

**地球シミュレータ仕様・全球・非静力学
大気海洋結合モデルの開発**

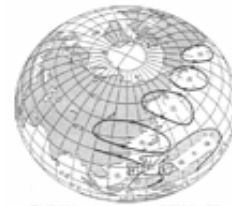
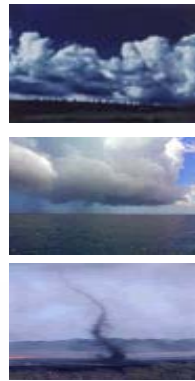
**地球シミュレータセンター
高橋桂子**

開発の目的

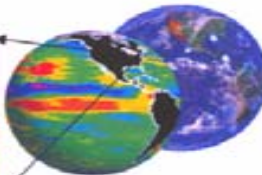
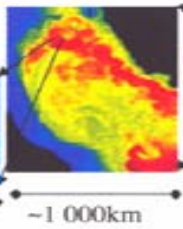
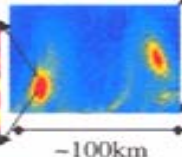
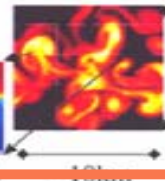
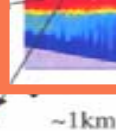
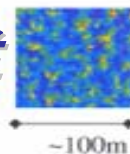
全球上で、マルチスケールのシミュレーションを、
できるだけ第一原理から扱える
大気海洋結合シミュレーションコードを開発する。

大気

数分～数時間 数日～数ヶ月 数ヶ月～数年, 数十年



海洋



数十日～数ヶ月

数年～数十年

—MITgcmマニュアルより—

開発の目的

地球上で、マルチスケールのシミュレーションを、
できるだけ第一原理から扱える
大気海洋結合シミュレーションコードを開発する。

非常に高分解能な
領域限定
シミュレーション

約10m～数100m
メッシュ

- ・ 地域の風況予測
- ・ 都市部の温暖化予測
足永靖志さん（独）建築研
- ・ 漂流，拡散予測

非常に高分解能な
部分領域を含む
全球シミュレーション

高分解能な
全球シミュレーション

数100m+ 数km～数10km
メッシュ

- ・ 雲物理過程と気候変動
 - ・ 降雨予測の向上
- Dr. Nikiforakis, Univ. Cambridge

高分解能な
全球
シミュレーション

10km～数100km
メッシュ

- ・ 従来の気候予測
比較検討

年次計画 と 本年度の目標

開発予定のシミュレーションコード

- 大気, 海洋シミュレーションコード
 - ☆ 格子系
 - ☆ 力学過程
 - ☆ 物理過程
- 大気・海洋結合シミュレーションコード

プロトタイプ構築 [本年度の目標]



- + 陸面・河川過程
- + 大気化学過程



- + 海氷(生成・融解, 流水)過程
- + 潮汐混合過程(表層部)

先進的なアルゴリズム, スキームの適用可能性と有効性を示す。
(特に, ボトムアップ)

格子系: オリジナリティ

- Ying-Yang格子系, Reduced Grid系

力学過程: 精度と保存性

- 保存性セミラグランジュスキーム(CSLR)
- 波の鉛直伝播特性の検討
- 浅水波方程式系, 3次元フルコードの検証
- 可変グリッド系への拡張

物理過程: テストケースのひとつとして

- MM5の物理過程を参考に導入
- 積雲パラメタリゼーション(Kain-Fritsch), 雲解像モデル(Reisner), 放射スキーム, PBL, 検証

計算最適化: 世界最速

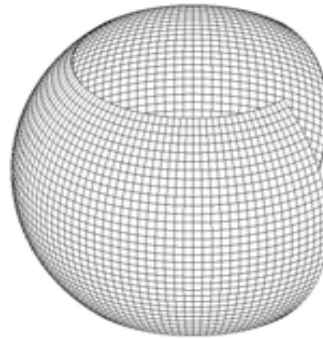
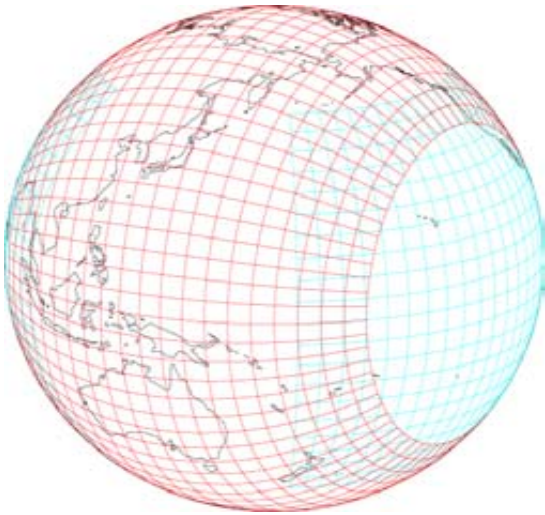
- 高い並列化率の達成と実計算時間の評価(力学過程), 物理過程
- 結合手法の検討と計算性能評価

