

# 大気海洋海氷結合モデルによる 水惑星の気候シミュレーション

河合 佑太<sup>1,2</sup>

高橋 芳幸<sup>1</sup>, 石渡 正樹<sup>3</sup>, 西澤 誠也<sup>2</sup>,

竹広 真一<sup>4</sup>, 中島 健介<sup>5</sup>, 富田 浩文<sup>2</sup>, 林 祥介<sup>1</sup>

[1] 神戸大学, [2] RIKEN AICS, [3] 北海道大学,

[4] 京都大学, [5] 九州大学



RIKEN's  
Programs for  
Junior Scientists

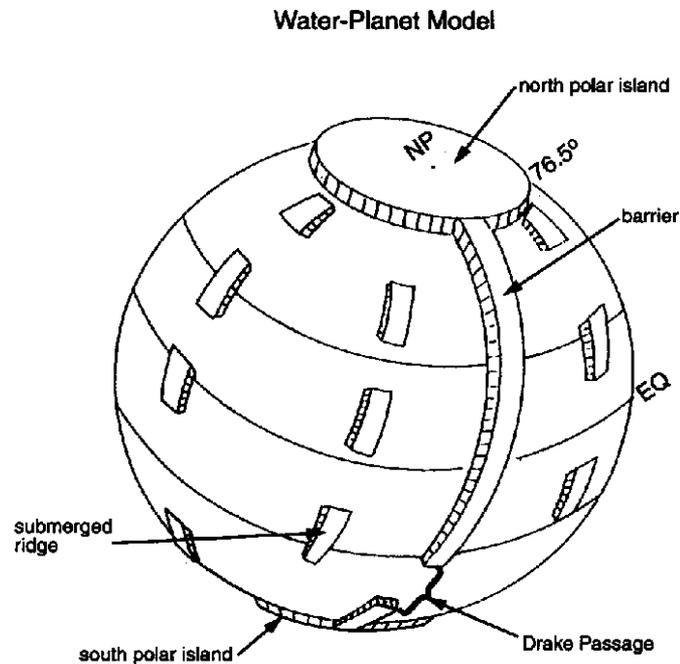
# あらすじ

- 研究の背景と目的
  - “理想化” (非現実的) 海洋 (結合) 計算
- 結合モデルの記述
- 結合モデルを用いた水惑星の気候の数値実験
- まとめ

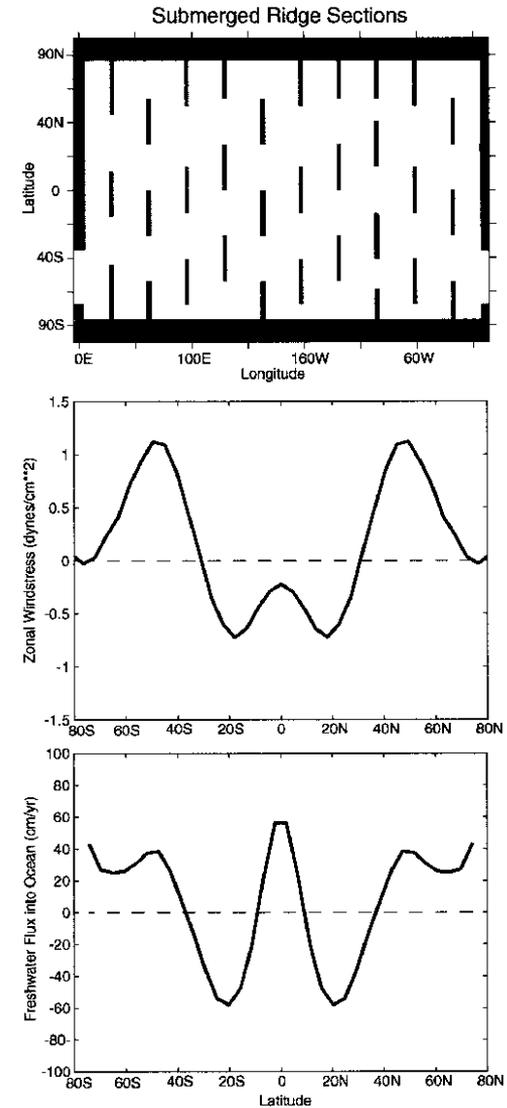
# 理想化条件での結合GCM

- Toggweiler and Bjornsson (2000), Hotinski and Toggweiler (2003)
  - 非常に理想化した海陸分布を与えた大気・海洋結合計算(古気候を意識)
    - ただし, 大気はエネルギー・バランスモデル
- Smith et al.(2006)
  - 非常に理想化した, 3 種類の海陸分布を設定
  - 大気・海洋大循環の両方を陽に計算.
    - しかし, 渦による水平拡散の取り扱いに問題あり(Marshall et al. 2006 に議論あり).
- Marshall et al.(2007), Enderton and Marshall (2009)
  - 純粋な水惑星設定のみ
  - 大気・海洋大循環の両方を陽に計算

# Toggweiler and Bjornsson (2000)

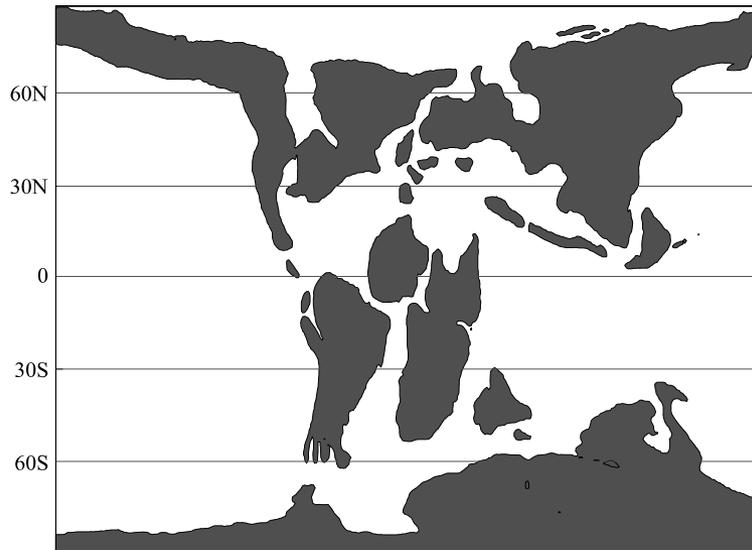


**Figure 1** Schematic diagram illustrating the major features of the water planet coupled model.



**Figure 2** (a) Map of ocean bathymetry showing the positions of submerged ridge segments. (b) Wind stresses imposed on the ocean as a function of latitude. (c) Salinity fluxes imposed on the ocean as a function of latitude, shown as an equivalent freshwater flux in  $\text{cm yr}^{-1}$ .

# Hotinski and Toggweiler (2003)



# Smith et al (2006)

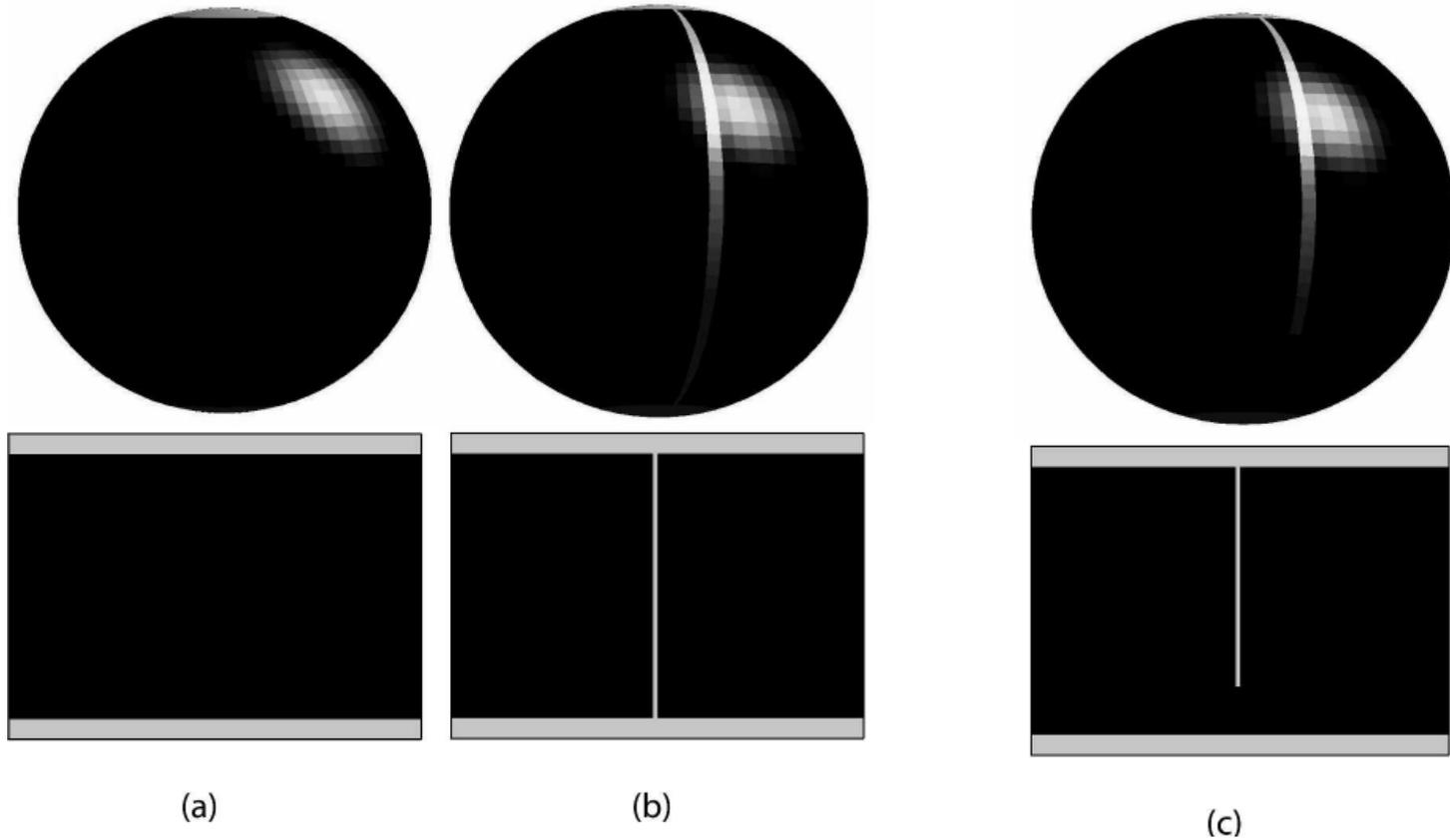
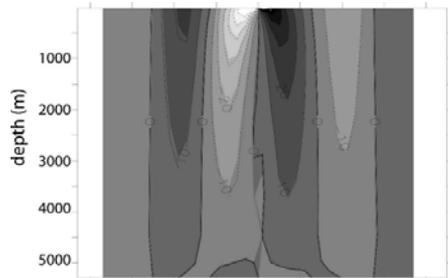
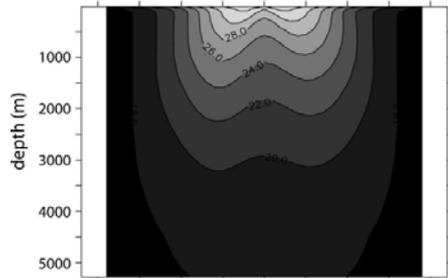


FIG. 1. Aquaplanet geographies: (a) WaterWorld, (b) RidgeWorld, and (c) DrakeWorld.

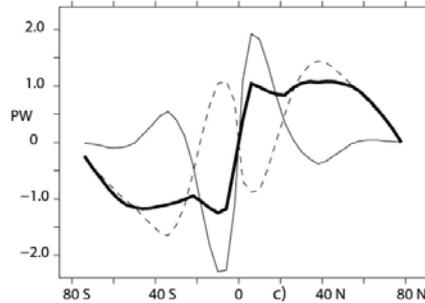
# Smith et al (2006)



a)

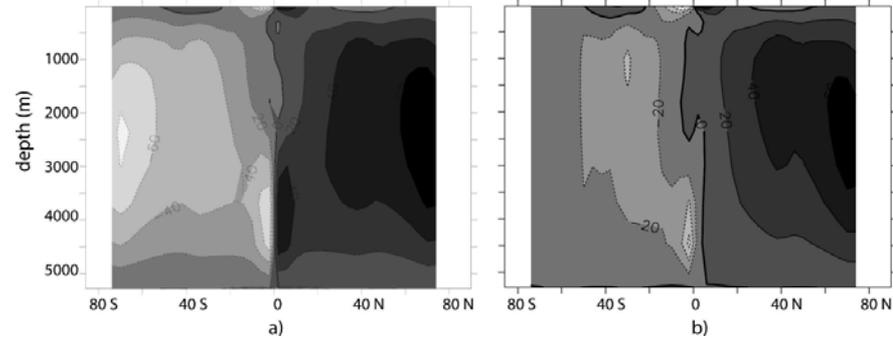


b)



c)

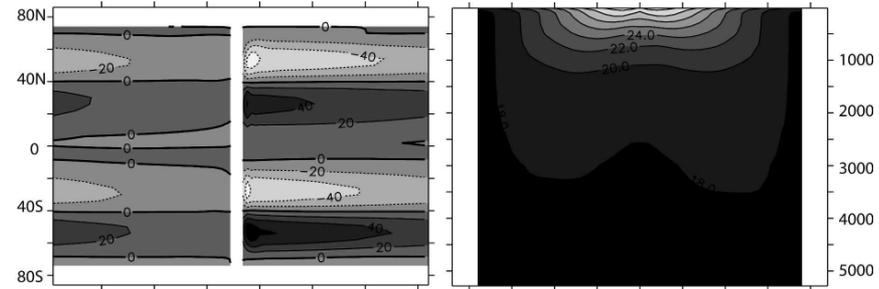
FIG. 11. Waterworld (a) meridional overturning streamfunction ( $S_v$ , positive clockwise); (b) zonally, annually averaged temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) vs depth; and (c) ocean heat transport components (PW), advective (light), nonadvective (dashed), and total (heavy).



a)

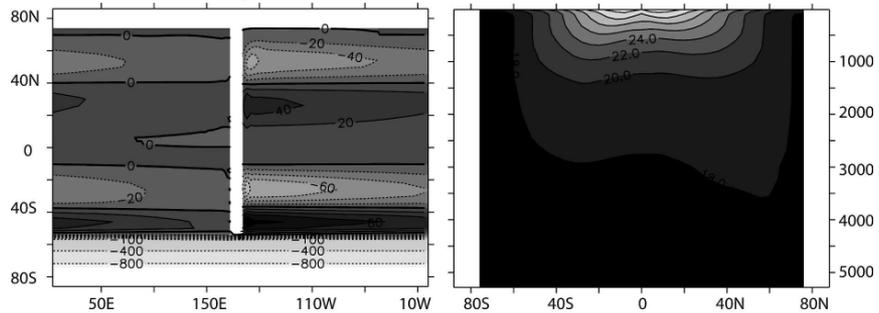
b)

FIG. 19. Meridional overturning streamfunction ( $S_v$ , positive clockwise) for (a) RidgeWorld and (b) DrakeWorld.



a)

b)



c)

d)

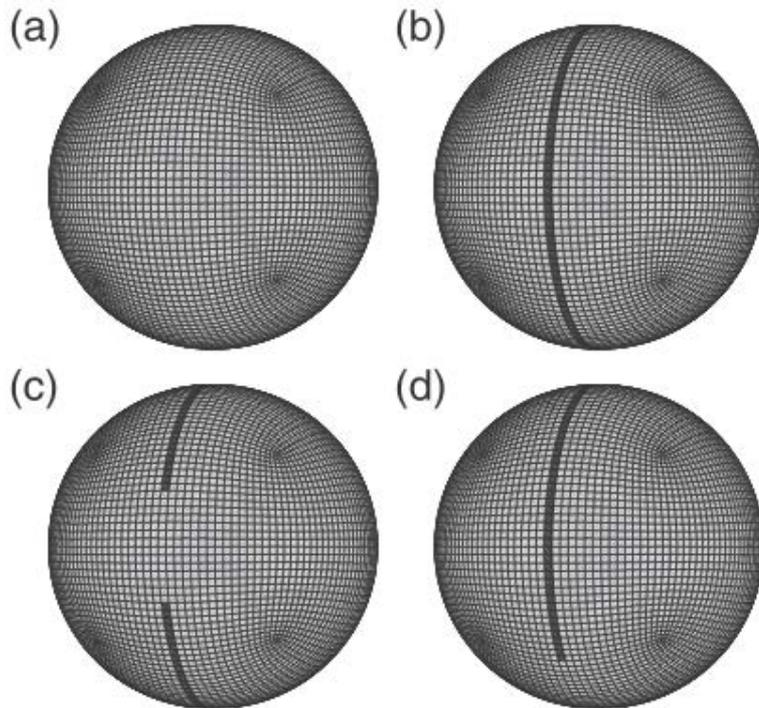
FIG. 17. (a), (c) Horizontal streamfunctions ( $S_v$ , positive clockwise) and (b), (d) zonally averaged temperature vs depth ( $^{\circ}\text{C}$ ) for (top) RidgeWorld and (bottom) DrakeWorld.

