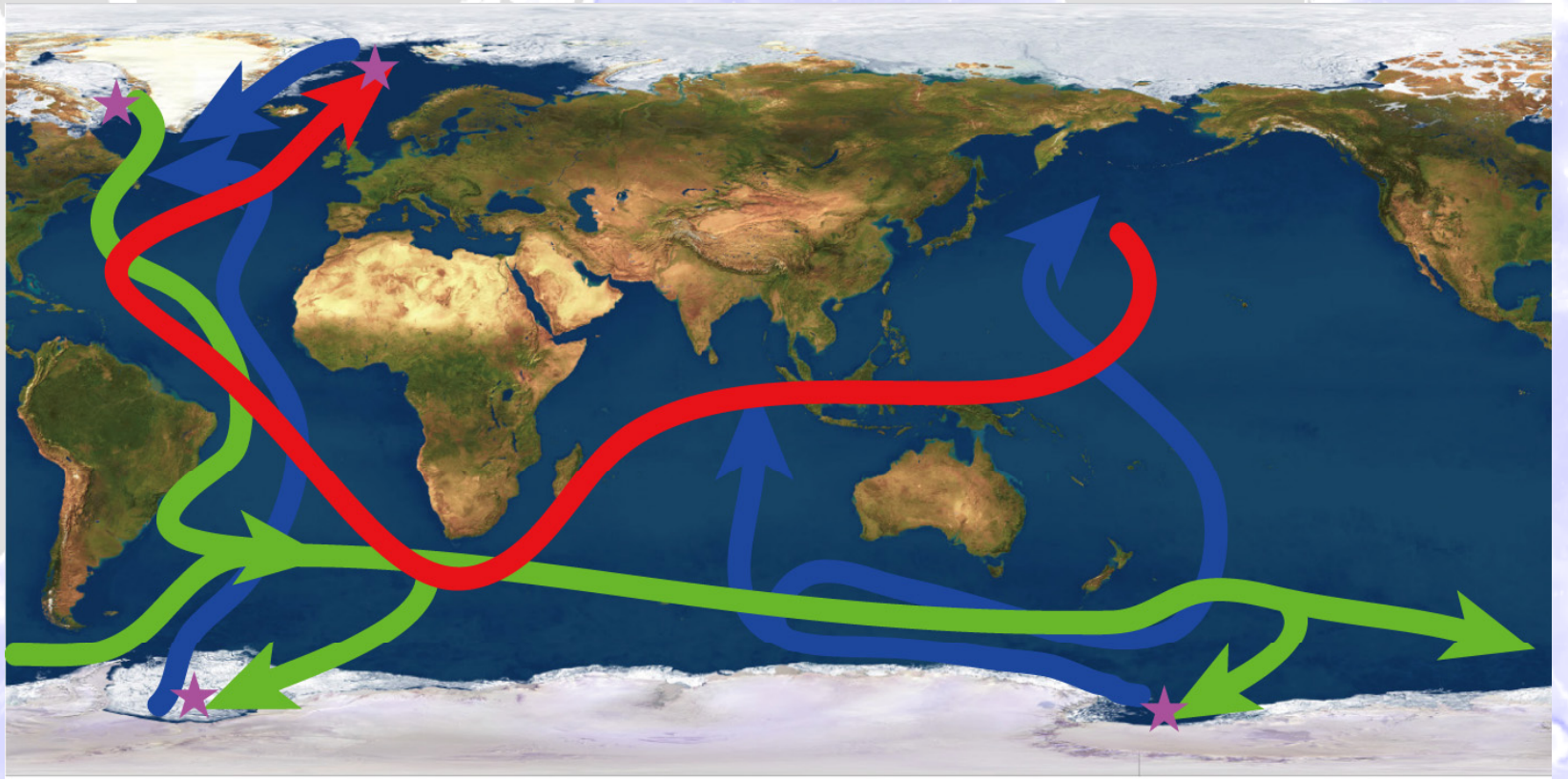
2010.05.21
東京大学情報基盤センター
平成21年度公募型プロジェクト報告会
「ペタ／エクサスケールコンピューティングへの道2010」

海洋大循環のマルチスケール連結階層モデリング

羽角 博康
東京大学大気海洋研究所
(旧 気候システム研究センター)