高解像度における大気と海洋の相互作用

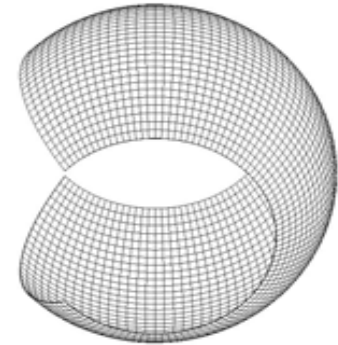
- 相変化を伴う直接計算手法の調査検討

Ying-Yang 格子系

オリジナル： 地球シミュレータセンター
固体地球シミュレーショングループ



+

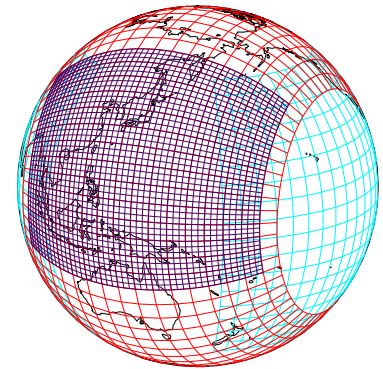


特長:

- 基本的に, 緯度経度座標。
- 軸回転は, 任意に可能。
- 任意の領域を容易にネスティングできる。
- 計算性能最適化: 知見をフル活用できる。

課題:

- 張り合わせた境界の保存性, 計算精度, 安定性。

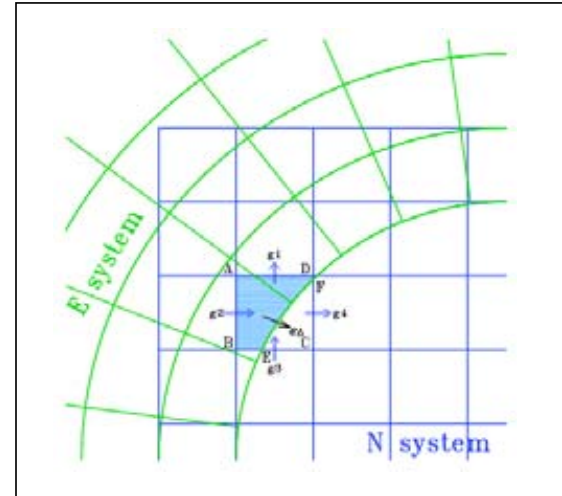


保存スキーム

全球・質量保存の必要十分条件：
N系あるいはE系の境界において、
各系のFluxの積分が等しい。

$$\int_{\Gamma_E} g_E d\Gamma = \int_{\Gamma_E} g_N d\Gamma \quad \int_{\Gamma_N} g_E d\Gamma = \int_{\Gamma_N} g_N d\Gamma$$

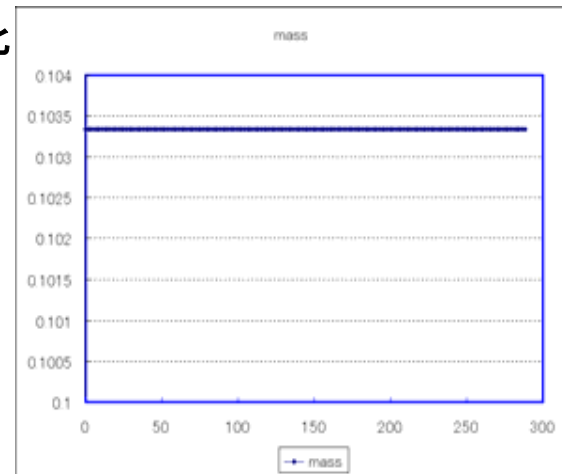
⇒ $g_E d\Gamma = g_N d\Gamma$ であれば、十分。



総質量の時系列変化

1次量を保存することを検証した。

【2次量の保存, 計算精度については,
定量的な評価を現在行っている。】



保存型セミ・ラグランジュスキーム (CIP-CSLR)

参考文献: Xiao F. et al. 2002: JGR, 107(D22), 4609

Peng X. et al. 日本気象学会2002秋季大会 (A302) と2003春季大会 (B407)

特長:

- ・ 完全フラックス型移流
- ・ 空間splittingによる時間刻み幅の緩和
- ・ 有理関数補間による移流の精度よい保存
- ・ 高精度, 低振動、非負値



