



海洋大循環モデリングの 現状と課題



東京大学気候システム研究センター
羽角博康

Contents:

- 何のために？
- 海洋大循環モデリングの歴史
- 海洋大循環モデリングの現状と課題
- これからの海洋大循環モデリング

何のために海洋大循環モデリングが必要なのか

海洋「大循環」モデリングとは？

プリミティブ方程式系(もしくはより近似の少ない基礎方程式系)による海洋のグローバルスケールモデリング(≒シミュレーション)

大気大循環モデリングの動機：天気予報

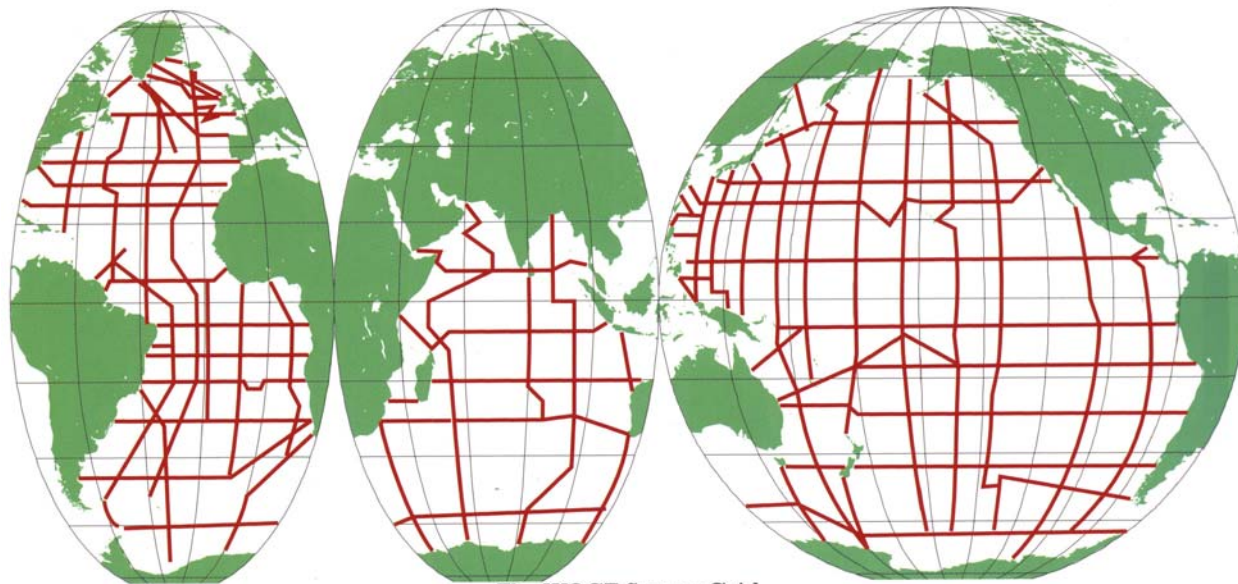
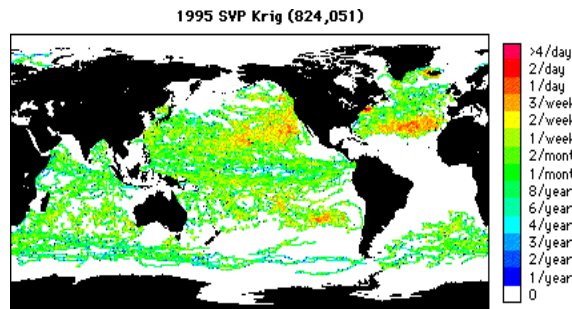
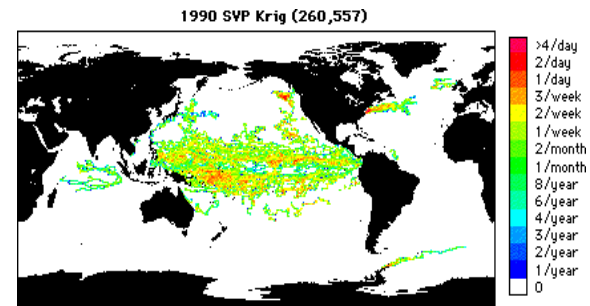
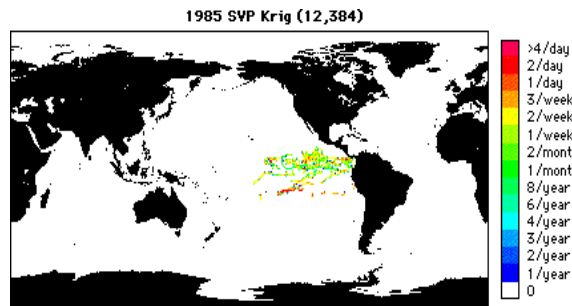
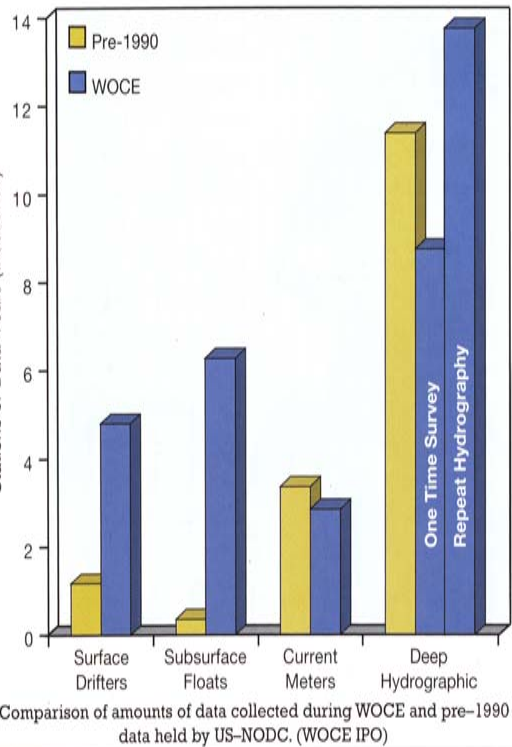
予報の前提となる「よい初期値」の存在

