-表面波動: 大規模循環・構造では考慮不要の場合も

- Rigid-lid 近似（海面の昇降を許さない）
  → 海面圧力の計算に 2 次元 Poisson
- 鉛直モード分離（鉛直平均運動方程式を別建てして、 小さい Δt を適用）: 厳密に分離できず近似が入る
  → いろんな場面で技術的な面倒が増える

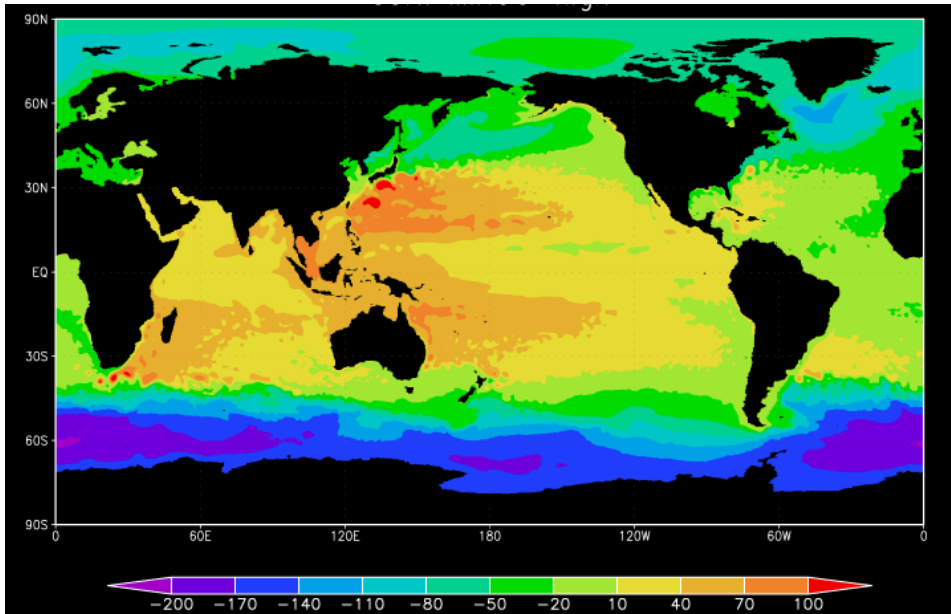
↓
従来はスケールごとに別の近似／モデルを用いたが、同時に扱うスケールレンジが広がり、スケール間相互作用が対象に