移流に関する
すべての変数
(u, v, w, tracer)
に導入

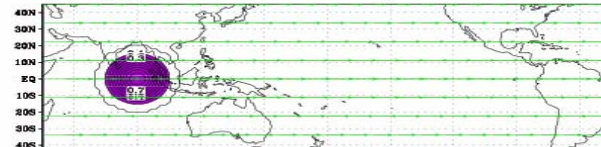
Williamson et al. (1992) のテスト 1

CFL条件の上限を3倍に設定

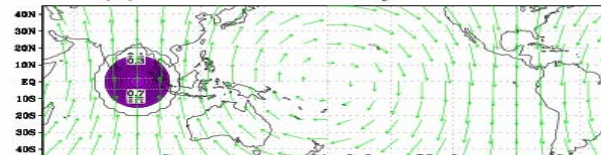


高精度で安定な計算が
可能であることを確認した。

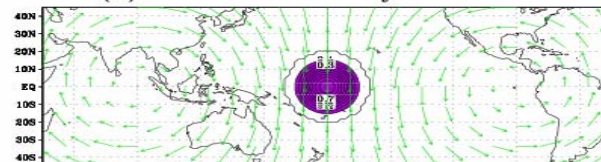
(a) advection in N-system CFL=3



(a) advection in N-system CFL=3



(a) advection in N-system CFL=3



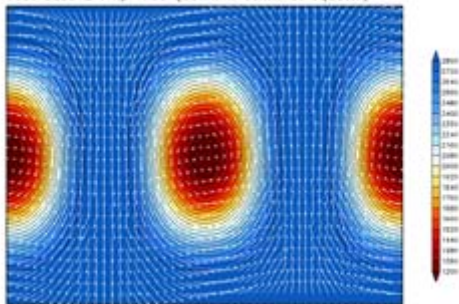
浅水波方程式（2次元）のテスト

（Williamson et al. (1992)の7つのベンチマークテストから）

テスト2：
定常状態の維持

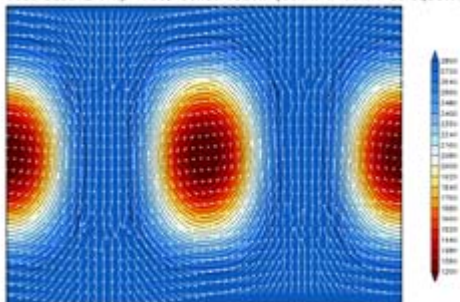
（保存ない場合）

Test Case 2 : np=160 (60km x 60km at equator)



（全球保存の場合）

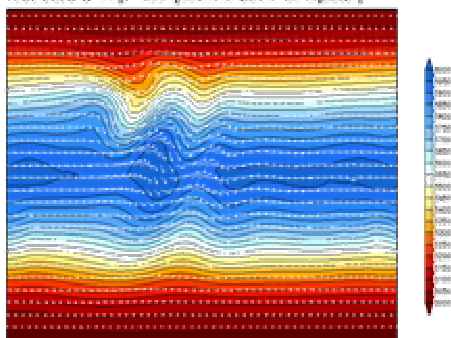
Test Case 2 : np=160, Conservation (60km x 60km at equator)



テスト5：
全エネルギー， エンス
トロフィーの保存性

（保存ない場合）

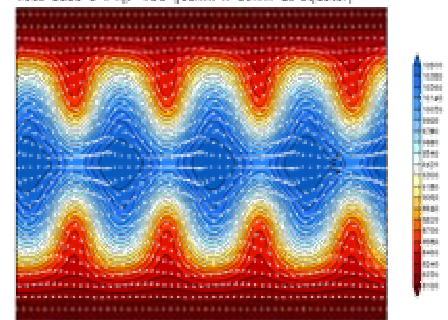
Test Case 5 : np=160 (60km x 60km at equator)



テスト6：
ROSSBY-Haurwitz波の
伝播特性

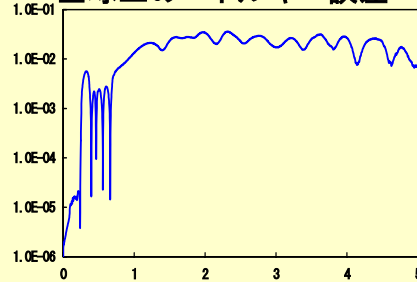
（保存ない場合）

Test Case 6 : np=160 (60km x 60km at equator)