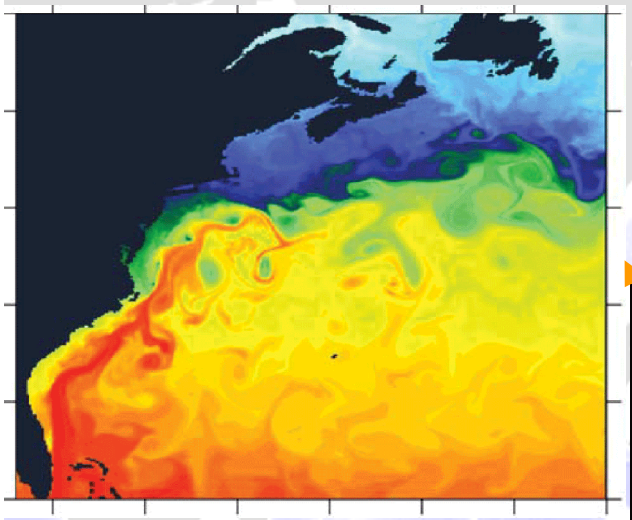
研究の背景

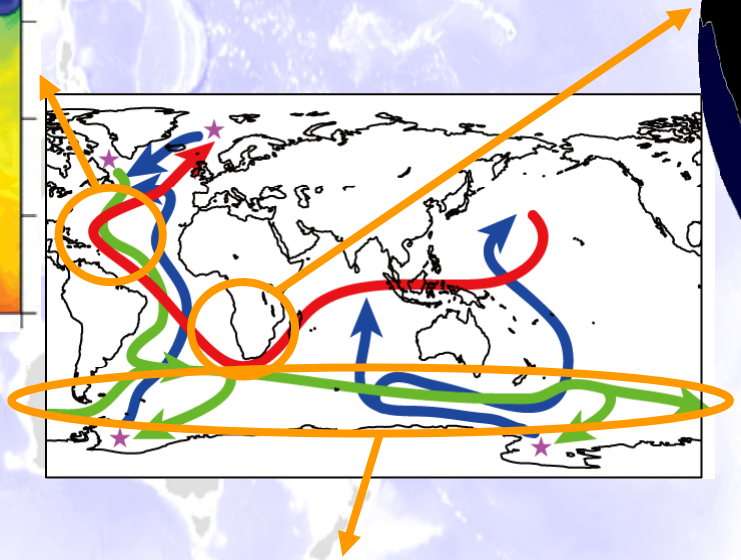
海洋大循環 (とくに全球規模熱塩循環):
一周 100,000 km 以上の空間スケール