# Enderton & Marshall (2009) のサマリー

## 数値実験の設定

# 系の設定: 海陸分布

- 4 種類の理想化された海陸分布を与える.



(a) Aqua:

全球海洋(深さ 5.2 km, 海底地形無し)

(b) Ridge:

(a) に幅の狭い陸が存在(南北方向)

(c) EqPas:

(b) の陸に境目あり(赤道)

(d) Drake:

(b) の陸に境目あり(南半球高緯度)

[Enderton and Marshall(2009) Fig. 2]

# 大気・海洋結合モデル

- M.I.T General Circulation Model(MITgcm) (Masrshall et al. 1997 他)
- 気候計算に適した, モデルの複雑さの選択する
  - 大気モデル
    - 支配方程式: 静力学プリミティブ方程式
    - 解像度: 水平格子点 C32(280 km 間隔), 鉛直層数 5 層
    - 物理過程: SPEEDY(Molteni, 2003)
      - 4 バンド放射スキーム, 湿潤対流パラメタリゼーション, 境界層スキーム 他

# 大気・海洋結合モデル

- MITgcm (Masrshall et al. 1997 他)
  - 海洋モデル
    - 支配方程式: 静水圧ブジネスク方程式
    - 解像度: 水平格子点 C32(280 km 間隔), 鉛直層数 15 層
    - 物理過程
      - diapycnal 混合
      - 地衡流渦パラメタリゼーション(Gent and McWilliams, 1990)
      - 対流パラメタリゼーション (Klinger et al. 1996)
      - 海底摩擦(線形): 深部で帯状順圧流がゼロになるよう調整
  - 海氷モデル
    - 2 層熱力学海氷モデル (Winton, 2000)

# その他の設定について

- 強制

- 軌道と関係した強制, CO<sub>2</sub> 濃度は, 現在の値を用いる
  - 季節サイクルは表現されるが, 日変化は存在しない.

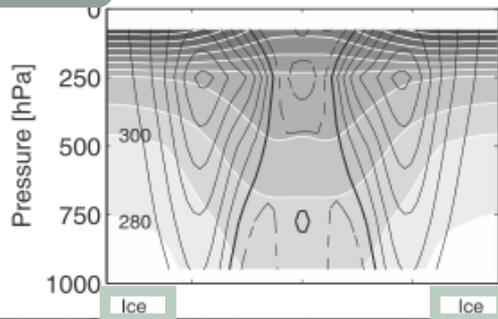
- 計算

- 初期条件: 静止状態, 温度や塩分は気候値の東西平均
- 準平衡状態に達するまで, 時間積分する.
  - 5000 年間の積分が必要.
  - 以後示す図は, 準平衡状態に達した後の結果を, 20 年間平均したものである.

# \* 大氣大循環

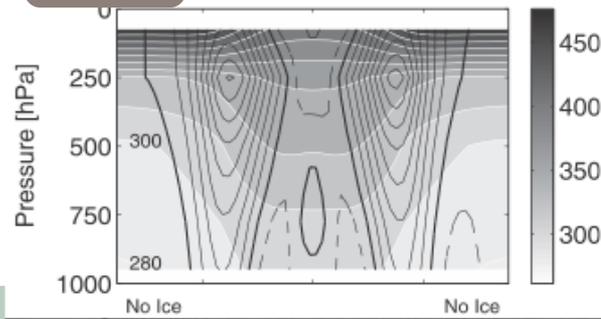
# Aqua

(a) Aqua,  $\theta$  and U



# Ridge

(b) Ridge,  $\theta$  and U

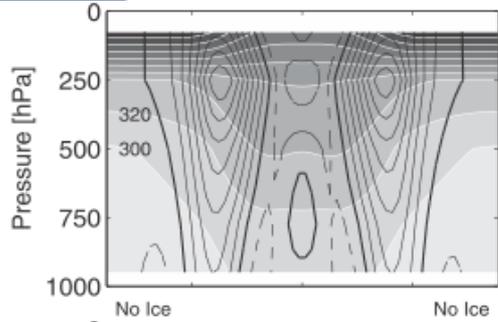


# 気候状態

- Aqua: 両極域に氷冠
- Ridge, EqPas: 氷冠無し
- Drake: 南半球極域にのみに氷冠

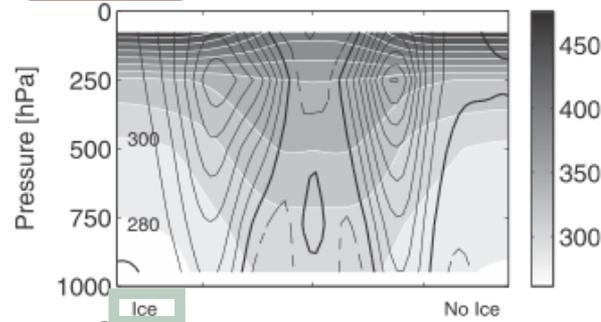
# EqPas

(c) EqPas,  $\theta$  and U

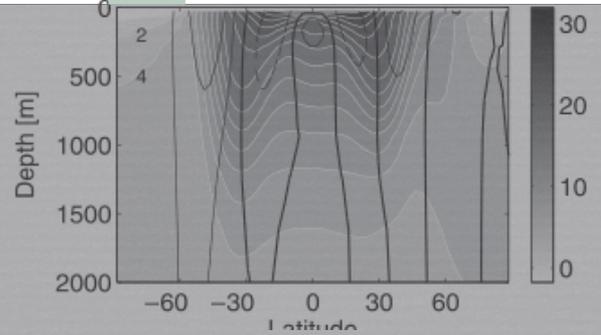
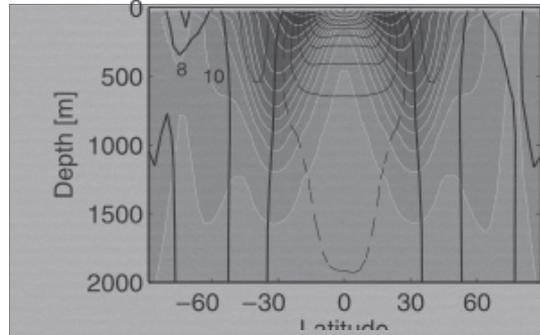


# Drake

(d) Drake,  $\theta$  and U

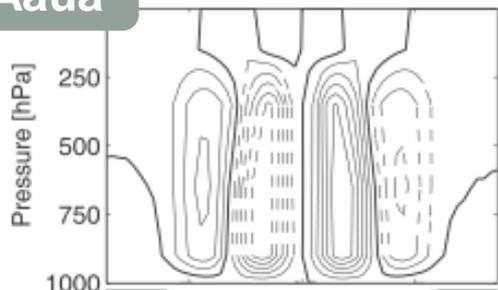


- 大気大循環
  - 基本的には、現在の気候の大気大循環と類似
  - 東西風、温度の子午面分布
- 氷冠が存在しない場合は、高緯度の地上風は東向き。



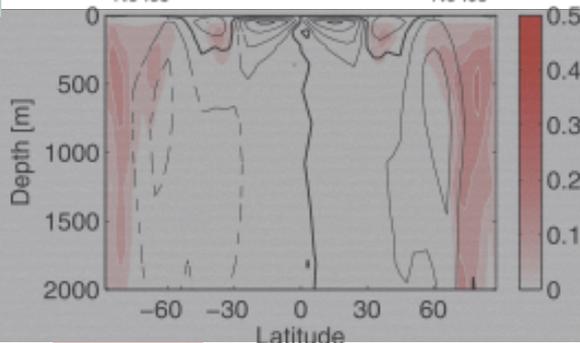
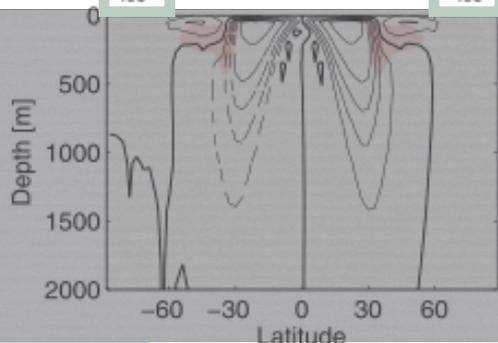
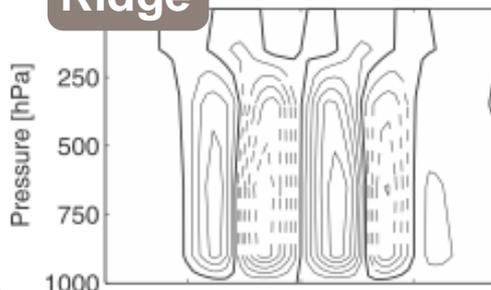
Aqua

(a) Aqua



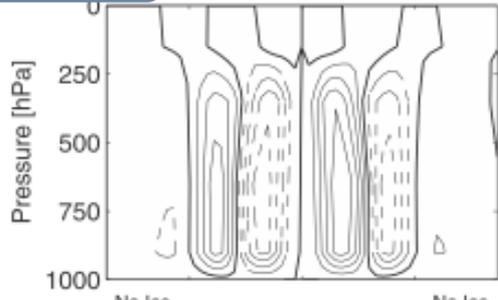
Ridge

(b) Ridge



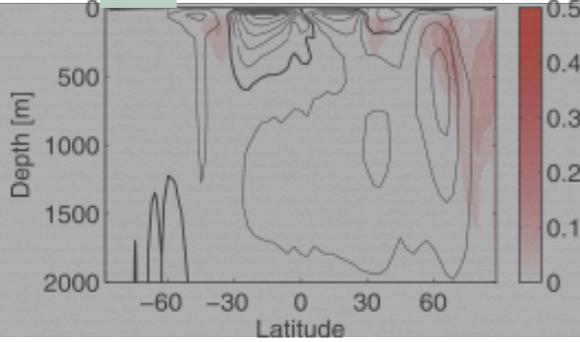
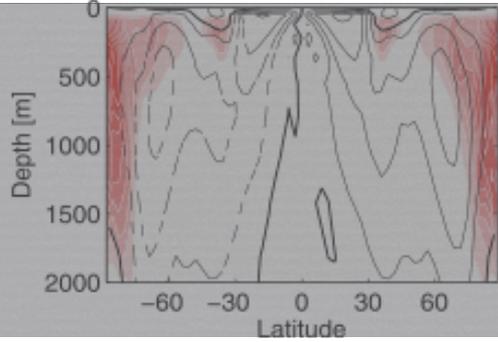
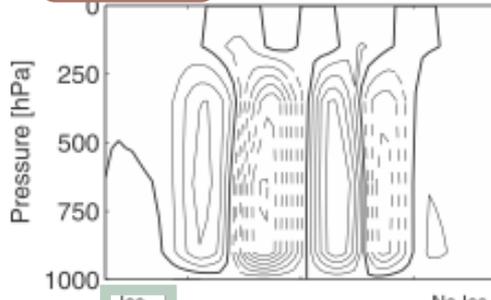
EqPas