速度場、表面高度

地球上のエネルギー誤差

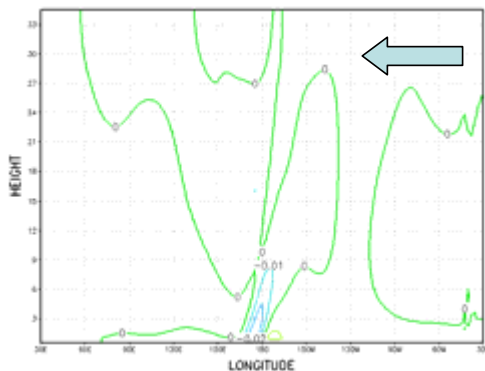


山岳波実験

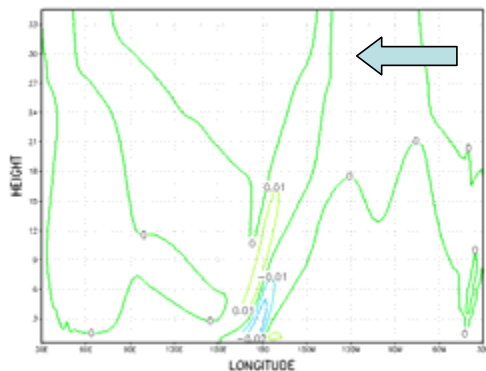
水平分解能：200[km]，鉛直80層

赤道断面上の鉛直速度

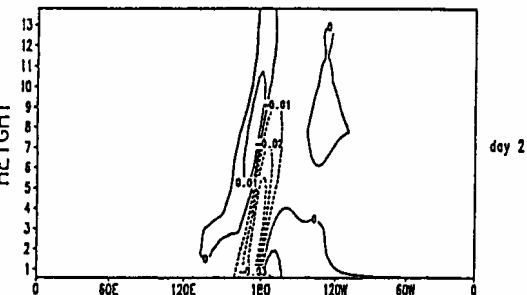
t=12



t=24



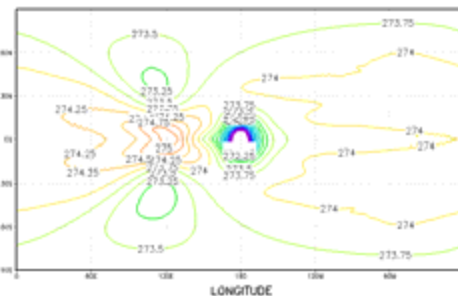
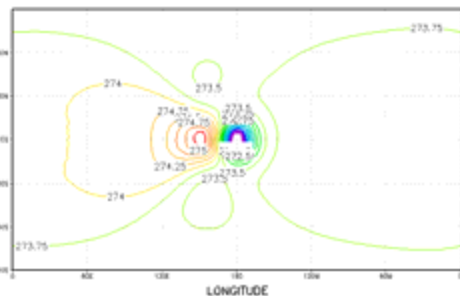
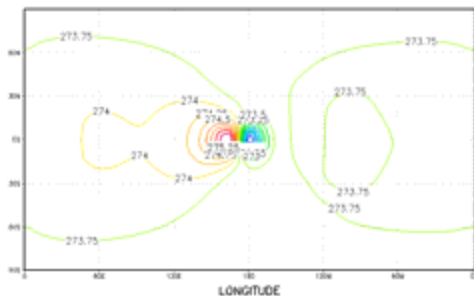
Qian et al,の結果 t=48



day 2

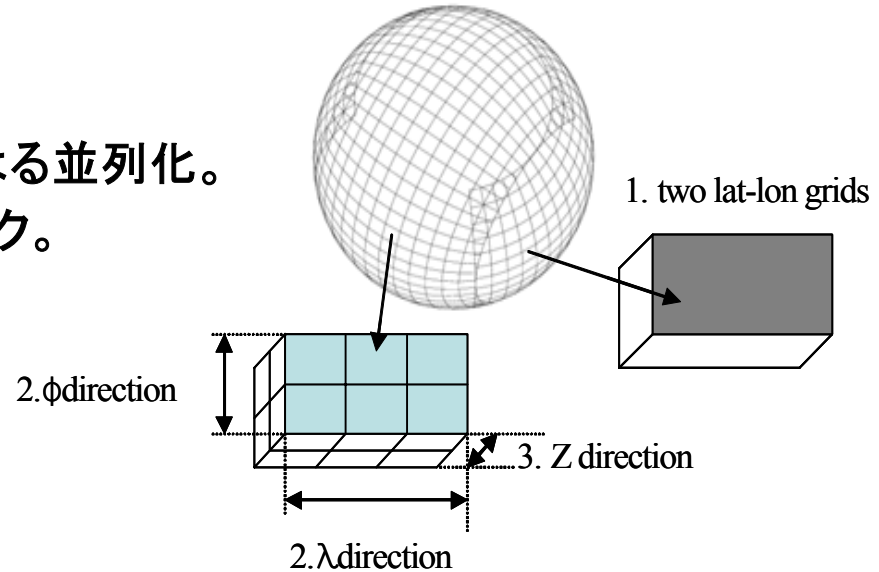
Qian et al,の結果と鉛直流の極大値，極小値の位置，値がほぼ一致した.