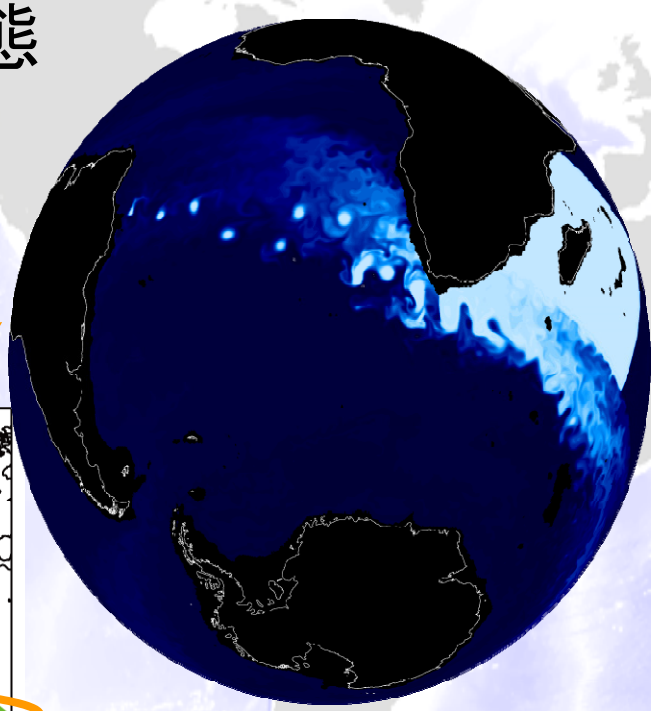


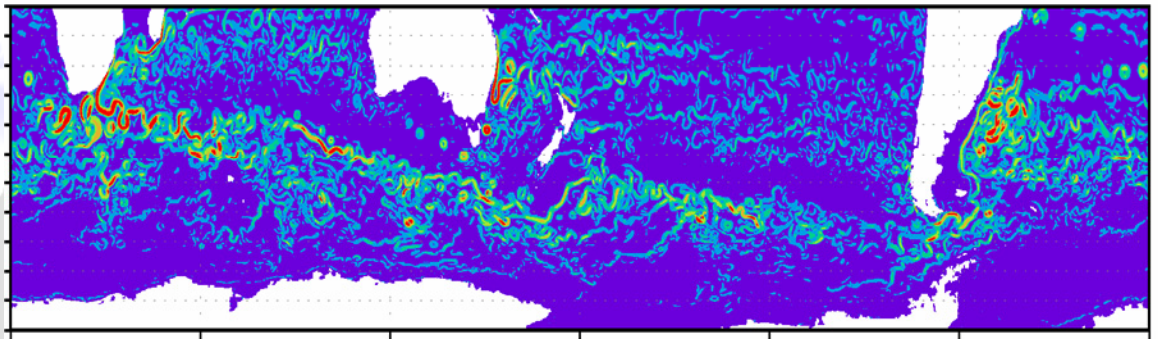
研究の背景

全球規模熱塩循環の pathway の実態









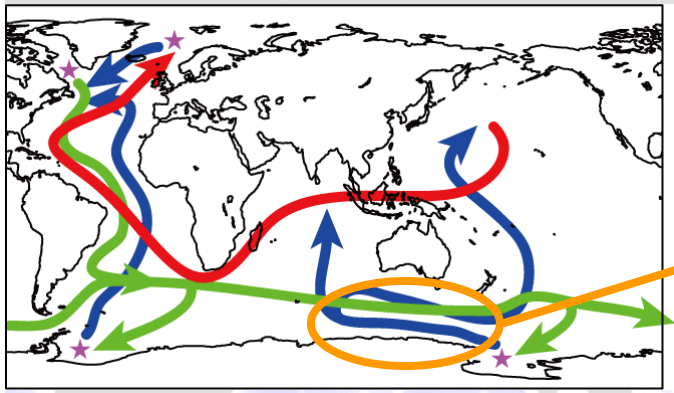
研究の背景

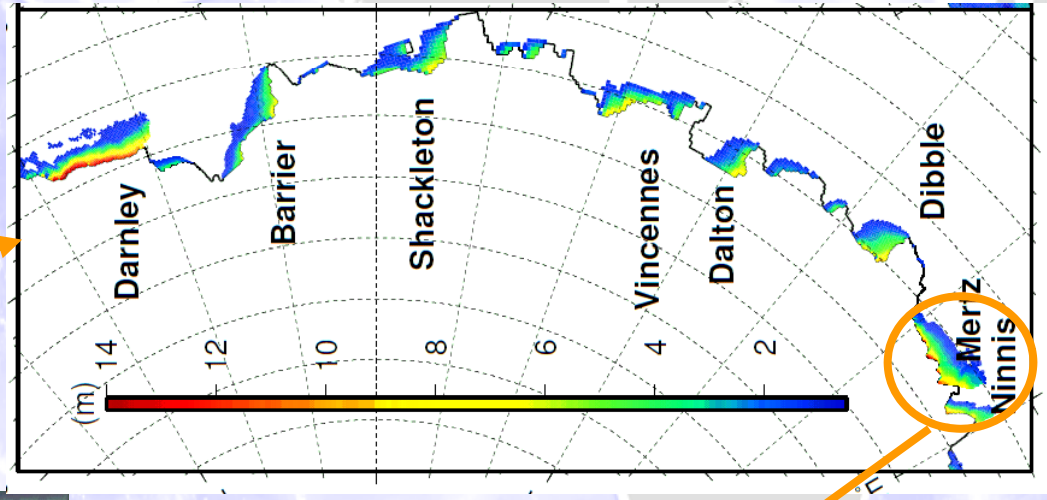
海洋大循環 (とくに全球規模熱塩循環):
一周 100,000 km 以上の空間スケール