数値海洋モデル

扱うスケールレンジの変化: 全球規模シミュレーションを例に



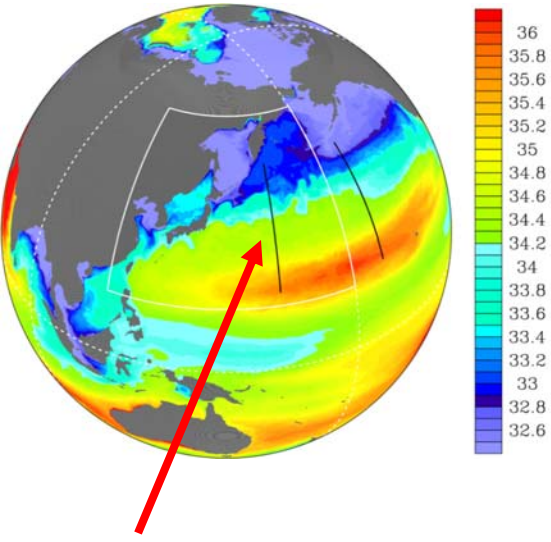
十数年前の普通
- 水平格子 > 100 km
- 中小規模以下はパラメータ化



いまどきの普通
- 水平格子 ~10 km
- 中規模現象との相互作用まで陽に扱う

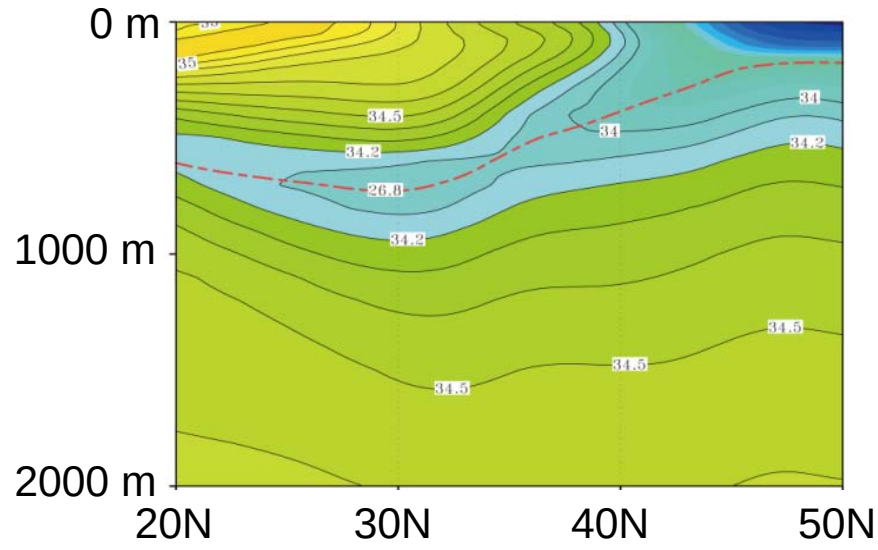
数値海洋モデル

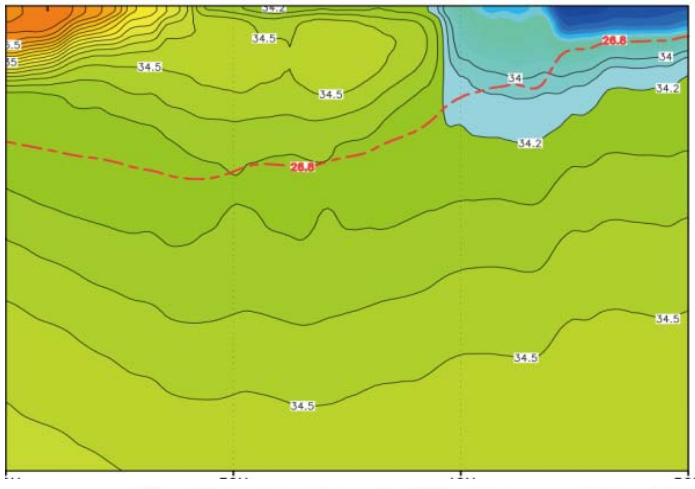
扱うスケールレンジの変化: 全球規模シミュレーションを例に

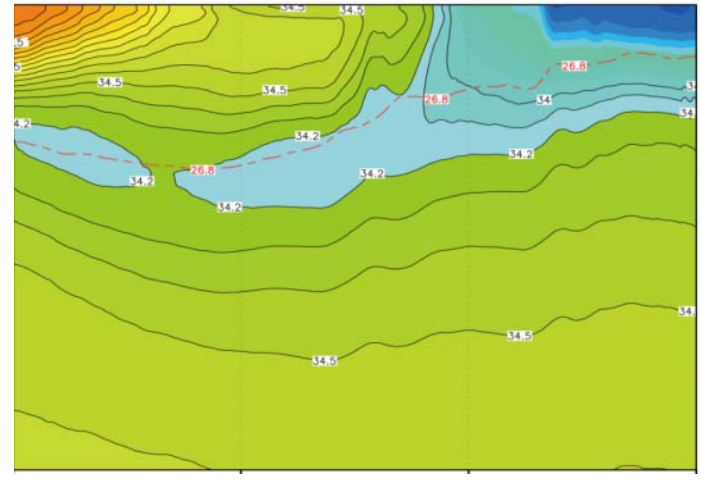


160E 塩分

	観測
50 km	10 km

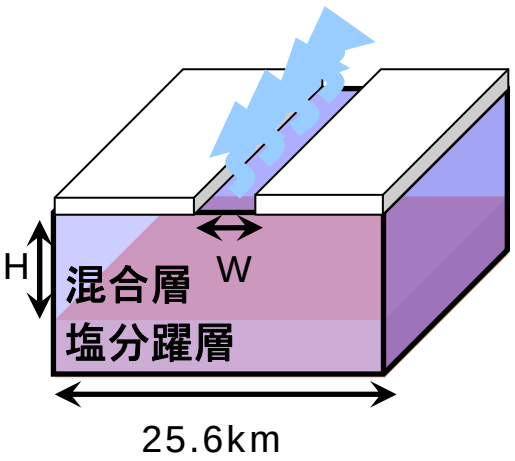


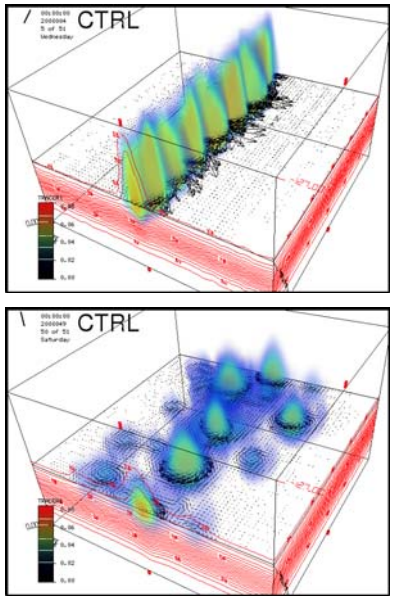




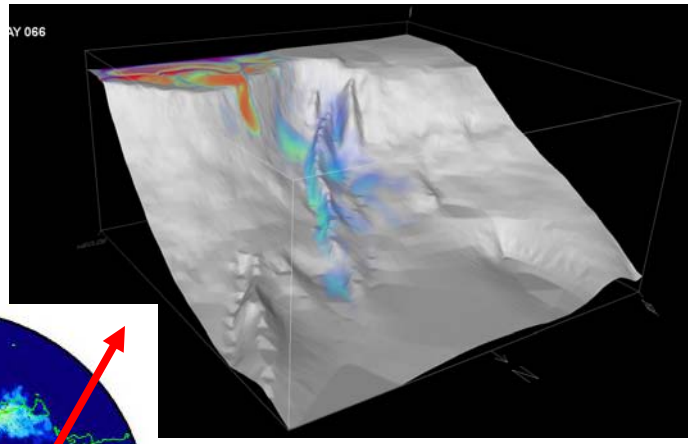
数値海洋モデル

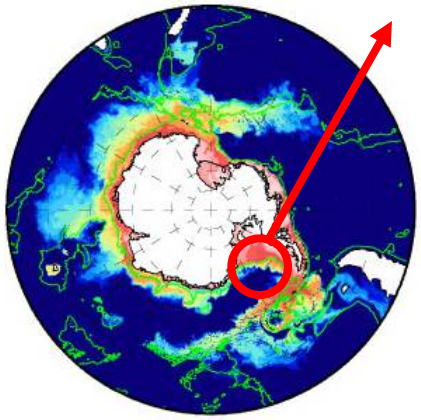
扱うスケールレンジの変化: 微小規模現象を例に





十数年前の最先端
- ~10 km の領域で理想化実験を行い素過程を研究
- LES を適用するが、前提等に不明な部分が大きい