温度場



計算性能最適化【途中経過】

- 緯度経度2次元分割による並列化。
- 鉛直方向にマイクロタスク。
- ノード間はMPI使用。



力学過程の計算性能

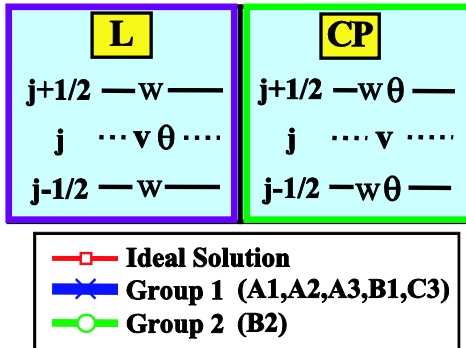
格子幅	時間ステップ(s)	ノード数	ベクトル長	ベクトル化率 (%)	MFLOPS	ピーク性能比
21 km	85	6	236.8	99.53	4647.1	58.1%
10km	71	24	237.4	99.52	4536.1	56.7%
5.2km	35	96	239.2	99.54	4789.4	59.9%
3.5km	23	216	238.9	99.54	4798.4	60.0%
2.6km	17	384	239.6	99.54	4782.9	59.8%

(注)セミラグランジュ法, 補間法未使用,最適化チューニングを継続中。

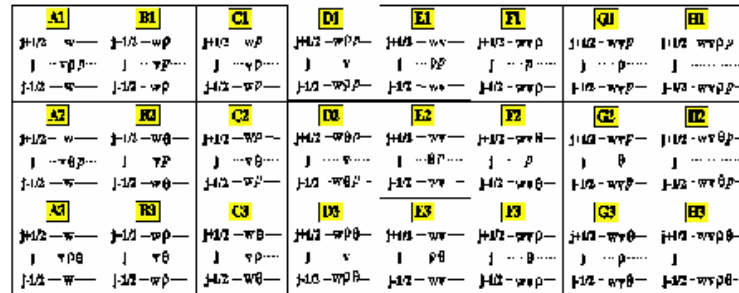
鉛直離散化による波動の伝播特性

“非静力学では、どの変数配置が適当であるか”

ローレンツグリッド Charney-Philipsグリッド



候補となるグリッド配置



解析計算結果

鉛直方向 $\Delta z = 500\text{m}$ のとき

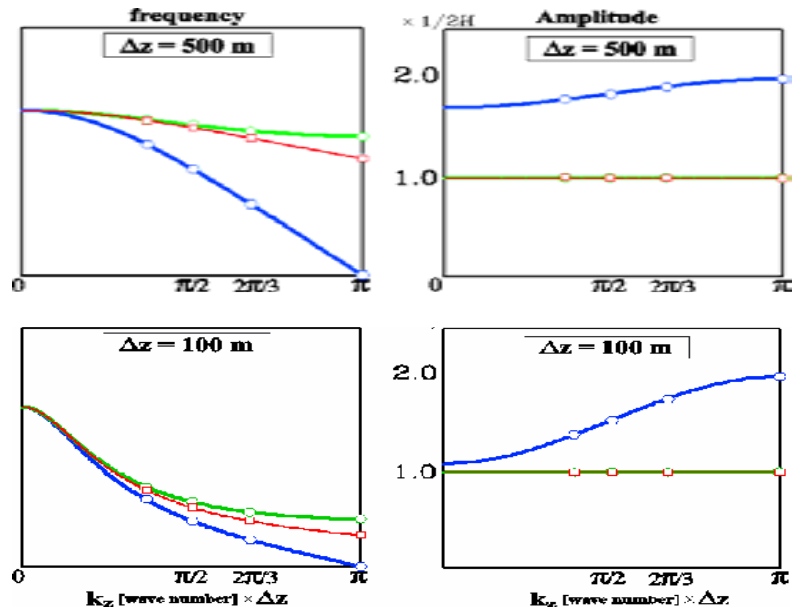
$$k_h = \frac{2\pi}{1000} \simeq 6 \times 10^{-3} [1/\text{m}]$$

$\Delta z = 100\text{m}$ のとき

$$k_h = \frac{2\pi}{1000} \simeq 6 \times 10^{-3} [1/\text{m}]$$

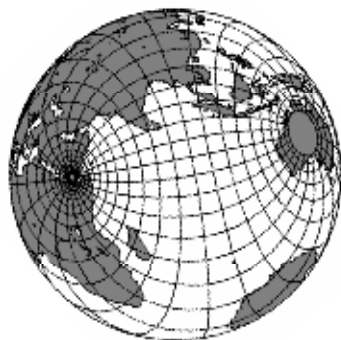
C-Pグリッドの方が望ましい。

【注】 保存性



全球・静力学・海洋大循環シミュレーションコード

地球フロンティア研究システム 気候変動予測領域 相木秀則さんとの研究協力



Non-hydrostatic code

dense water plume, strait exchange, tidal mixing

Transposed poles

curvilinear orthogonal coordinates (Bentsen et al., 1999)