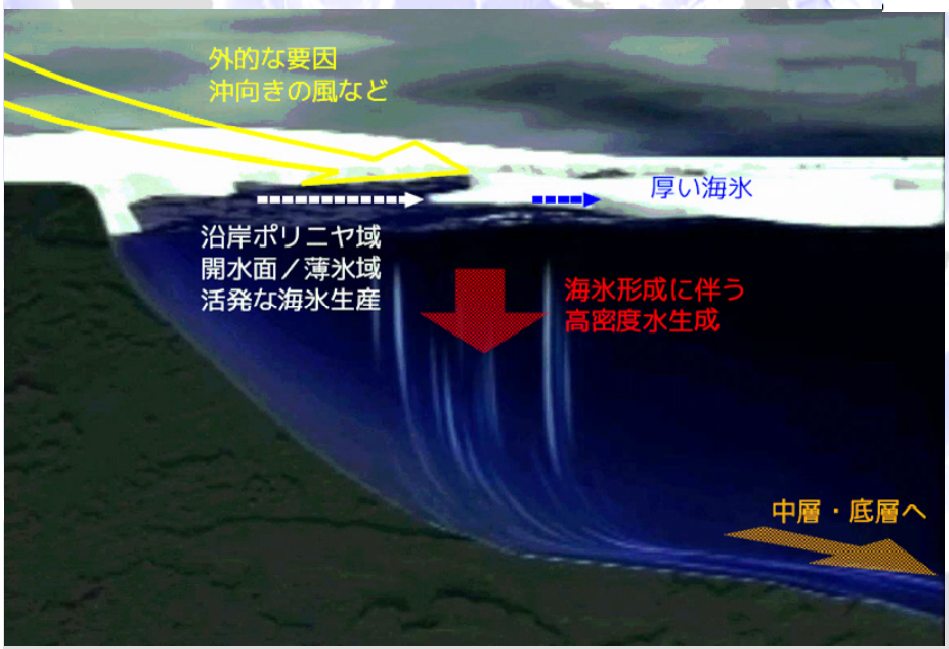
-Pathway を担うものは、幅 ~100 km の強海流や水平 ~10 km スケールの渦

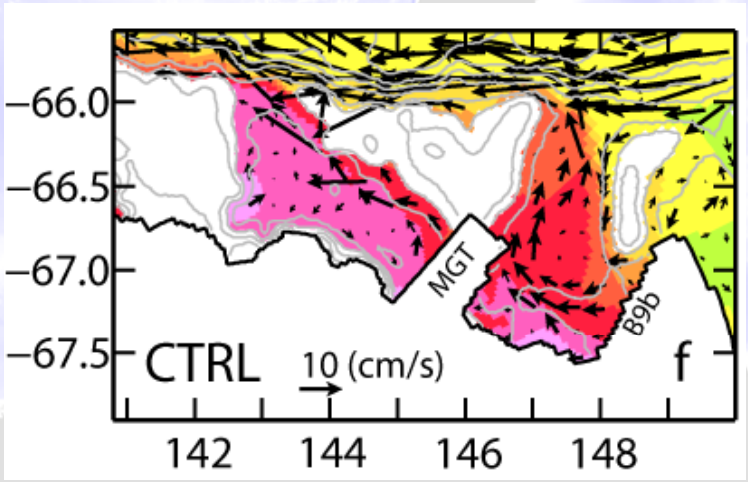
研究の背景

全球規模熱塩循環の起源: 高密度水形成









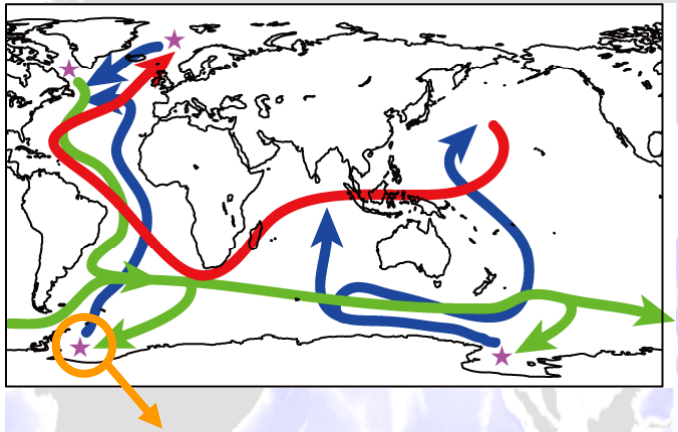
研究の背景

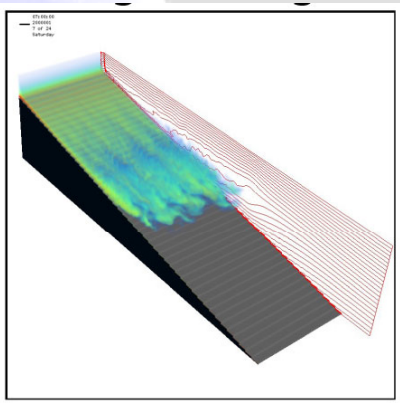
海洋大循環 (とくに全球規模熱塩循環):
一周 100,000 km 以上の空間スケール