(c) EqPas



Drake

(d) Drake



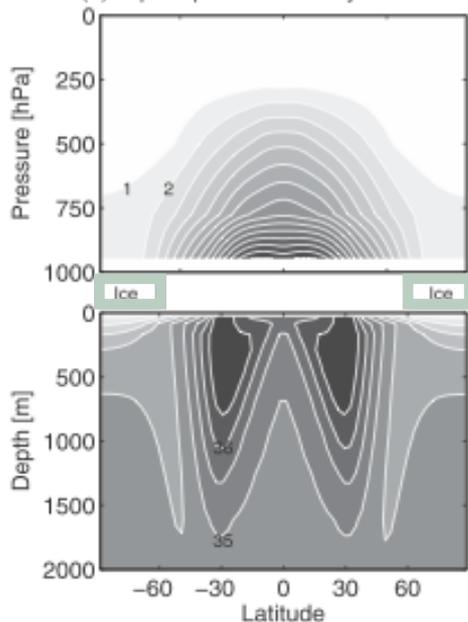
- 大気大循環
- 子午面循環

- 氷冠が存在しない場合は高緯度に弱い循環セルがある。

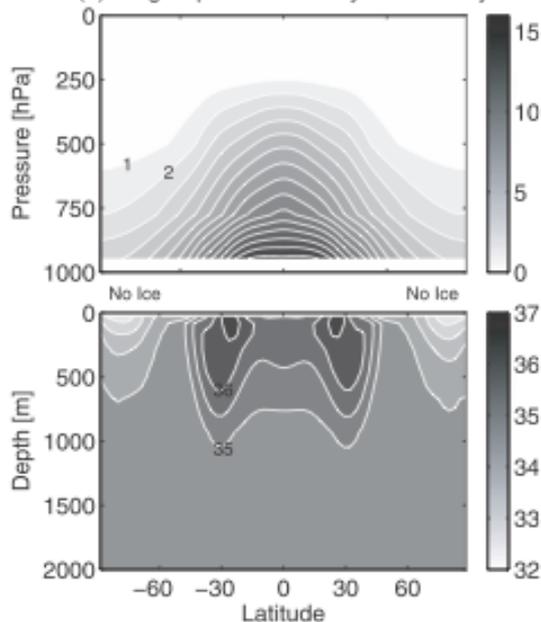
Aaqa

Ridge

Aqua Specific Humidity and Salinity



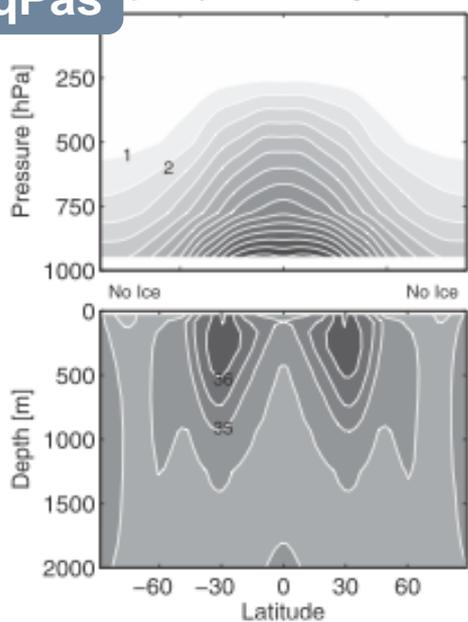
Ridge Specific Humidity and Salinity



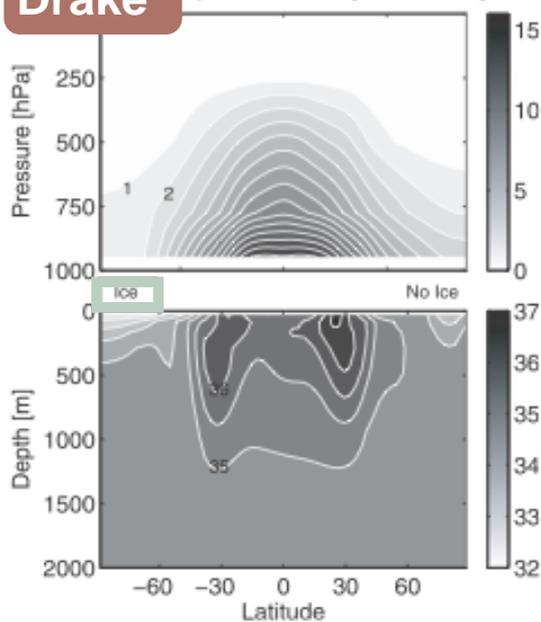
EqPas

Drake

EqPas Specific Humidity and Salinity



Drake Specific Humidity and Salinity



# 大気大循環

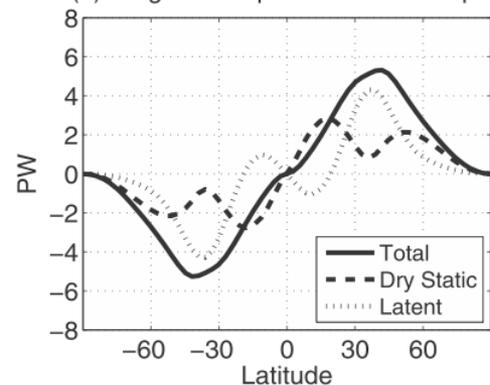
- 湿度の子午面分布
- (塩分の子午面分布)
- Ridge: “salt lens”

# 大気大循環: 南北熱輸送 1

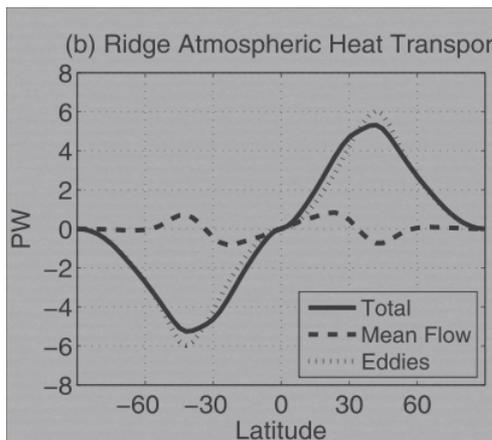
## 潜熱 vs. 乾燥静的エネルギー

Ridge

(a) Ridge Atmospheric Heat Transport

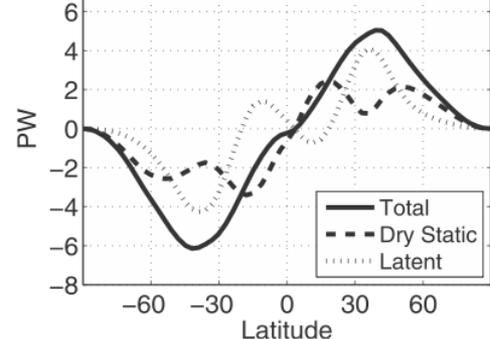


(b) Ridge Atmospheric Heat Transport

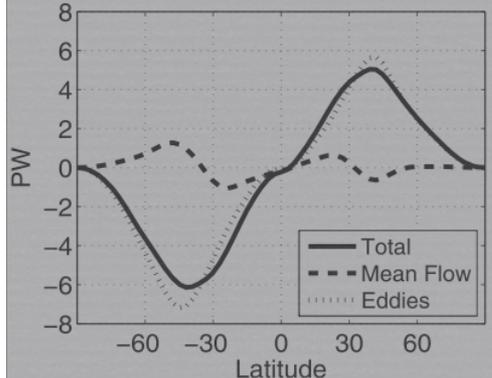


Drake

(c) Drake Atmospheric Heat Transport



(d) Drake Atmospheric Heat Transport



• 4種類の設定間でおおよそ同じ構造をもつ。

• 潜熱輸送

- 低緯度: 赤道向き(最大 ~1PW at 10°)
- 中緯度: 極向き(最大 ~4PW at 38°)

• 乾燥静的エネルギー

- 全緯度で極向き
- 熱帯と中緯度にピーク

• 再解析データ(Pierrehumbert, 2002) と整合的

• 50°で南北熱輸送の分配が等分

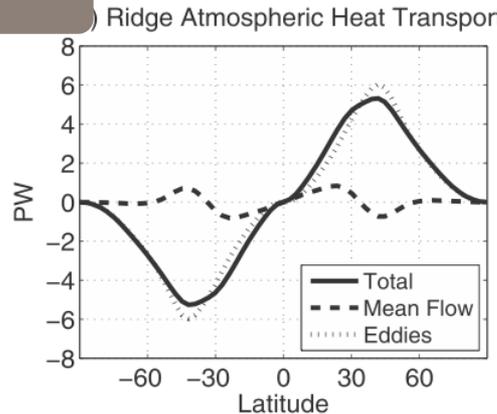
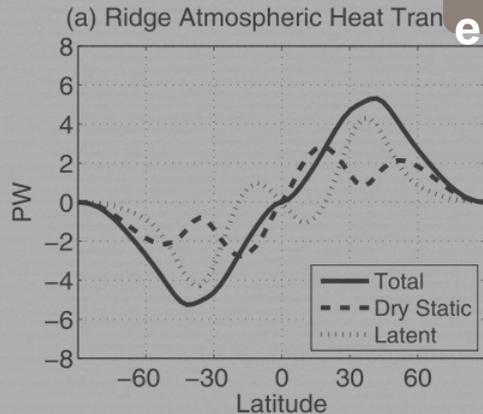
• 気候の理想化実験(O'Gorman and Schneider, 2008)の結果と整合的

# 大気大循環: 南北熱輸送 2

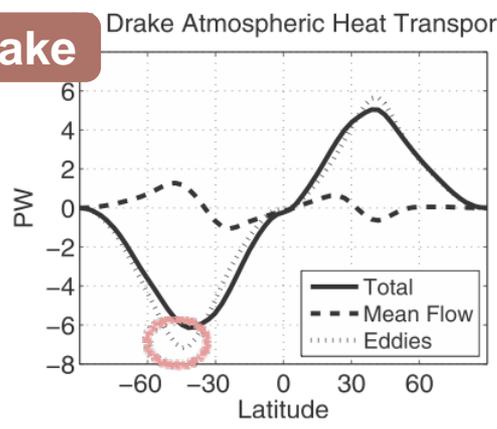
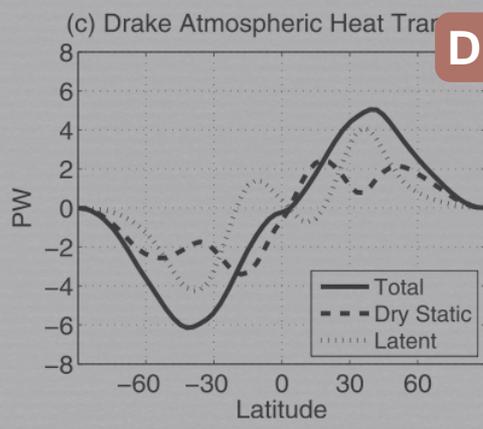
## 平均流 vs. 渦

Ridge

e



Drake



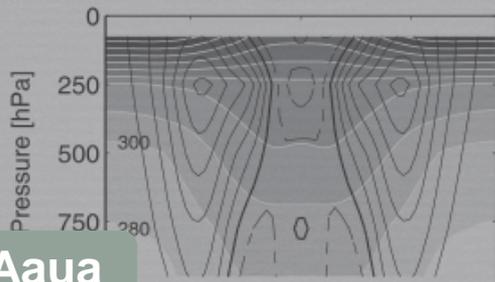
- 4種類の設定間でおおよそ同じ構造をもつ。
- 全ての緯度において、渦による熱輸送が卓越する。
- 子午面循環による熱輸送の寄与はかなり小さい。
- Drakeの南半球中緯度
  - 渦による熱輸送が Ridge よりも  $\sim 1\text{PW}$  増加
  - $H_0$  は Ridge より減少するのにも、HTが増加する要因

# \* 海洋大循環

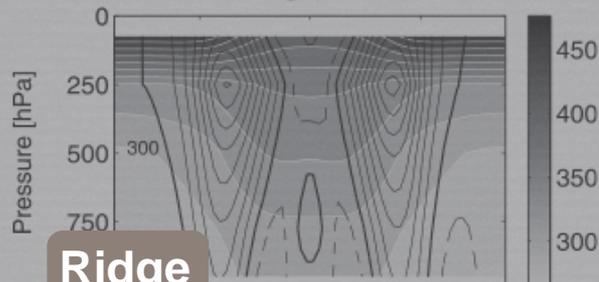
Aqua: スベルド  
ラップ・バランス  
スできない

- 帯状的な海流
- 温度躍層は深部まで
- Ridge: スベルド  
ラップ・バランス
- 環流(次スライド)
- 赤道潜流あり
- 温度躍層は表層に制限

(a) Aqua,  $\theta$  and U

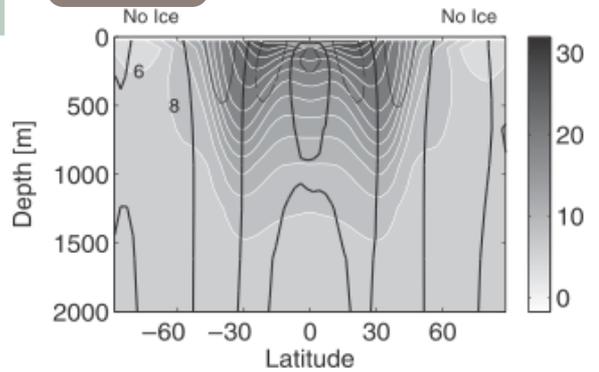
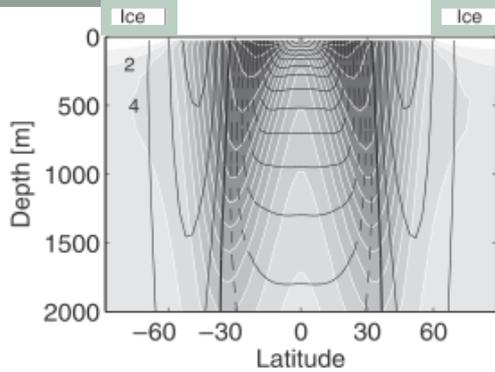


(b) Ridge,  $\theta$  and U

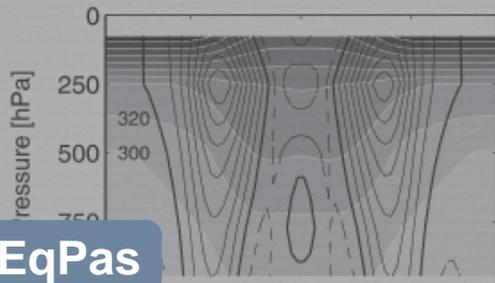


Aqua

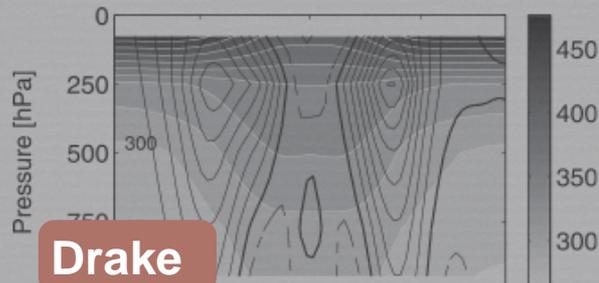
Ridge



(c) EqPas,  $\theta$  and U

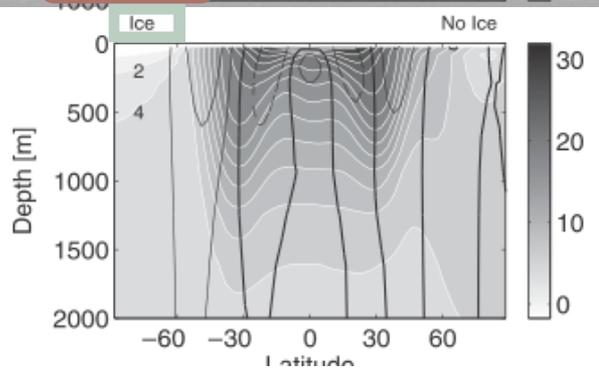
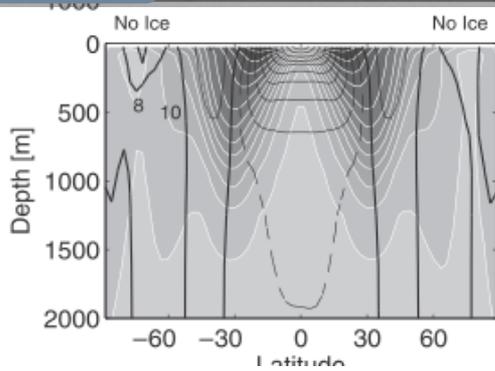