いまどきの最先端
- ~1,000 km の領域で実際の現象を再現
- Dynamic LES など、より仮定が少ない手法へ

数値海洋モデル

数値計算上の特徴

- 基本は Δt 内では隣接格子（水平）とだけ相互作用
- 前述の近似の採用によって Poisson 方程式が現れる場合（のみ）、全領域におよぶ相互作用が発生
- 輸送（熱・塩分・その他溶存物質）方程式を高精度で解く要請が大きく、計算負荷が最も高い
- 並列化は主に水平領域分割
- 演算に必要なデータ量が多く、B/F が小さい計算機で実効性能が出にくい（海洋に限らず、連続体計算で一般に）
- I/O 頻度・量が大きい

計算効率

輸送方程式のチューニング (on HA8000)
- HITACHI自動並列 → OpenMP
- ループ順序入れ替え
- ループブロック化

```
DO N = 1, NTDIM
  DO K = KSTR, KEND
    DO IJ = IJSTR, IJEND
      T(IJ, K, N) = …
    END DO
  END DO
END DO
```

→

```
!$omp do private(K, N, IJ, …)
DO K = KSTR, KEND
  DO N = 1, NTDIM
    DO IJ = IJSTR, IJEND
      T(IJ, K, N) = …
    END DO
  END DO
END DO
```