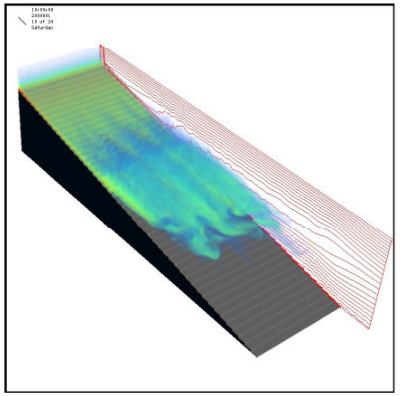
-Pathway を担うものは、幅 ~100 km の強海流や水平 ~10 km スケールの渦
-起源となる高密度水形成は水平 10 km スケール以下の対流過程

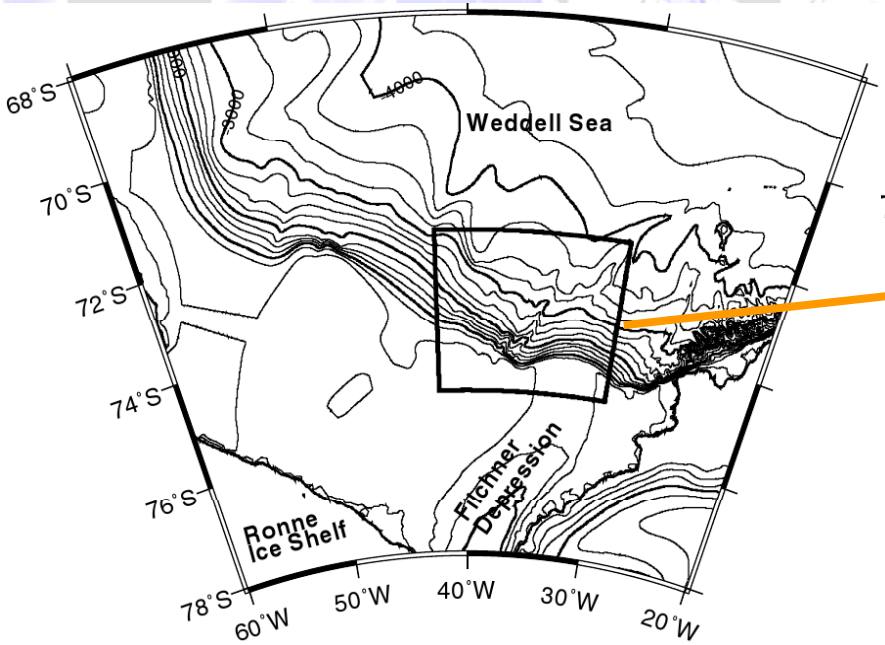
研究の背景

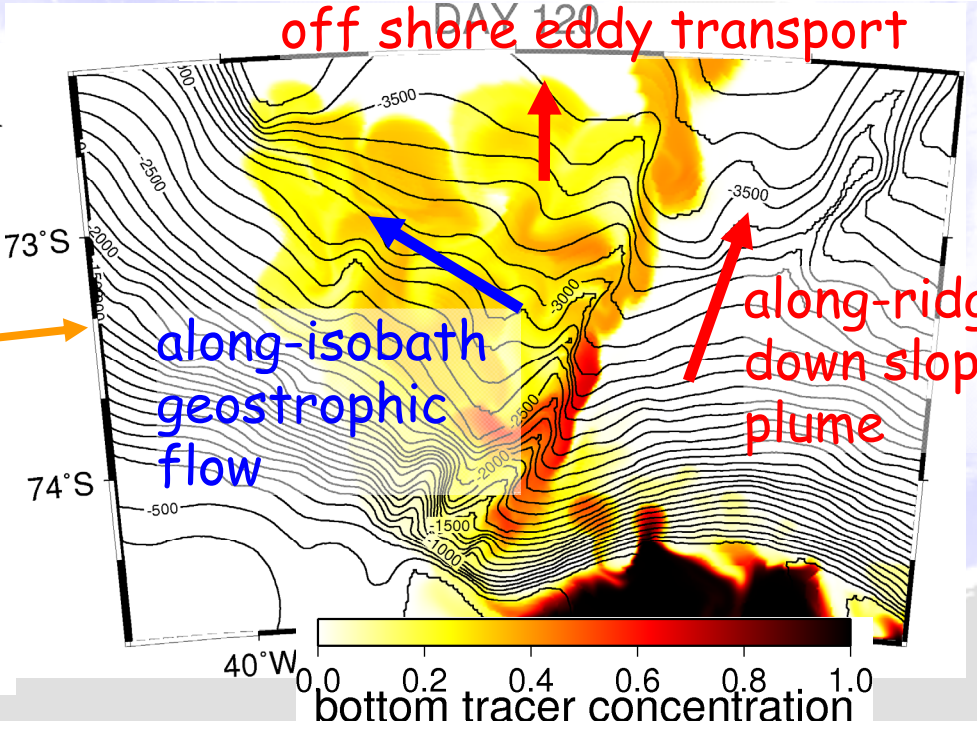
深層水形成: 高密度水の流出・混合











研究の背景

海洋大循環 (とくに全球規模熱塩循環):
一周 100,000 km 以上の空間スケール

- Pathway を担うものは、幅 ~100 km の強海流や水平 ~10 km スケールの渦
- 起源となる高密度水形成は水平 10 km スケール以下の対流過程
- 深層水形成は水平 1 km スケール以下の流出・混合過程

→ 全てのスケールを同時に表現しつつ、「気候」の問題をシミュレートすることは不可能

研究の背景

海洋大循環のモデリング
- 小規模スケール現象のパラメータ化