Global calculation

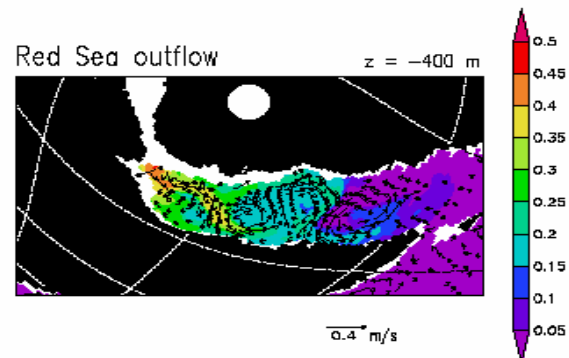
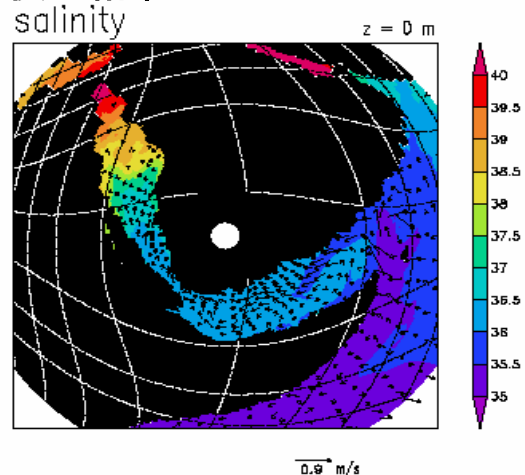
feedback from the remote process
astronomical tide (M2, S2, K1, O1)

Atmospheric forcing

wind stress: QSCAT and ECMWF blended (1/4deg)
heat and water flux: COADS (1deg)

to be integrated for 5-10 years

5年積分後の結果

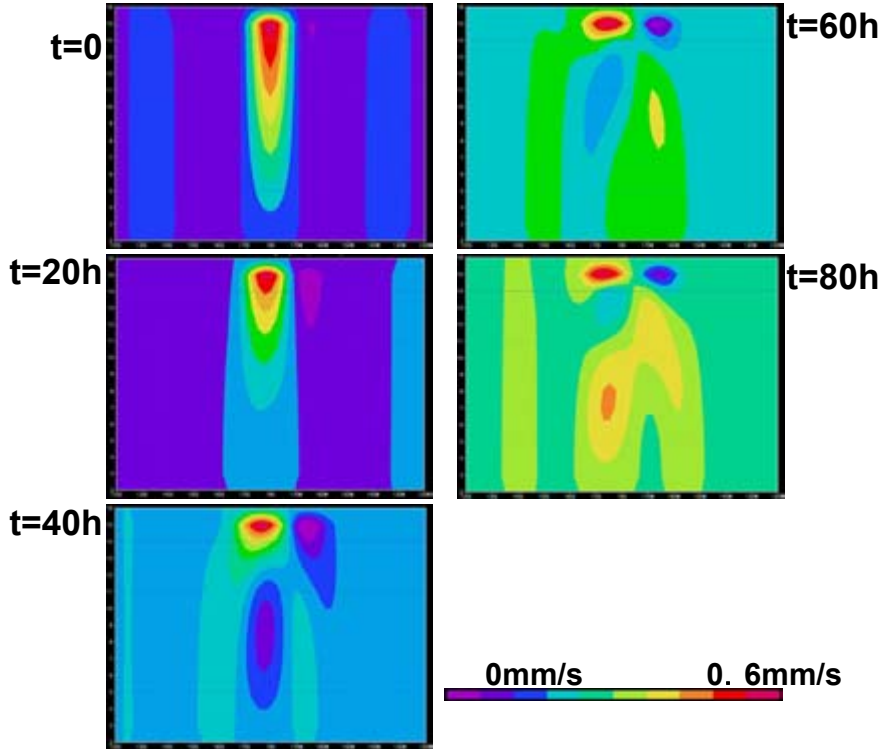


境界導入と海盆スケールの流れの検証

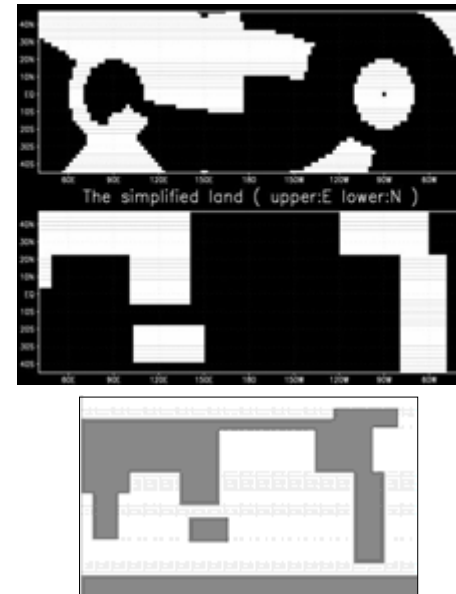
- 基本方程式系:
 - 非静力学, 完全圧縮形 (大気とほぼ, 同様)
 - 非静力学, 圧縮非弾性,
 - 非静力学, 非圧縮, ブジネスク近似
 - 静力学, 非圧縮, ブジネスク近似