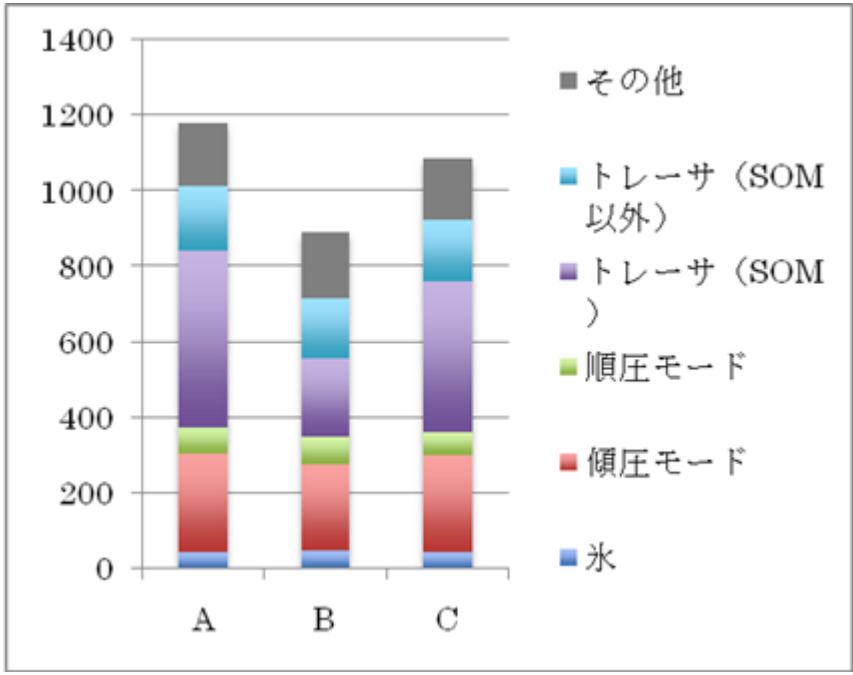
- K ループでスレッド並列
- 分割されていた IJ ループを融合
- N, K に依存しない変数(座標計量等)を使い回す

```
DO N = 1, NTDIM
  DO K = KSTR, KEND
    DO IJ = IJSTR, IJEND
      T(IJ, K, N) = …
    END DO
  END DO
END DO
```

→

```
DO N = 1, NTDIM
!$omp do private(IJ1, IJ2, IJ, K, …)
  DO IJ1 = IJSTR, IJEND, IBLOCK
    IJ2 = MIN(IJ1+IBLOCK-1, IJEND)
    DO K = KSTR, KEND
      DO IJ = IJ1, IJ2
        T(IJ, K, N) = …
      END DO
    END DO
  END DO
END DO
```

IBLOCK: 変数が L2 上にのるように設定



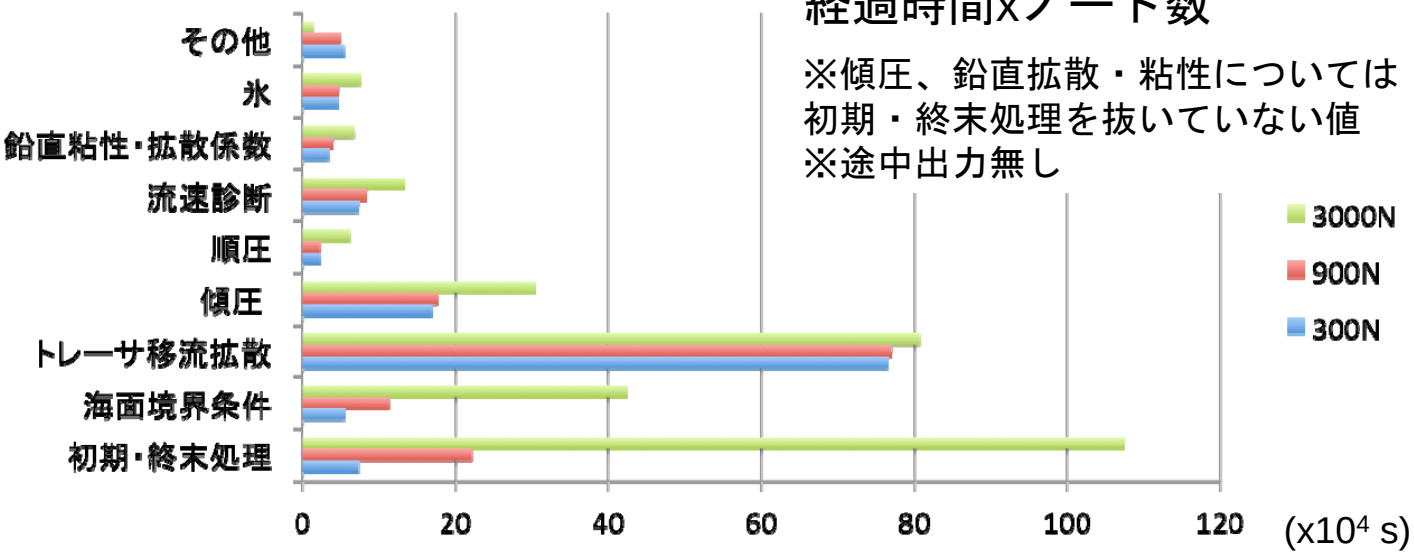
実行時間内訳
A: 自動並列
B: OpenMP ＋ キャッシュチューニング
C: 自動並列 ＋ キャッシュチューニング