- 空間スケールに関する連結階層化 (ネスティング)

↓

海洋大循環モデルの高並列対応
- 連結階層化モデルの効率的実行方法
- ハイブリッド並列化
- アルゴリズムの高速化 (スカラーチューニング)
- 通信最適化
- 大規模 I/O の高速・効率化

スカラーチューニング

海洋大循環モデルの高負荷部分
- 小規模スケール現象のパラメータ化
- 移流(輸送)計算

移流アルゴリズム
- 旧来の低解像度モデリング(水平格子 > 100 km)では、upstream-weighted 3rd order で大体足りる
- 高解像度化で強いフロントや細く強い流れが表現されるのに伴い、移流計算を格段に高精度で行う必要が生じてきた
  → Second order moment (SOM) 法の採用
  (CIP 法みたいなもの)

T2K（東大）におけるSOMのスカラーチューニング

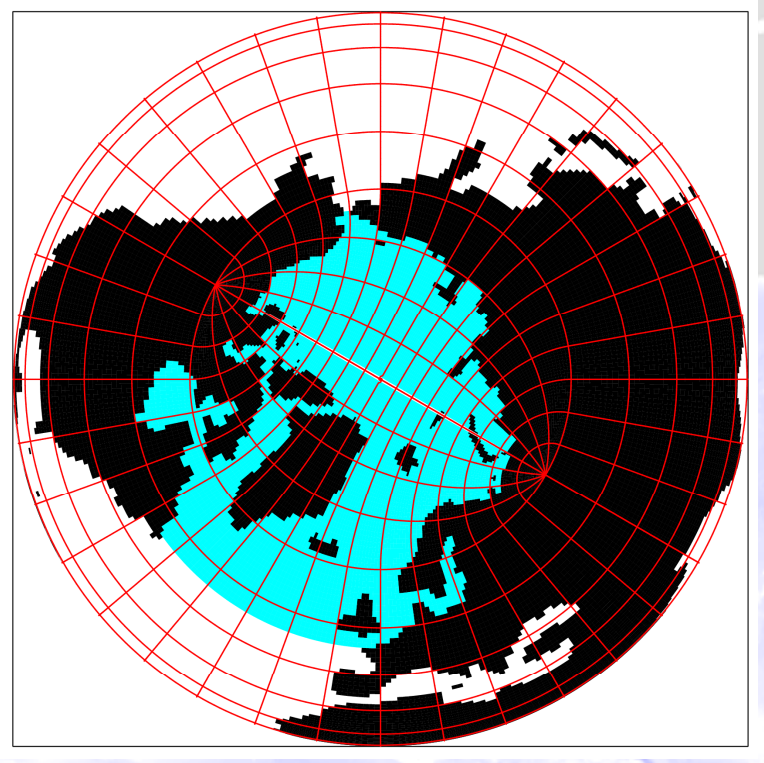
●高精度な移流スキームであるSOMは重い
全計算の約半分を占める

時間 (STDOUT.000)