現実をシミュレートし、その結果を検証できるだけの観測データの蓄積

→開発当初(1960年代)からどちらの条件も揃っていた

1960年代の海洋大循環モデリングのバックグラウンド

純粹に海洋物理学的見地から海洋大循環モデリングを推進するのには無理がある



結合大循環モデルからの要請

大気大循環モデル：海面水温と入射短波(太陽放射)を境界条件として与えて、大気の状態をシミュレートするモデル

GFDLで大気大循環モデリングが進められた動機としては、人為起源二酸化炭素による気候変動の予測というのが大きい

海面水温が現在とは違ってしまいう気候の予報のためには海洋大循環モデルが必要

→Bryan (1969) によって海洋大循環モデルが発表されて以降およそ20年間、海洋大循環モデルによって現実をシミュレートしようという試みは大気－海洋結合大循環モデルという枠組みのものにほぼ限定

結合大循環モデルを離れては意味がないのか？

観測データの絶対量が少ないという、モデリングにおける弱点そのものがモデリングの動機に

観測データと相補的な役割を果たし、海洋の内部構造をもたらす物理メカニズムの解明を目指す

海洋大循環モデリングの歴史

Bryan and Cox (1968, JAS) “A nonlinear model of an ocean driven by wind and differential heating”

プリミティブ方程式系に基づく海洋大循環モデルの先駆け

理想化された設定である上、境界条件等も現実との対応を考えたものではない

数値計算手法もまだ確立されていない

Bryan (1969, JCP) “A numerical method for the study of the circulation of the world ocean”

Bryan-Cox type と呼ばれる現在の海洋大循環モデルの主流のおおもと。直系の子孫がGFDL-MOM

z-coordinate, B-grid, rigid lid

Bryan (1969, MWR) “Climate and the ocean circulation III: The ocean model”

GFDL における結合大循環モデリングの一部

理想化された設定とはいえ、ある程度現実との対応を考えた上でグローバルスケールの熱塩循環までを取り扱った最初の例

とてもとても成功例とは言えないが、はじめの一步を踏み出すのは大変なこと

Holland (1971) “Ocean tracer distributions: Part I. A preliminary numerical experiment”

Bryan (1969, MWR) と同様の設定で海洋大循環モデルを単独で用いて(怪しい手法を用いつつ)深層海洋を含めた定常状態を計算した最初の例

Bryan and Cox (1972) “The circulation of the world ocean: A numerical study”

現実的な海陸分布を与えて海洋大循環モデルを動かした最初の例だが、密度一様の海洋で風成循環のみを扱う

Bryan et al. (1975) “A global ocean-atmosphere climate model II: The oceanic circulation”

現実的な海陸分布のもとで熱塩循環までを扱った最初の例
これもまた、結合大循環モデリングの一部

Bryan and Lewis (1979) “A water mass model of the world ocean”

海洋大循環モデルを単独で用いて、現実的な水塊分布を得るべく、モデルパラメータに関する感度実験を数多く行った、いわばシミュレーションの第一歩

1970年代の海洋大循環モデリング

ほぼ GFDL のみ

結合大循環モデリング主導ではあるが、海洋大循環のシミュレーションへ向けた足場固めをし、その第一歩が踏み出される

1980年代の海洋大循環モデリング

GFDL の海洋大循環モデルが広く配布されたり、あるいは独自の海洋大循環モデル開発がすすめられたりしたのだが、本格的な海洋大循環のシミュレーション...には進まない、なぜか

結合大循環モデリングの枠組みにおいては現実的な海洋シミュレーションが追求された(はずだ)が、水塊分布などを見せてくれた例は皆無と言ってよい

海洋大循環モデルを単独で用いた研究では、そのほとんどが box ocean などの理想化された設定における熱塩循環のプロセススタディー

例: Bryan (1986), Bryan (1987), ...