計算効率

スケーラビリティー (on K)

3600x3300x100 格子
2700 ステップ積分における
経過時間xノード数

※傾圧、鉛直拡散・粘性については
初期・終末処理を抜いていない値
※途中出力無し



初期・終末処理, 海面境界条件 → I/O のせい
- 海面境界条件の読み込みは実行中に常に発生
- このテストでは中間出力は除外（海面境界条件よりも問題になる可能性大）

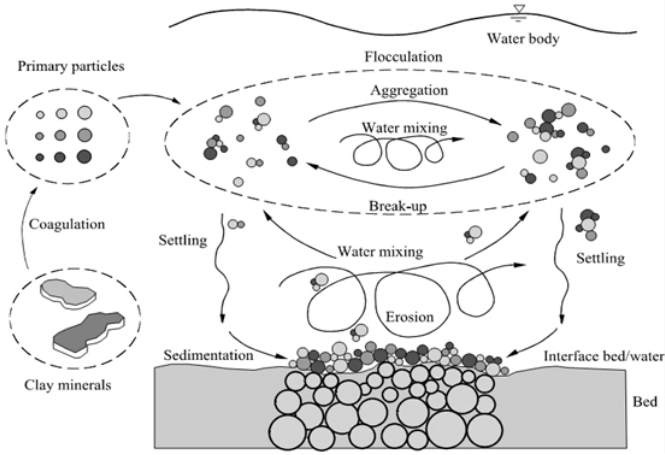
↓

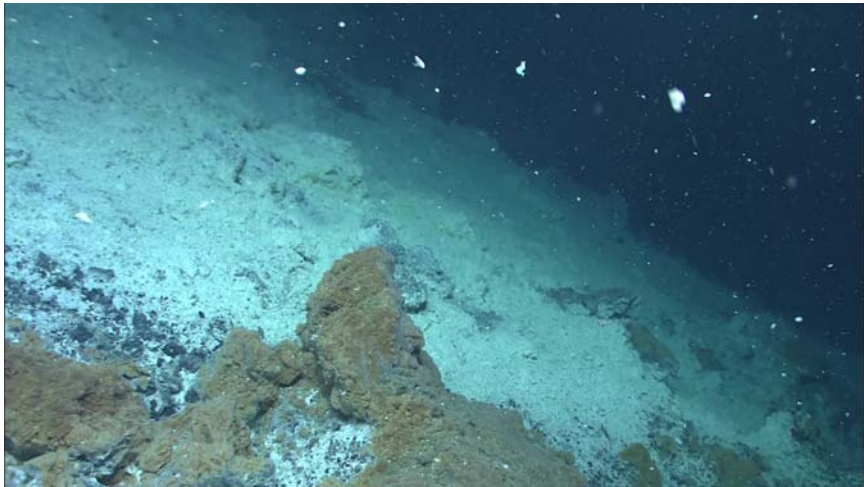
とりあえずは MPI-IO である程度回避しているが、使いにくい

海洋シミュレーションの応用

物質輸送シミュレーション
- 仮想トレーサ／粒子
  → 循環の可視化
- 溶存物質（微量）
  → 海洋環境・海洋汚染
- 粒子（懸濁／沈降／浮上）
  - 氷の結晶
  - ダスト・泥
  - 生物・有機物

→ Lagrange 的な粒子追跡が重要な手法





まとめ：海洋シミュレーションの現状・今後

扱うスケールレンジが広がったことにより、近似の少ない（≒計算効率の悪い）方程式に基づいて大規模・長時間のシミュレーションを行うようになってきた
→ 格子数／解像度の増加以上の計算負荷増加が伴う

でもまだ、興味のあるスケールレンジを一気に扱うことはできない
→ 異なる近似・格子系に基づくモデルの連結

トレーサ（仮想／溶存物質）や粒子の輸送シミュレーションの需要が高まっている