	flat MPI (8x8分割, 1ヶ月積分)	MPI + 自動並列 (8x8分割, 4スレッド, 4ヶ月積分)
BRCLI	77.6 s	66.1 s
SOM	450. s (47%)	464. s (46%)
TOTAL	951 s	1015 s

tripolar grid model
360x184x50

線は10gridごと
水色：BBL領域



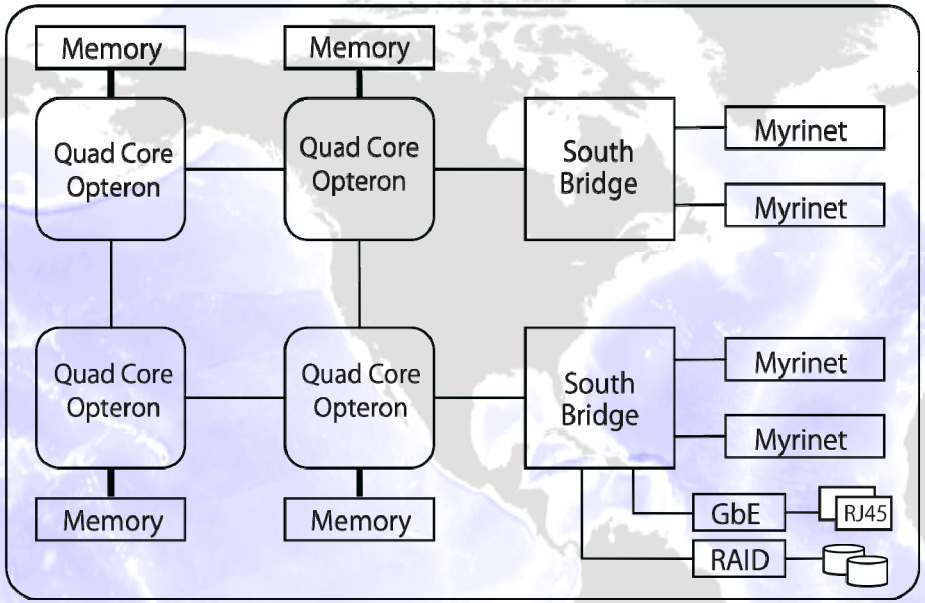
スカラーチューニングとして
キャッシュチューニングを行う

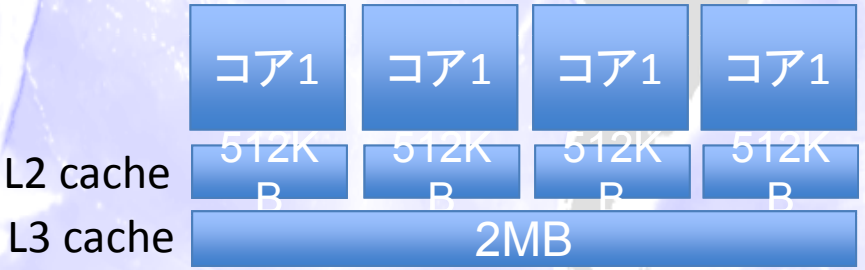
SOMの計算で使う主な変数
サイズ：NXYDIMxNZDIMxNTDIM（15個）
TX, FTX, FTY, FTZ, S0,
SM, SX, SY, SZ, SXX,
SYY, SZZ, SXY, SXZ, SYZ