(d) Drake,  $\theta$  and U



EqPas

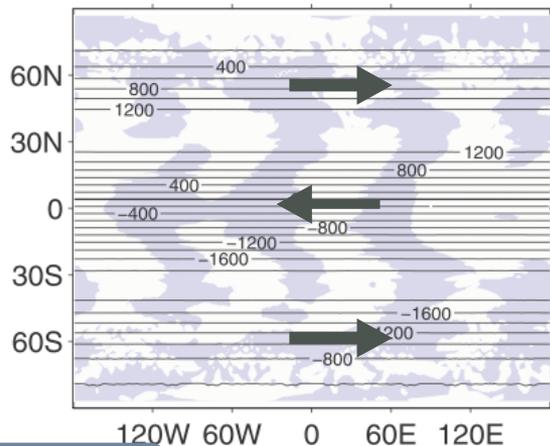
Drake



# 海洋大循環: 鉛直平均

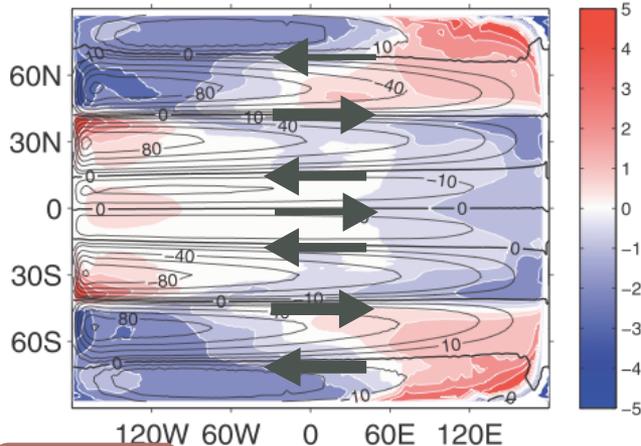
## Aqua

(a) Aqua



## Ridge

(b) Ridge



## • Aqua

- 帯状的な海流

## • Ridge

- 環流

- 西岸境界流

- 赤道潜流

## • EqPas

- 環流

- 赤道は強い西向きの流れ

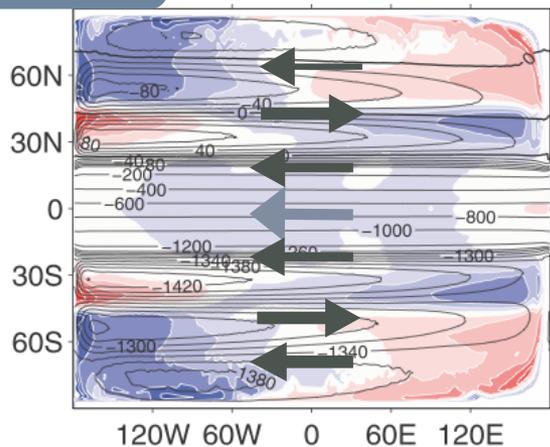
## • Drake

- 環流

- 南半球高緯度は強い東向き  
の流れ ~ 南極周回流と類似

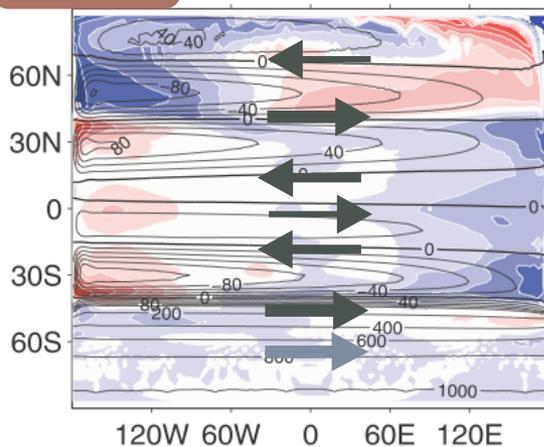
## EqPas

(c) EqPas



## Drake

(d) Drake

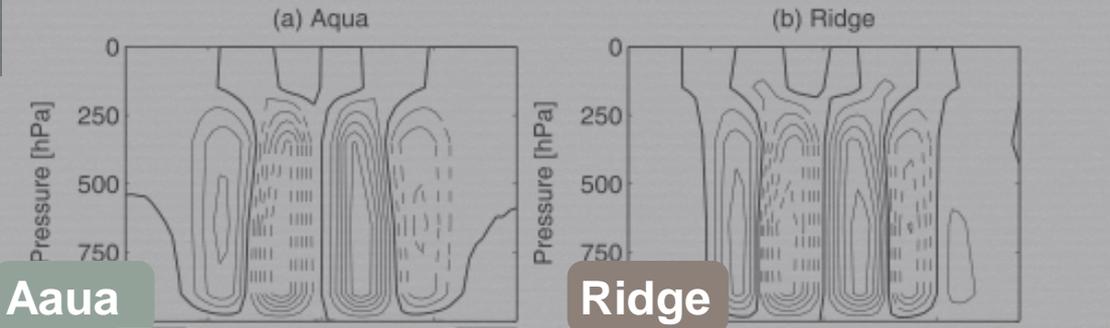


# Aqua

- 亜熱帯の強い残差セルの two "lens" 構造

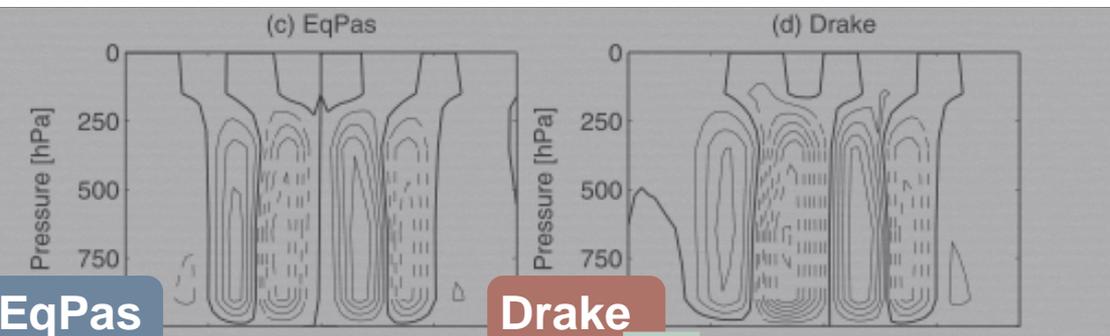
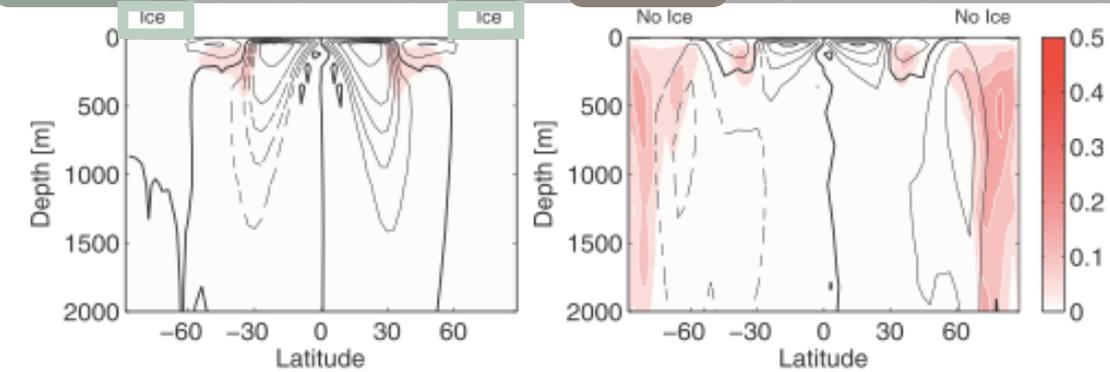
- Ridge: スピルドラ
- 弱く浅い
- 中・高緯度: 深い
- 極域で深い対流が発生

- EqPas
- 亜熱帯残差セル
- 赤道まで及ぶ深い
- 赤道非対称性が強い



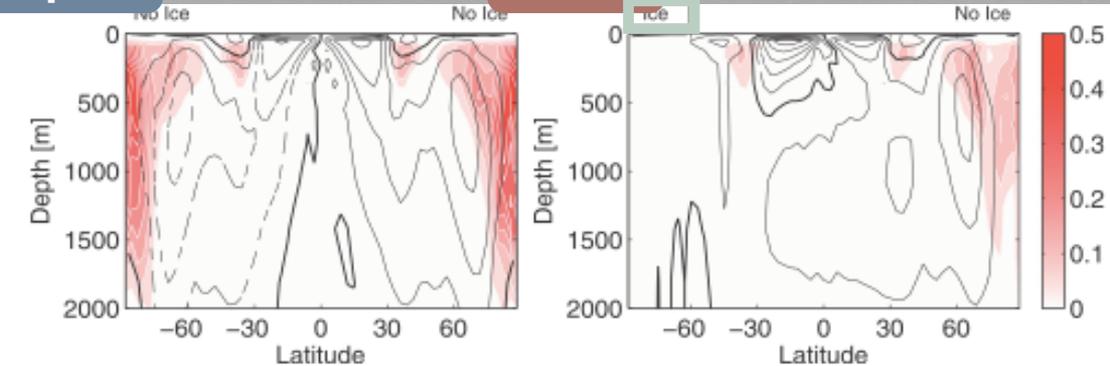
Aqua

Ridge



EqPas

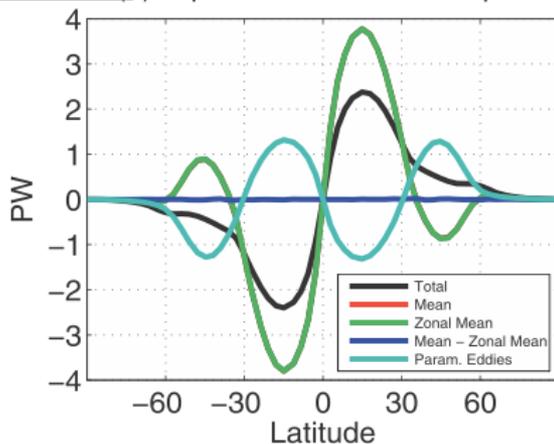
Drake



# 海洋大循環: 南北熱輸送 1

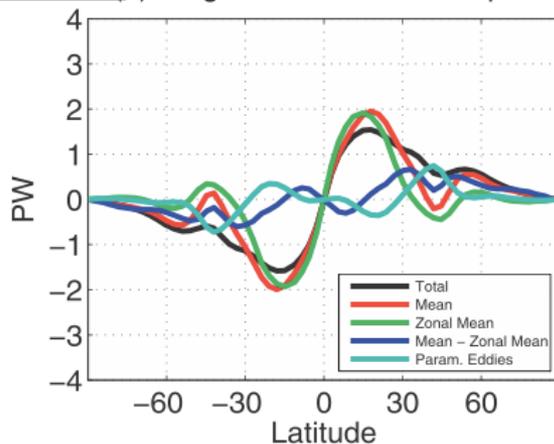
Aqua

Aqua Ocean Heat Transport



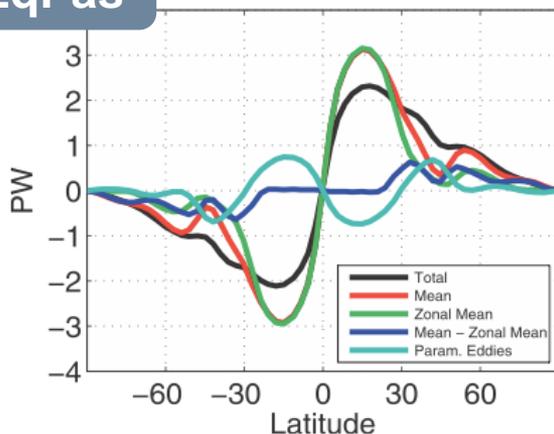
Ridge

Ridge Ocean Heat Transport



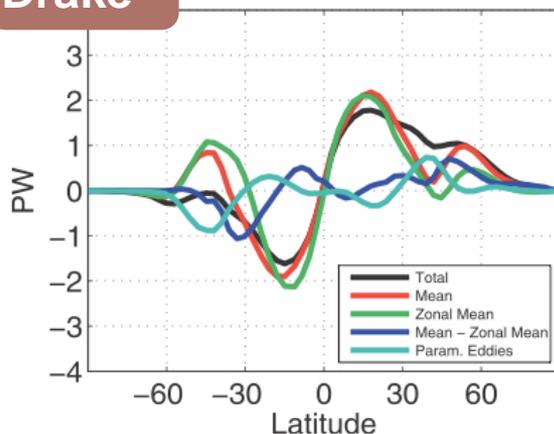
EqPas

EqPas Ocean Heat Transport



Drake

Drake Ocean Heat Transport



## • Aqua

- 低緯度: Mean 卓越. Eddy が一部を相殺
- 中緯度: Eddy と Mean が互いを相殺
- 高緯度 (>50°): 0.35 PW 以下

## • Ridge

- 低緯度: 亜熱帯セル弱く, 環流の熱輸送は赤道向き => 合計は Aqua より減少
- 中, 高緯度: 環流の熱輸送は極向き
- 高緯度: 70° まで 0.5 PW 以上