海洋大循環モデリングの現状と課題

1990年代の典型的な海洋大循環モデリング

England (1993) “Representing the global-scale water masses in ocean general circulation models” の例

共通する問題点(水塊分布再現という観点から)

- NADW, AABW といった主要な深層水塊の T, S 特性
- 深層循環の流量
- thermocline の再現と中層水(ないしモード水)

海洋大循環モデルのパフォーマンスを決める要因

- 解像度
- 離散化手法および数値スキーム
- (サブグリッドスケール)パラメタリゼーション
- 境界条件
- ※ 基礎方程式系

パラメタリゼーション

物理過程のパラメタリゼーション:

プリミティブ方程式の熱力学の式に陽に表されない熱源項

大気: 放射フラックスの収束・発散、水の蒸発・凝結に伴う潜熱の吸収・放出、雲の放射に対する影響、...

海洋: 短波放射の透過、海氷の生成・融解 → とともに海面付近のみで起こる過程

サブグリッドスケールパラメタリゼーション:

解像度のために陽に表現できない現象によるエネルギー輸送・変換

※ 大気・海洋における現象のスケールと大循環モデルの解像度

水平「渦」混合：中規模渦に伴う混合過程

大気における中規模渦とそのパラメタリゼーション

horizontal mixing / isopycnal mixing (Veronis effect)

中規模渦による diapycnal mixing → Gent-McWilliams パラメタリゼーション

Neptune effect など

鉛直「渦」混合：その実態と実体

鉛直拡散係数の持つ意味とその値の見積り

Bryan (1987)

Munk (1966) “Abyssal recipes”: $1.3 \text{ cm}^2/\text{s}$

microscale profiling (1970's) → Bryan and Lewis (1979)

乱流混合のエネルギー源・輸送過程・変換過程

storm (風)に起因する乱流エネルギー？

海面境界層(混合層)

成層不安定を起こさない海面付近において、風によってインプットされた乱流運動エネルギーをポテンシャルエネルギーに変換して混合層を維持する過程のパラメタリゼーション

- bulk type (Kraus-Turner)
- level type (Mellor-Yamada)

鉛直座標系と境界層モデルの implementation

- z-coordinate model (level model)
- ρ -coordinate model (layer model)
- σ -coordinate model

大気の接地境界層モデルと比べて...

海底境界層

sill-overflow / down-slope flow のパラメタリゼーション:
NADW, AABW といった主要な深層水塊の形成過程

離散化手法と数値スキーム

鉛直座標系：海底地形の表現と鉛直流(および移流フラックス)

“step” representation (cf. σ -coordinate model)

→ “partial-step”, “piecewise-linear”

水平座標系：海岸地形の表現、極の取り扱い

差分法、スペクトル法(球面調和関数)、有限要素法...

球面座標系を用いた場合の北極点付近の取り扱い

球面座標系以外の水平座標系

海洋大循環モデルにおける移流の表現の重要性

トレーサー移流

accuracy, shape preservation, positivity preservation,
conservation, ...

運動量移流

momentum conservation, kinetic energy conservation,
enstrophy conservation, ...

新たなる観測的発見とモデリング

Polzin et al. (1997) “Spatial variability of turbulent mixing in the abyssal ocean”

海洋(とくに深層)の鉛直混合にこれほどの空間不均一があるとは、以前は想像だにされていなかった

鉛直混合の主要なエネルギー源が地形の影響を受けた潮汐(内部潮汐)であることを強く示唆(その後、より直接的な証拠も観測される)

Munk and Wunsch (1998) “Abyssal Recipes II”

...‘Would the general circulation of the ocean be qualitatively different in Earth had no Moon?’

当然、それまでの海洋大循環モデリングではそんな要素が考慮されたことはない

※ 海洋の鉛直混合は熱塩循環の主要なコントロールファクター

Hasumi and Sugimoto (1999) “Effects of locally enhanced vertical diffusivity over rough bathymetry on the world ocean circulation”

これからの海洋大循環モデリング

高解像度化(渦解像モデリング)

どうしても渦解像モデルを用いなければ解決できない問題

西岸境界流、recirculating gyre、mode water formation...

技術的課題

free surface の implementation と surface boundary (mixed) layer

試みの一例

非渦解像モデリングへの還元

パラメタリゼーション(高解像度化の限界をふまえて)

海氷モデリングとの関係

国際的協力/競争体制

MIP (model intercomparison project):

海洋モデリングコミュニティーはやる気がないのか？