サイズ：NXYDIMxNZDIM　(19個)
U, V, WZC, UV, VLMX,
VLMY,　VLMZ, ALF, F0, FM,
FX, FY, FZ,FXX, FYY,
FZZ, FXY, FXZ, FYZ

1回のKループで必要なデータ量
8Byte x47x25x(30+19)=460KB：L2には乗る

1 node: 4cpu 16コア





主なチューニング方法

x, y方向
計算はz方向に依存しない。
●Kループを外に出した
●融合可能なIJループを融合
●Kに依存しない一時的な配列（ALF, F0,..等）は1次元化

```
DO N=1,NTDIM

DO K=KSTR, KEND
DO IJ=IJSTR,IJEND
…演算1
…演算2
END DO
END DO

DO K=KSTR, KEND
DO IJ=IJSTR,IJEND
…演算3
…演算4
END DO
END DO

DO K=KSTR, KEND
DO IJ=IJSTR,IJEND
…演算5
…演算6
END DO
END DO

END DO
```

```
DO K=KSTR, KEND
DO N=1,NTDIM


DO IJ=IJSTR,IJEND

…演算1
…演算2

…演算3
…演算4

END DO

DO IJ=IJSTR,IJEND
…演算5
…演算6
END DO

END DO
END DO
```

z方向
計算は水平方向に依存しない。IJループを外を出すことも可能だがキャッシュミスを起こす。
●メモリアクセスの局所化を狙い、IJループを細切れにした（ブロック化）
●一時的な配列の大きさも小さくした
例：REAL*8 ALF(NXYDIM, NZDIM)
→ REAL*8 ZALF(I BLOCK, NZDIM)

```
DO N=1,NTDIM


DO K=KSTR, KEND
DO IJ=IJSTR,IJEND
 ALF(IJ, K)=…
…
END DO
END DO

DO K=KSTR, KEND
DO IJ=IJSTR,IJEND
…
…
END DO
END DO

END DO
```

```
DO N=1,NTDIM
DO IJ1=IJSTR, IJEND, IBLOCK
    IJ2=MIN(IJ1+IBLOCK-1, IJEND)
DO K=KSTR, KEND
DO IJ=IJ1, IJ2
 ZALF(IJ-I1+1, K)= …
…
END DO
END DO

DO K=KSTR, KEND
DO IJ=IJ1, IJ2
…
…
END DO
END DO
END DO
END DO
```

SOMの計算にかかった時間（STDOUT.000）

	flat MPI (8x8分割, 1ヶ月積分)	自動並列+MPI (4スレッド, 8x8分割，4ヶ月積分）	OpenMP+MPI (4スレッド, 8x8分割，4ヶ月積分）
チューニング前	450. s	464. s	---
チューニング後	167. s (2.7倍高速)	398. s (1.2倍高速)	216. s

自動並列のログ

```
**  Parallel processing starting at loop entry
**  Parallel function: _parallel_func_16_flxtrc_
**  Parallel loop
**  --- Loop distributed for parallelization ---
**    TEMP(277): TLOCAL variable
      ===略===
**  Parallel processing finishing at loop exit
**
XX  Serial loop
**    sm: unknown loop dependency
**    s0: unknown loop dependency
**
**  Parallel processing starting at loop entry
**  Parallel function: _parallel_func_22_flxtrc_
**  Parallel loop
**    TEMP(270): TLOCAL variable
      ===略===
**  Parallel processing finishing at loop exit
**
**   IF test is invarient in loop so moved to outside.
**
**   IF test is invarient in loop so moved to outside.
**   SWPL applied.
**
    DO K=KSTR, KEND

!---- in X-directio
```

チューニング後のプログラムでは、自動並列がうまくいかない（例えば、x, y方向の計算のKループを並列化してくれない）。

OpenMPによる並列化で改善された。

```
!$omp parallel do
!$omp& private(
!$omp& IJ, IJLW, IJLSW, IJLE, IJLS, IJLN, K, N, S0M, S1M, S0P, SXP,
!$omp& ALFQ, ALF1, ALF1Q, TMP,
!$omp& FM, ALF, F0, FX, FY, FZ,
!$omp& FXX, FYY, FZZ, FXY,FXZ, FYZ
!$omp& )
    DO K=KSTR, KEND

!---- in X-direction
```

今年度の計画(共同研究が採択されれば)

海洋大循環のモデリング
-小規模スケール現象のパラメータ化
-空間スケールに関する連結階層化 (ネスティング)

↓

海洋大循環モデルの高並列対応
-連結階層化モデルの効率的実行方法
-ハイブリッド並列化
-アルゴリズムの高速化 (スカラーチューニング)
-通信最適化
-大規模 I/O の高速・効率化