# 本研究の目的

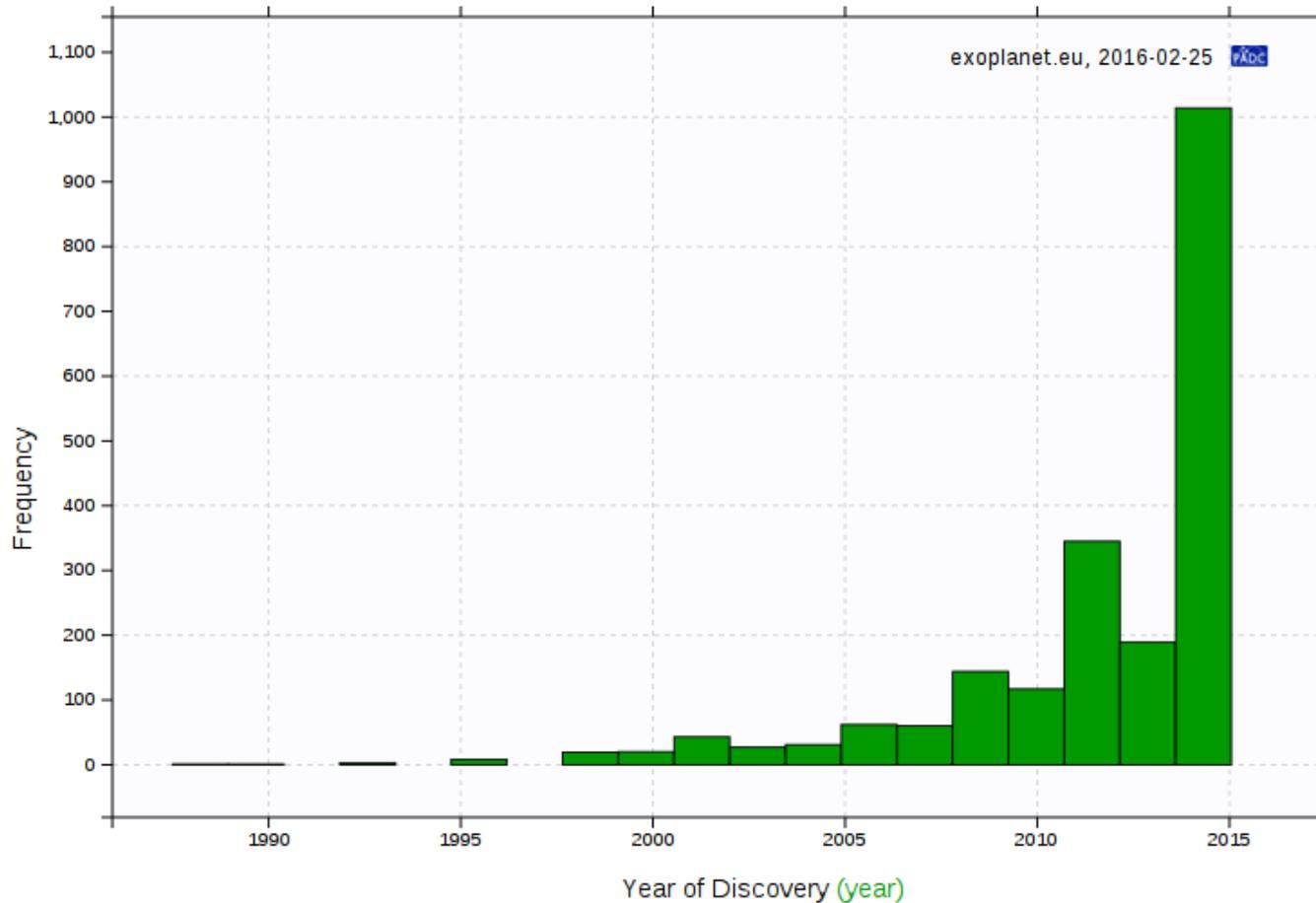
---

---

## 研究の背景と目的

# 系外惑星

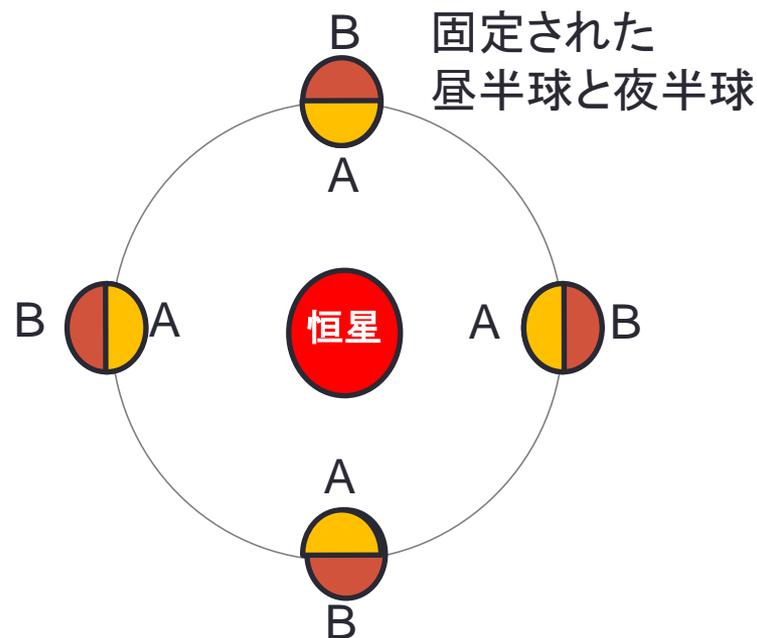
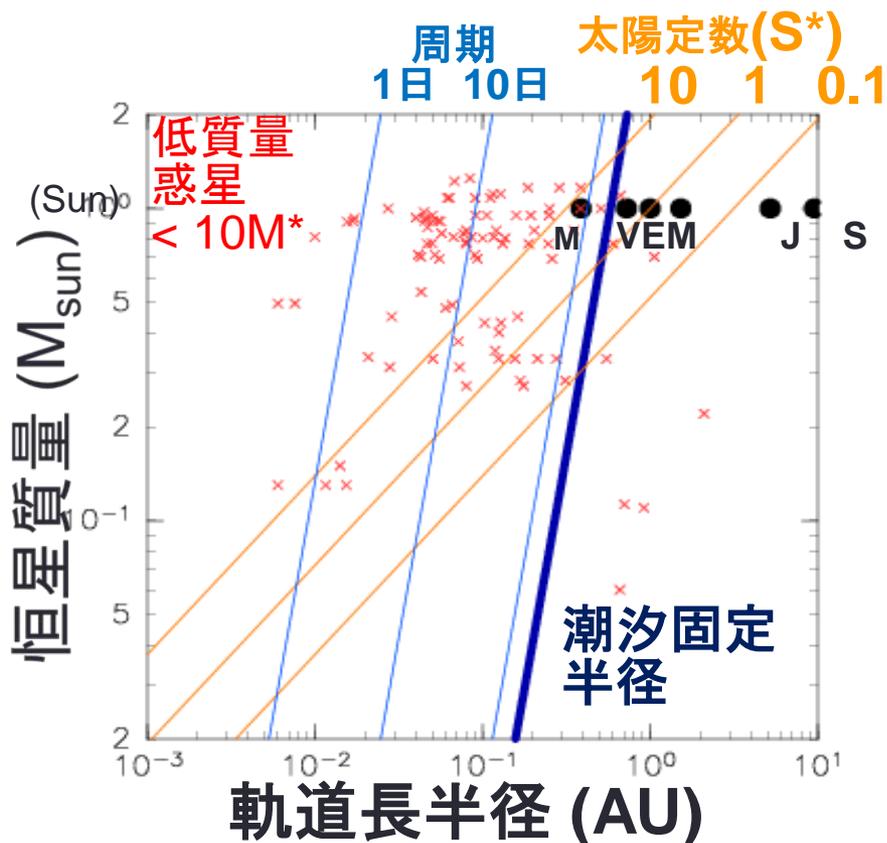
- 系外惑星の発見数は着々と増加



<http://exoplanet.eu/diagrams/?t=h>

# 同期回転惑星

- 低質量の系外惑星の多くは潮汐固定
  - 固定された昼半球と夜半球が存在する世界
- その中には地球型の惑星もあるかもしれない
  - 新たな気候の研究対象の出現



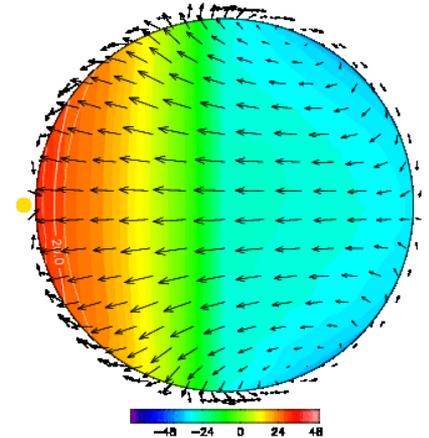
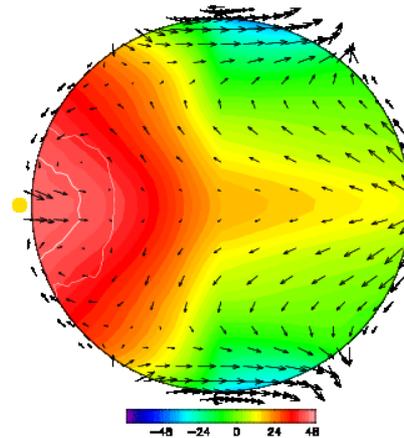
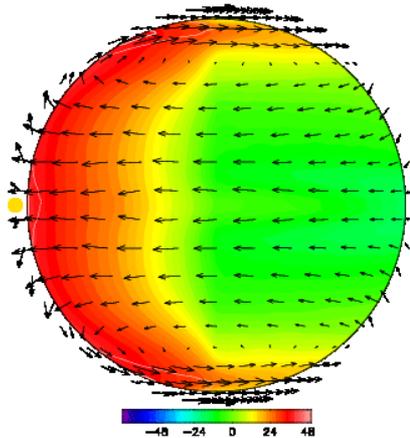
# 大気状態の例

365日平均場

$\Omega^*=1.0, S^*=1.46$

$\Omega=0.5, S^*=1.17$

$\Omega=0.1, S^*=1.0$



黄色丸:  
恒星直下点

色: 表面温度  
矢印: 大気最下層水平風  
等値線: 降水



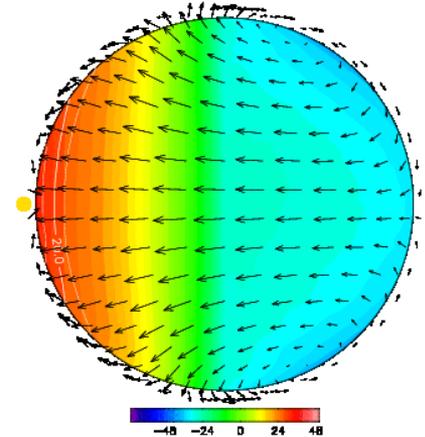
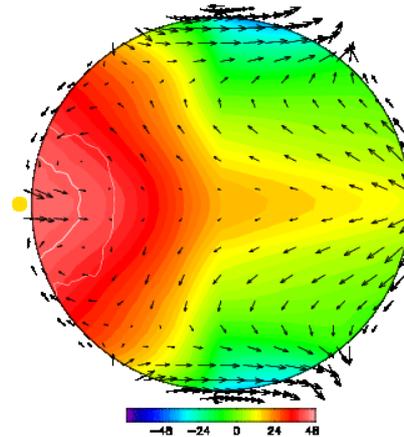
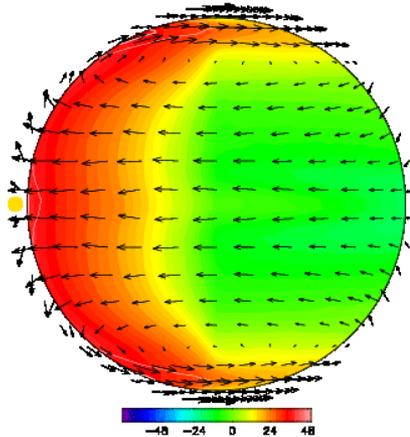
# 大気状態の例

365日平均場 視点を変更(周回船観測のイメージ)

$\Omega^*=1.0$ ,  $S^*=1.46$

$\Omega=0.5$ ,  $S^*=1.17$

$\Omega=0.1$ ,  $S^*=1.0$



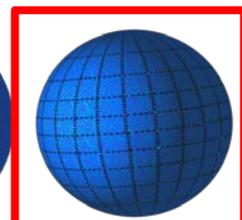
黄色丸:  
恒星直下点

色: 表面温度  
矢印: 大気最下層水平風  
等値線: 降水



# はじめに: 研究背景

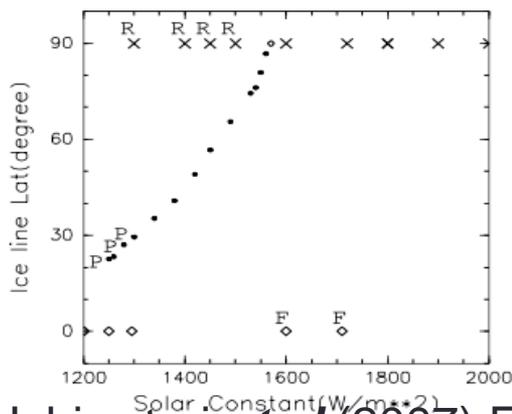
- 系外惑星の気候の多様性を探索するために, これまで大気大循環モデルを用いて, 系外惑星で実現される様々な気候が調べられてきた.
- その中で, 全球海洋に覆われた惑星(水惑星) における気候の研究が行われてきた.
  - 地球と似た惑星 (Ishiwatari *et al.*, 2007(以後 107) 等)
  - 同期回転惑星 (Joshi *et al.*, 2003 等)
- これらの研究では, 海洋大循環は全く考慮されなかった.
  - しかし, 海洋熱輸送もまた気候の決定・維持に影響を与え得る.



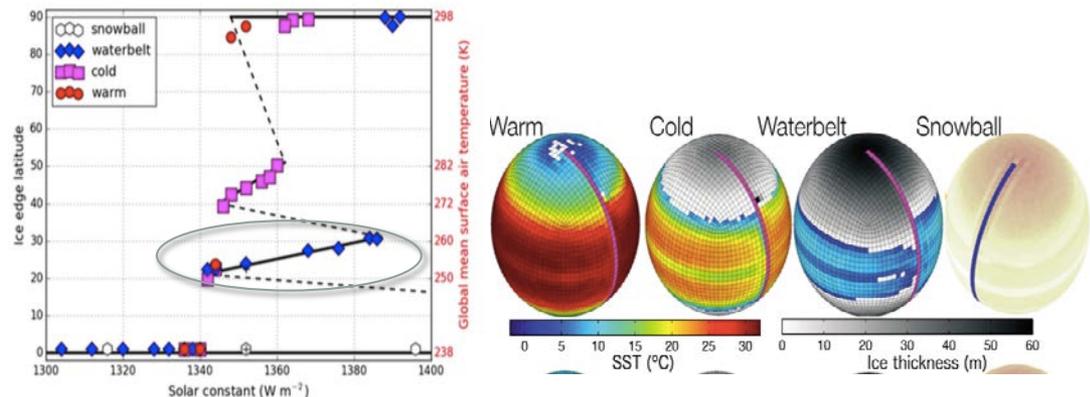
aquaplanet

# はじめに：研究背景

- 近年、海洋大循環を考慮した水惑星の気候研究が行われている。
  - 先駆的研究: Smith *et al.*(2006), Marshall *et al.*(2006)
  - 海洋大循環パターン依存性: Enderton *et al.*(2009) 等
  - 太陽定数依存性: Ferreira *et al.* (2011), Rose *et al.* (2015)
- 海洋熱輸送が水惑星の気候状態決定に重要な役割を果たすことが分かってきた。
  - 例: 巨大な氷冠を伴う安定な平衡解の発見 (Rose *et al.*(2009); Rose *et al.* (2015) )



Ishiwatari *et al.*(2007) Fig.3  
(海洋大循環なし)



Rose *et al.*(2015) Fig.1, Fig 7  
(海洋大循環を考慮)

# 本研究の目的

- 大気海洋海氷結合モデルを開発し, 大気海洋両方の循環を考慮した水惑星の気候状態の探索を行う.
- 本研究では, 特に I07 で行われた水惑星の気候状態の太陽定数依存性の数値実験を再試する.
  - 結合系における水惑星の気候状態の多様性や大気海洋大循環の役割の理解を深める.