- + 表面境界条件 (R-L)
- + 塩分方程式の追加
- + 陸面 (水平境界) の導入
- + 大規模・高速ポアソン eq. 解法
 - + 乱流混合層モデル
 - + 潮汐

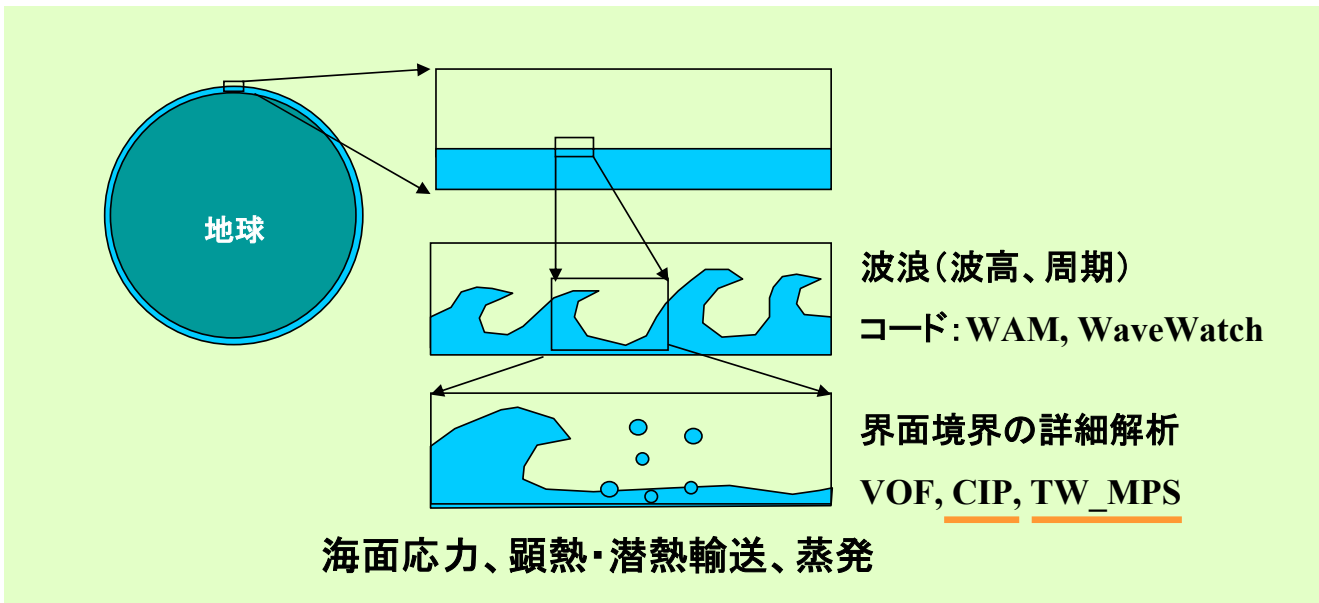
赤道上に塩分アノマリがあるとき、鉛直速度の時系列変化



境界の例



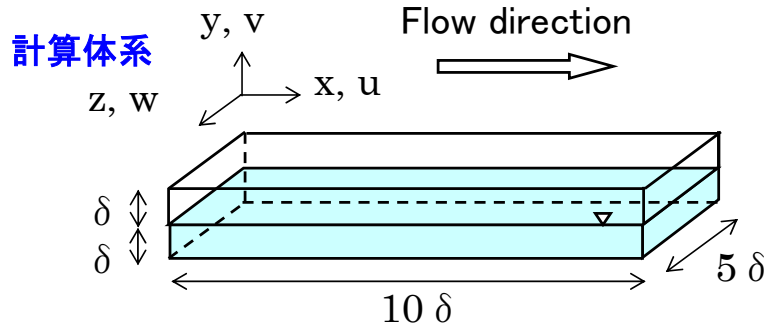
海面(界面)における粗視化・微視化のイメージ



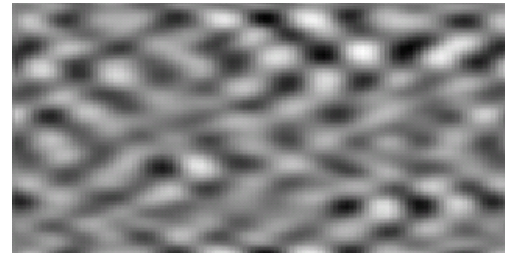
- ☆高解像度における界面の交換物理量の評価の重要性
- ☆微視的なスケールからボトムアップ的アプローチ
- ☆地球シミュレータ上でのみ可能となる試み