# 結合モデルの記述

---

# 結合モデルの記述

## • 大気大循環モデル (DCPAM)

- 力学過程
  - プリミティブ方程式系, spectral Eulerian method
- 放射過程
  - 地球用放射スキーム (Chou et al., 1998; Chou et al., 2001)
- 乱流混合過程
  - Mellor and Yamada (1982) level 2.5 scheme
  - バルク公式 (Belijaars and Holtslag, 1991)
- 凝結過程
  - Relaxed Arakawa-Schubert scheme (Moorthi and Suarez, 1992)
  - 大規模凝結 (Le Treut and Li, 1991)

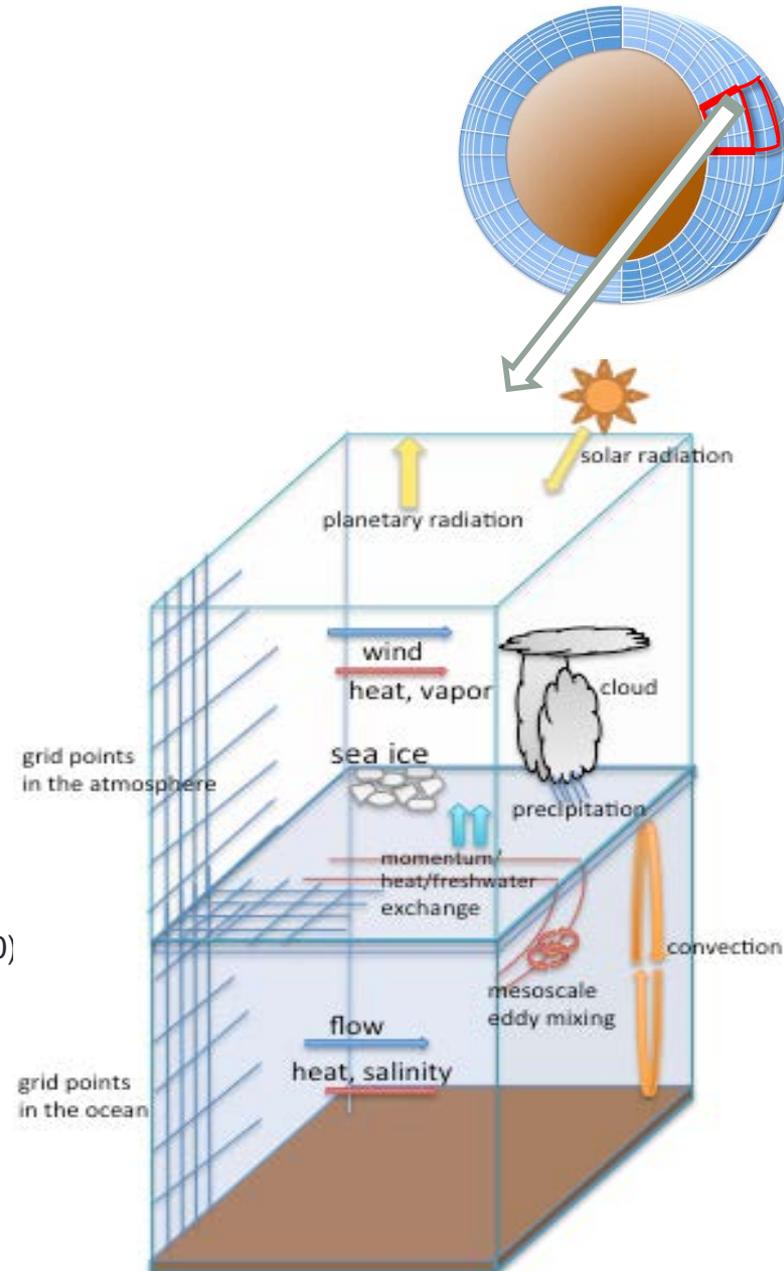
## • 海洋大循環モデル

- 力学過程
  - ブジネスクプリミティブ方程式系, spectral Eulerian method
- 乱流混合過程
  - メソスケール渦による混合 (Redi, 1982; Gent and McWilliams, 1990)
  - 対流調節 (Marotzke, 1991)

## • 海水モデル

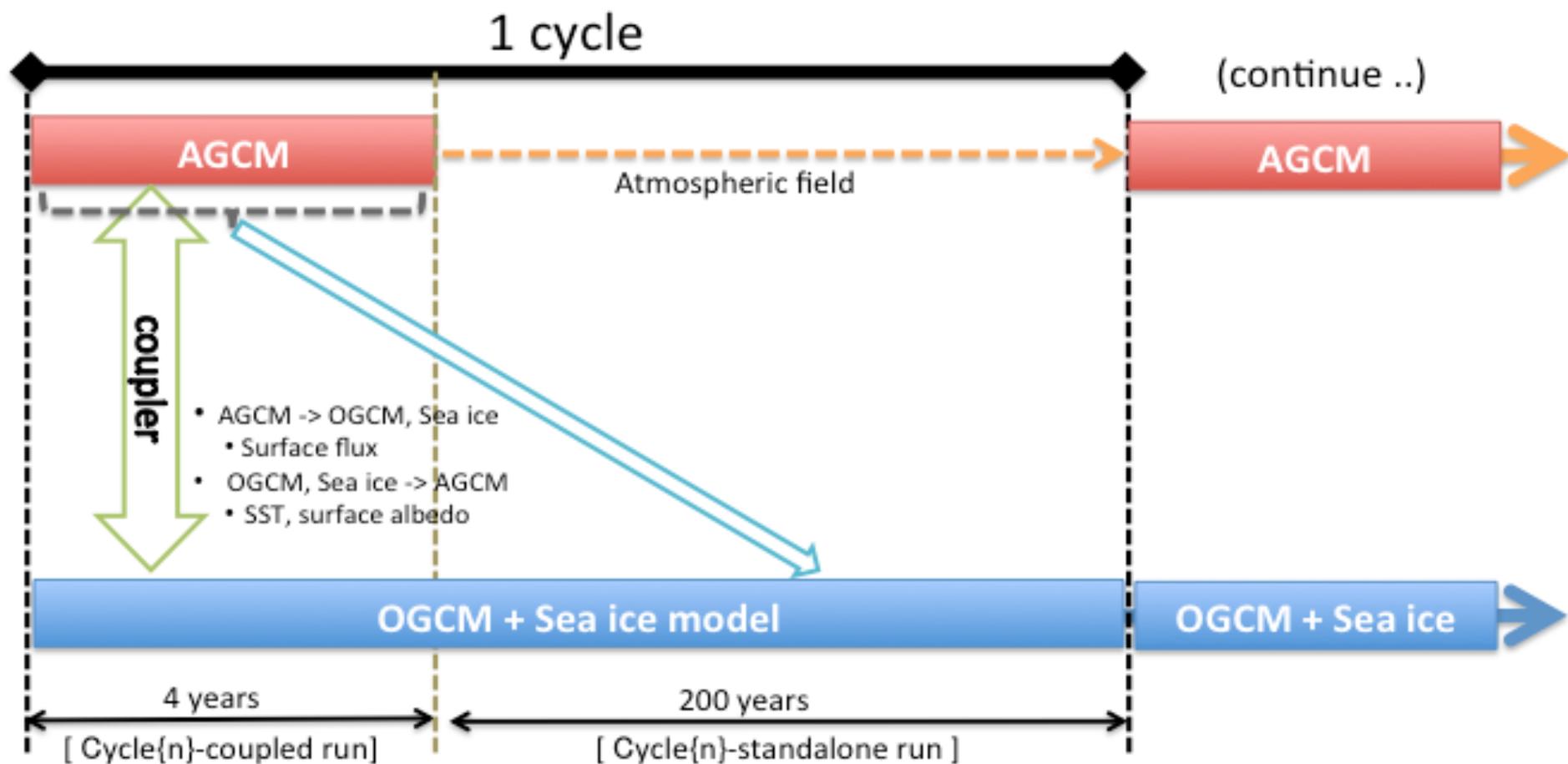
- 熱力学過程
  - 三層モデル (Winton, 2000)

カップラーライブラリ(Arakawa et al. 2011) を用いて, これらのモデルを結合



大気海洋海水結合モデルの模式図

# 結合系の時間積分法



# 結合モデルを用いた 水惑星の気候の数値実験

---

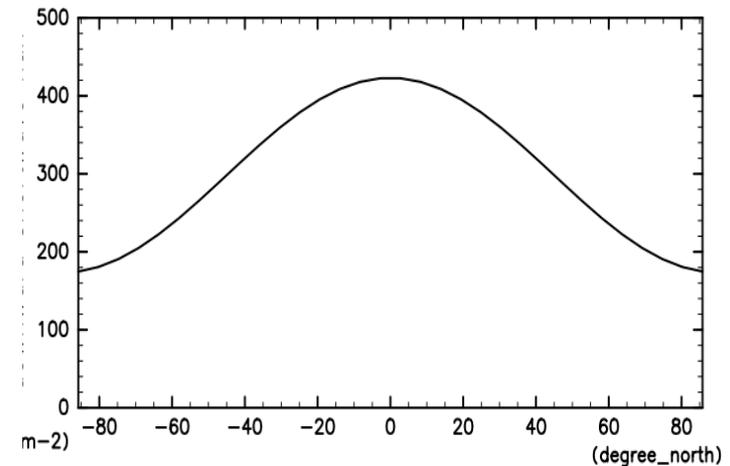
# 水惑星の気候の数値実験

- 目的

- 結合モデルの振る舞いを確認

- 設定

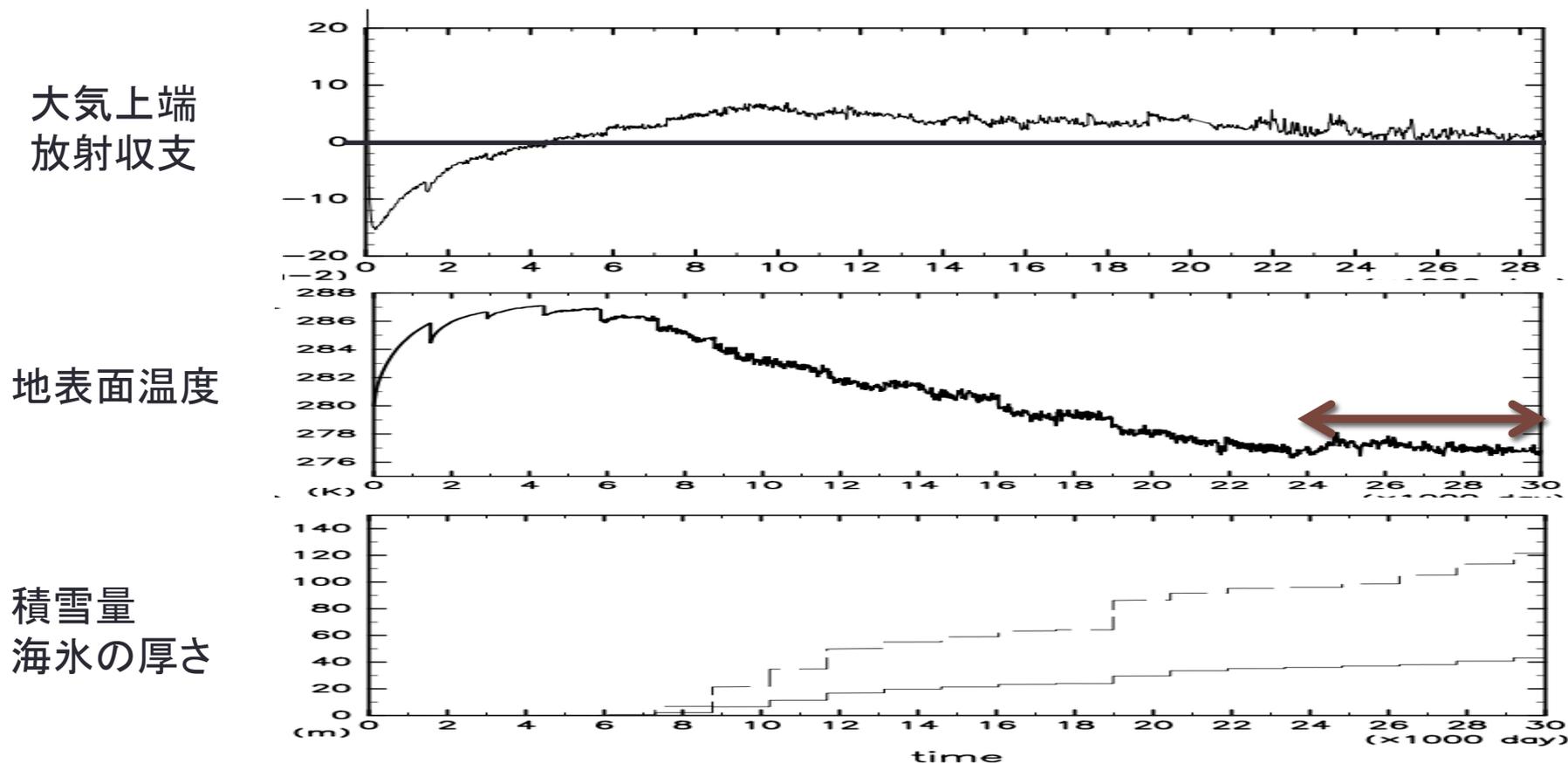
- 惑星パラメータは, 現在地球の値
- 大気モデル
  - 解像度: 水平約  $6^{\circ} \times 6^{\circ}$  , 鉛直 26 層
  - 初期条件: 等温(280 K), 静止
- 海洋モデル
  - 2次元 (東西平均モデル)
  - 解像度: 南北約  $3^{\circ}$  , 鉛直 60 層
  - 初期条件: 等温(280 K), 塩分一様(35 psu), 静止
- 年平均・日平均した入射放射フラックスによって, 結合系を駆動



入射放射フラックスの南北分布(W/m<sup>2</sup>)

# 計算結果: 全球平均値の時系列

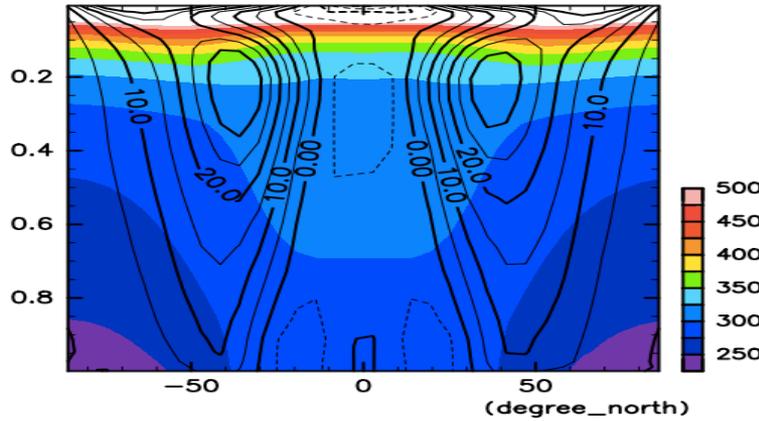
- 初期から 20 サイクル目まで (海洋約 4000 年間積分に相当)



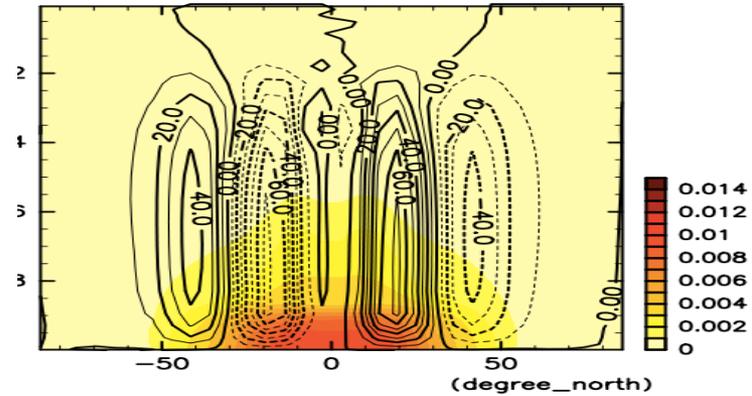
- 長時間積分の後, ようやく落ち着く傾向が見え出した.
- しかし, 海氷の厚さや塩分はまだ増え続けている

# 計算結果: 平均狀態

東西風, 温位

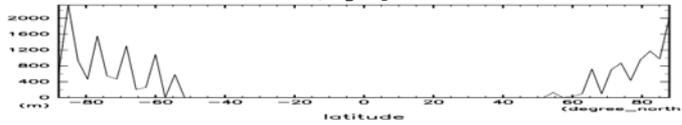


子午面循環, 比湿

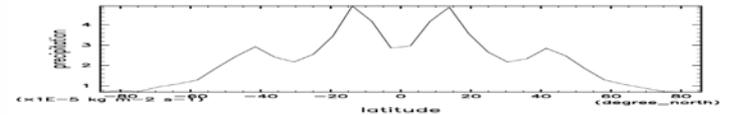


大氣

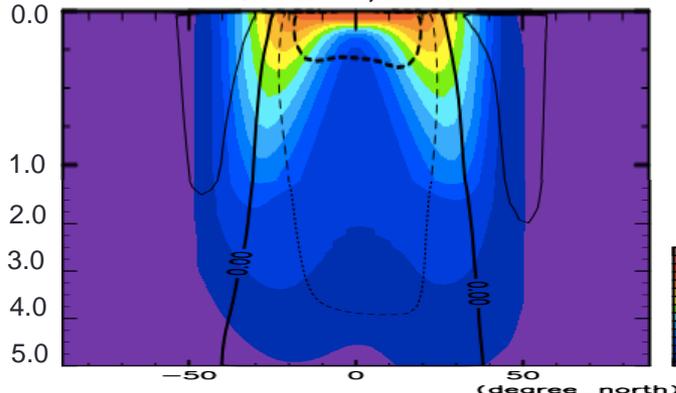
海水



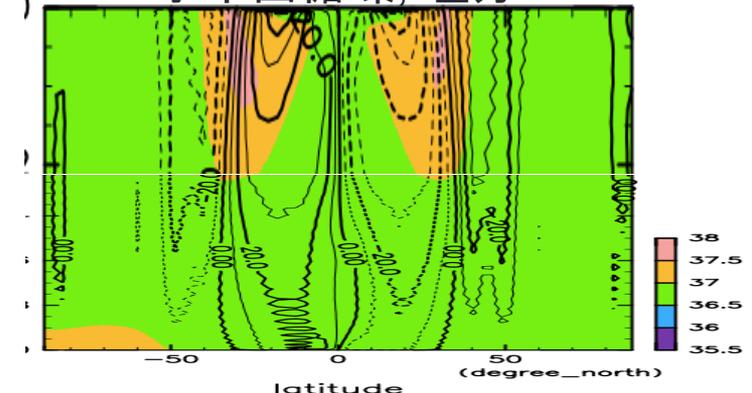
降水量



東西流, 温位



子午面循環, 塩分

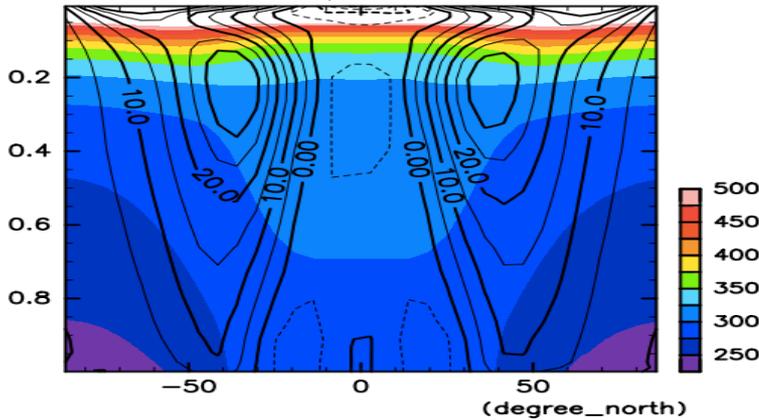


海洋

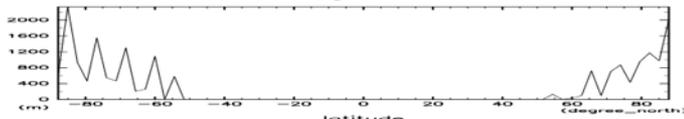
# 計算結果: 平均状態

This study

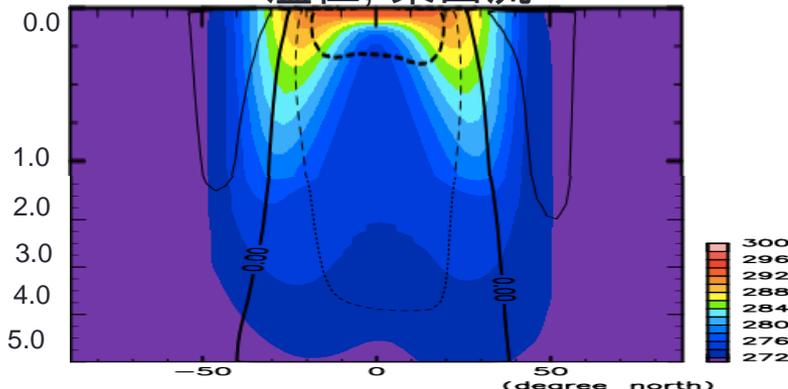
温位, 東西風



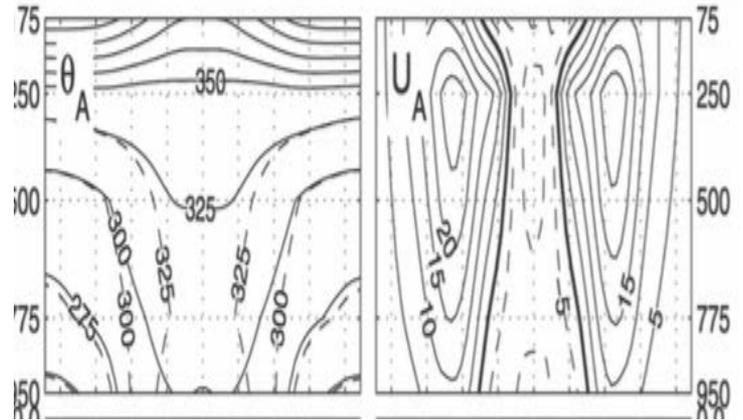
海水



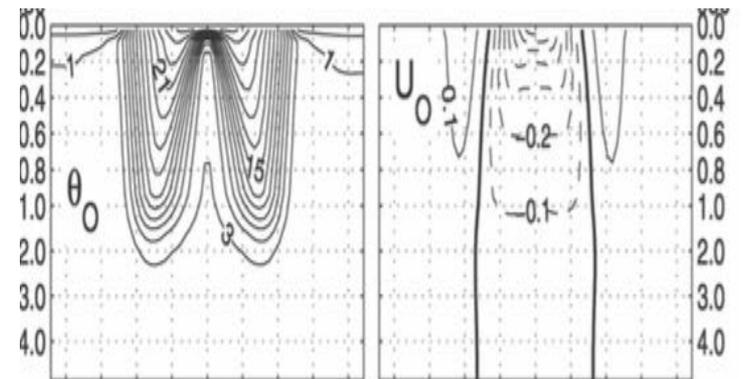
温位, 東西流



Marshall et al. (2007)



0.014  
0.012  
0.01  
0.008  
0.006  
0.004  
0.002  
0



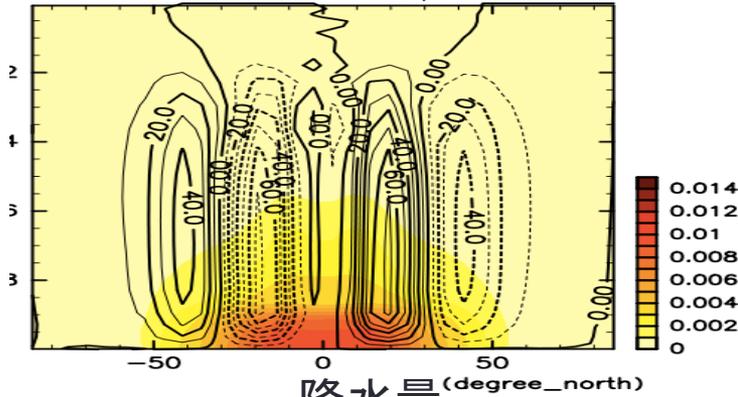
大気

海洋

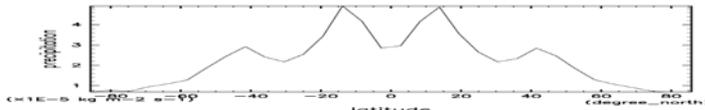
# 計算結果: 平均狀態

This study

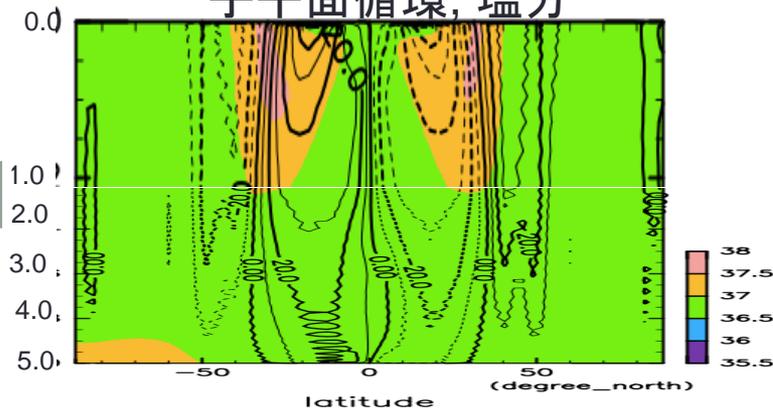
子午面循環, 比湿



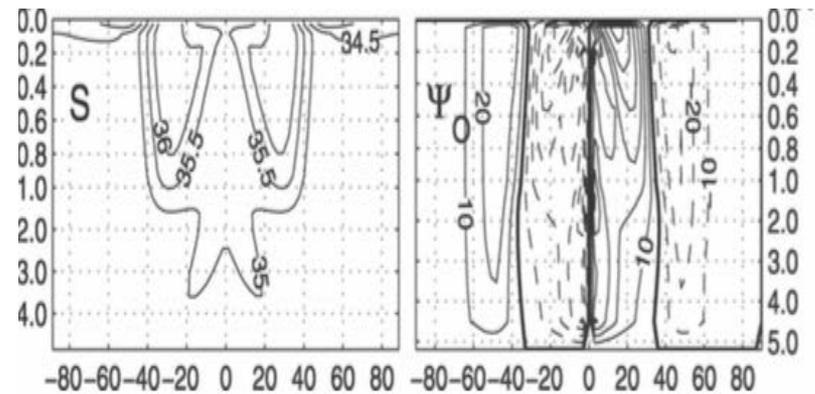
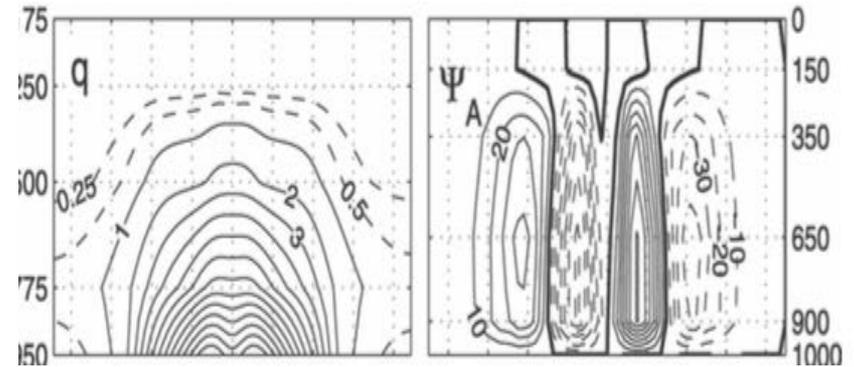
降水量 (degree\_north)



子午面循環, 塩分



Marshall et al. (2007)

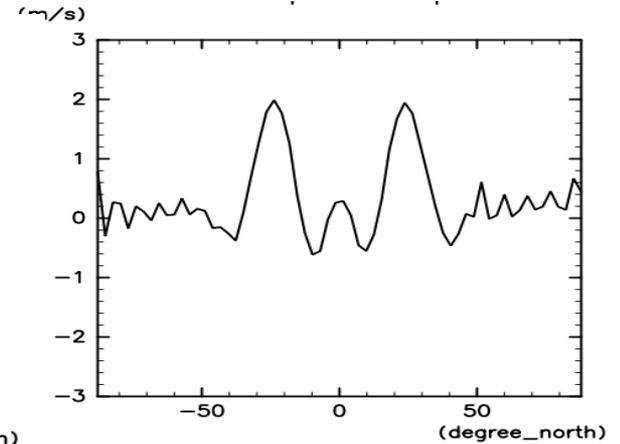
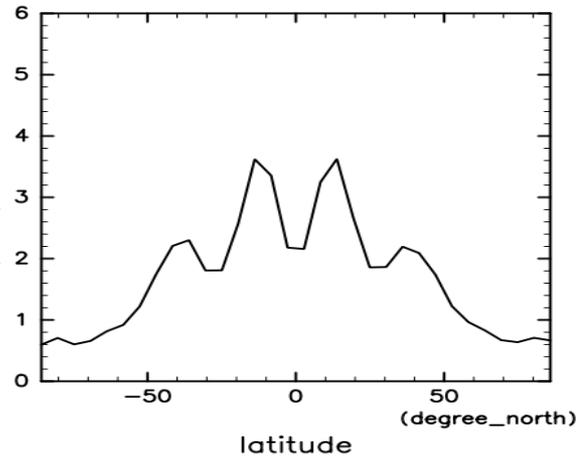
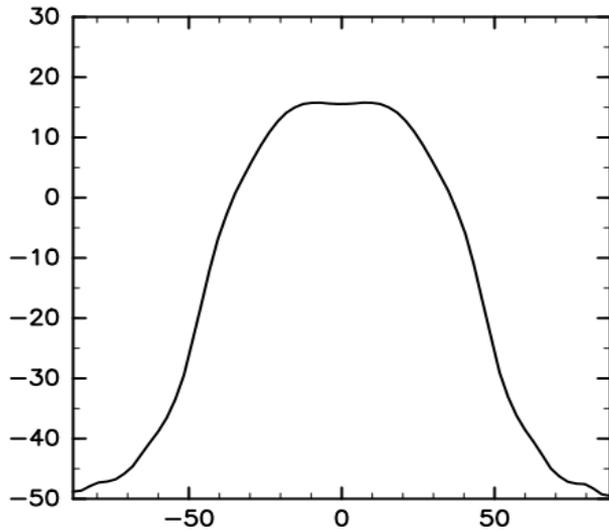