C-CUP法による大気・海洋界面での交換物理量の評価

—C-CUP法による気液二相流直接計算の結果—

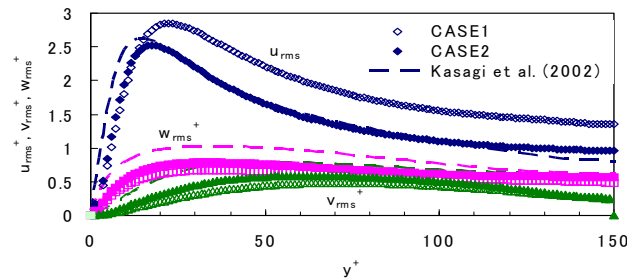


界面位置の分布(水平断面):さざ波構造

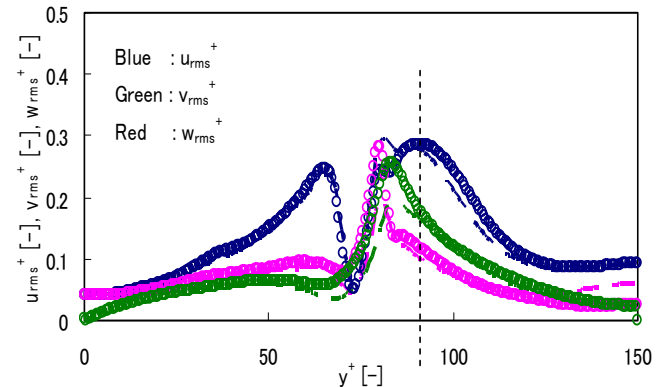


自乗平均速度分布

【界面を壁として扱った場合】



【界面として扱った場合】



気液界面の存在により v_{rms}^+ が卓越している。

⇒ 界面間輸送過程において鉛直方向の速度成分による寄与が大きいことを示唆する。

(功刀ら (2001) のMARS法によるDNSの結果とも一致。)

粒子法における海面応力の評価

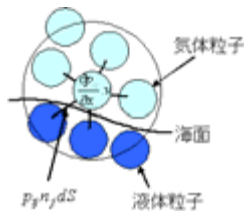
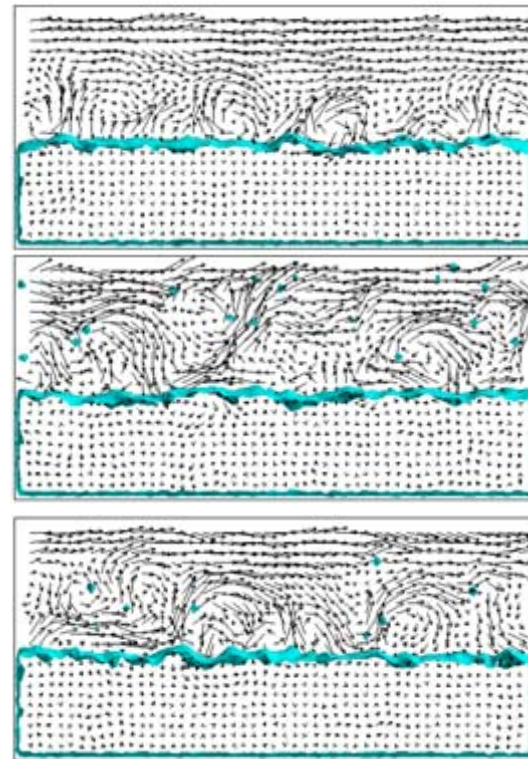
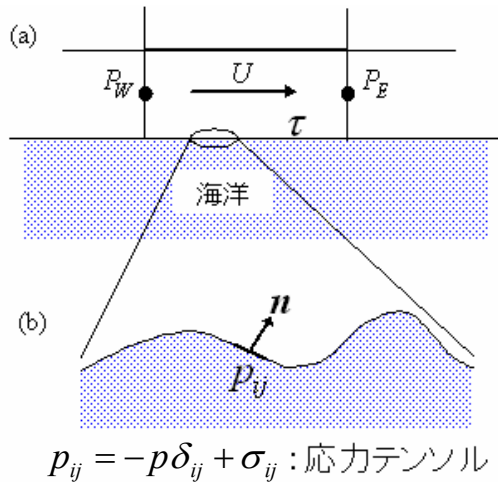
粒子法の数mスケールミュレーションへの初めての試み

海面応力 τ

$$\tau = F_{//} / S_0 \quad F = \int (p \cdot n) dS = \int (p_{ij} n_j) dS$$

海面に風を吹かせたときの、海面のようす

$U_{10} = 5.0 \text{ m/s}$



波高と振幅に対する依存性についての実験、評価検討を行っている。

今後（残りの今年度）の計画

- ・ 物理過程を導入したコードでの平均場再現実験
 - 解像度を変化させて。
 - スキームを変化させて。
- ・ 可変グリッドへの拡張の検討
 - 2wayネスティングの検討を含む
- ・ 計算スキーム精度向上のための検討
- ・ 結合手法テスト評価, 計算性能チューニング など

☆ 来年度は、特定の現象の機構再現、予測、および感度実験をメインにする予定です。☆