大気

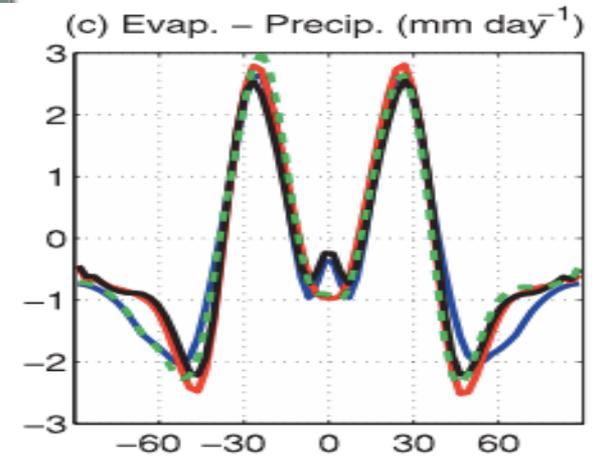
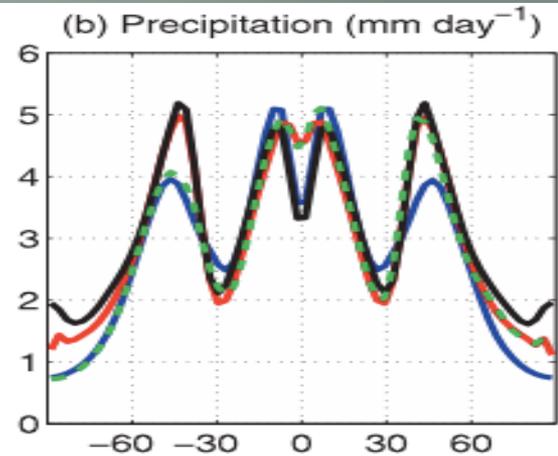
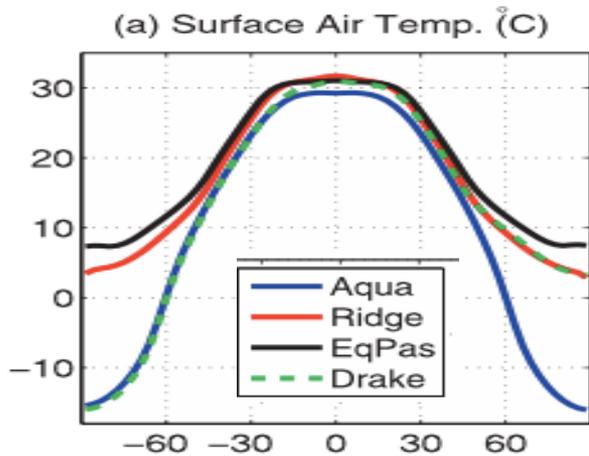
海洋

# 計算結果: 平均状態

This study

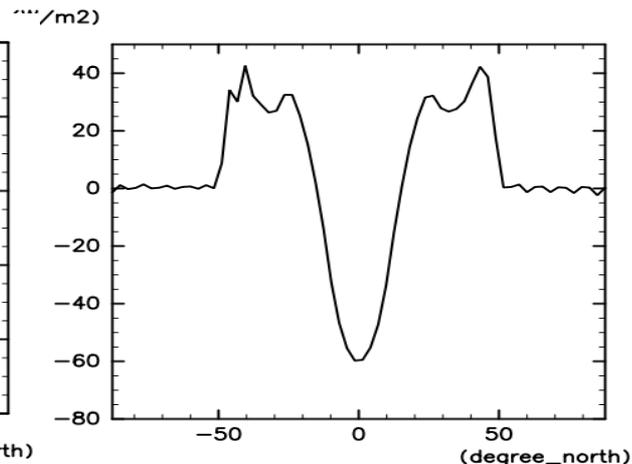
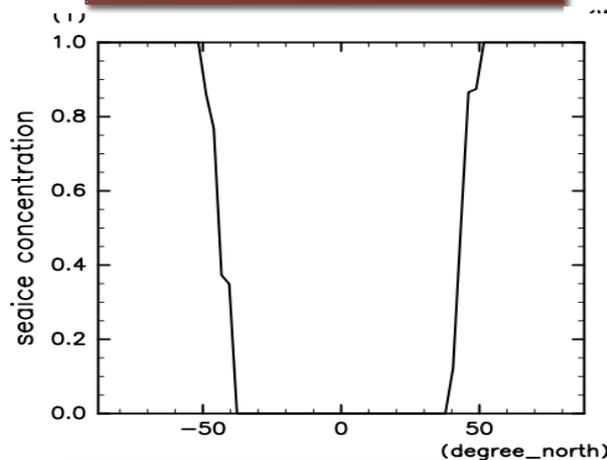
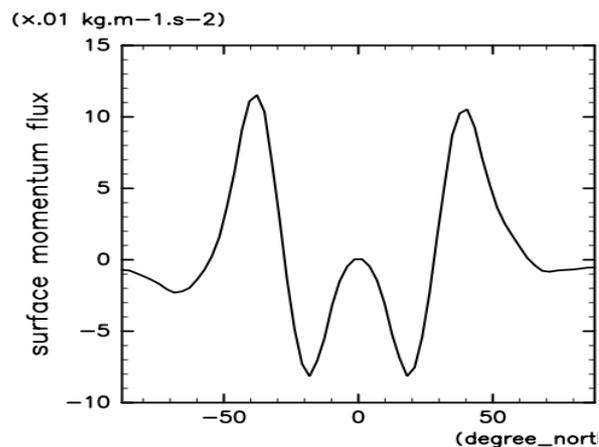


Enderton et al. (2009)

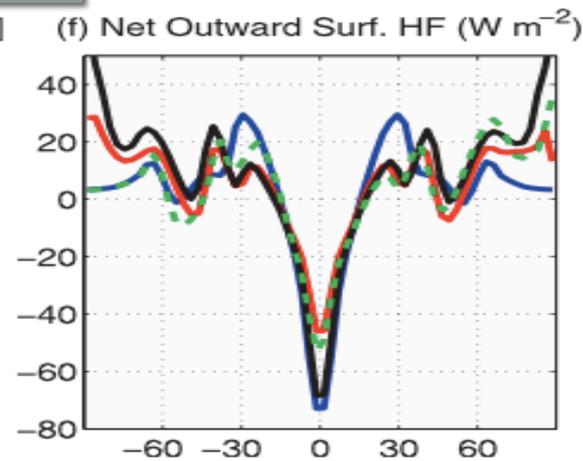
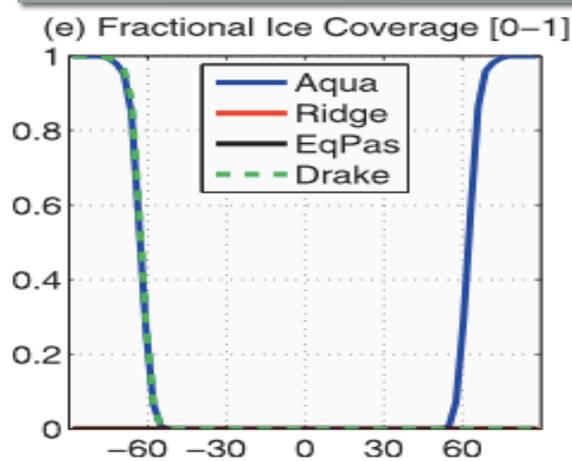
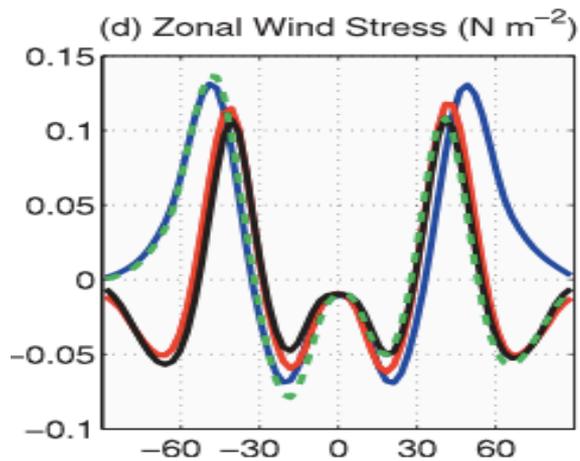


# 計算結果: 平均状態

This study



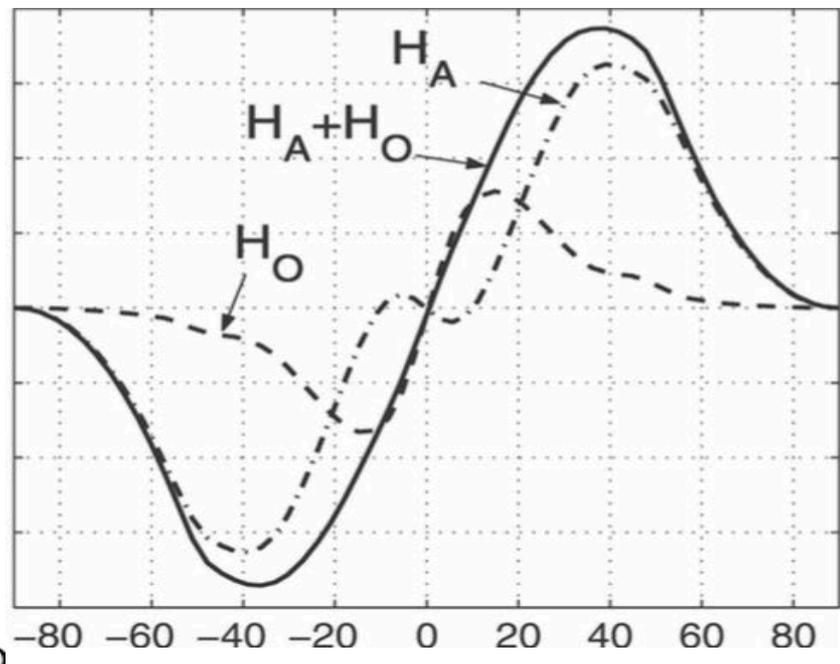
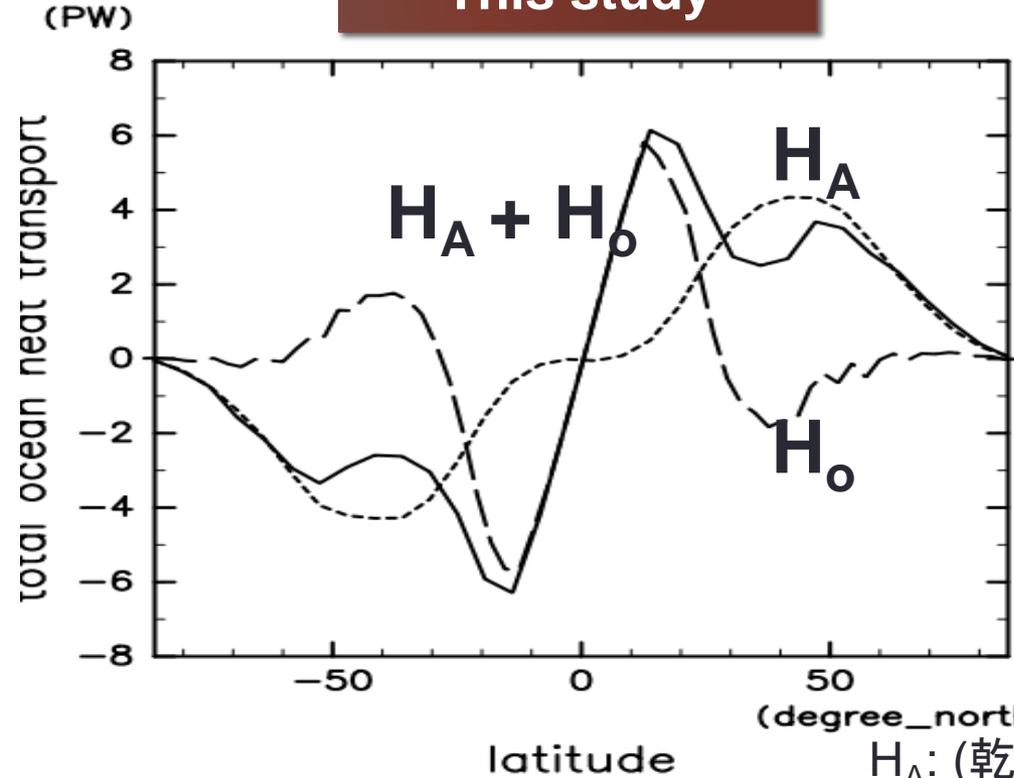
Enderton et al. (2009)



# 計算結果: 大気・海洋大循環の南北熱輸送

This study

Marshall et al. (2007)

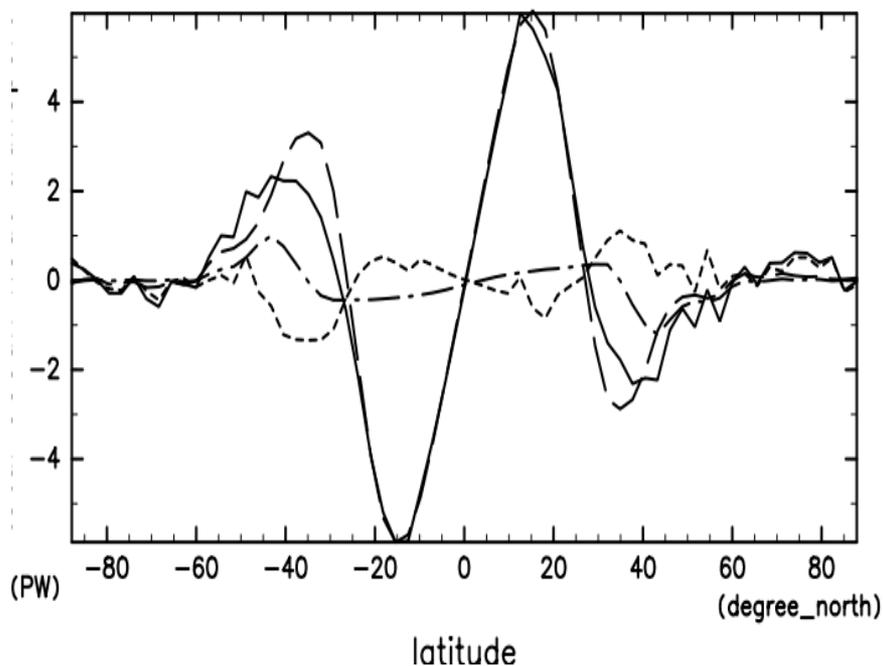


$H_A$ : (乾燥静的エネルギー+湿潤静的エネルギー)\* $v$   
 $H_O$ :  $C_{po} * \Theta * (v + v_{bolus}) +$  拡散フラックス

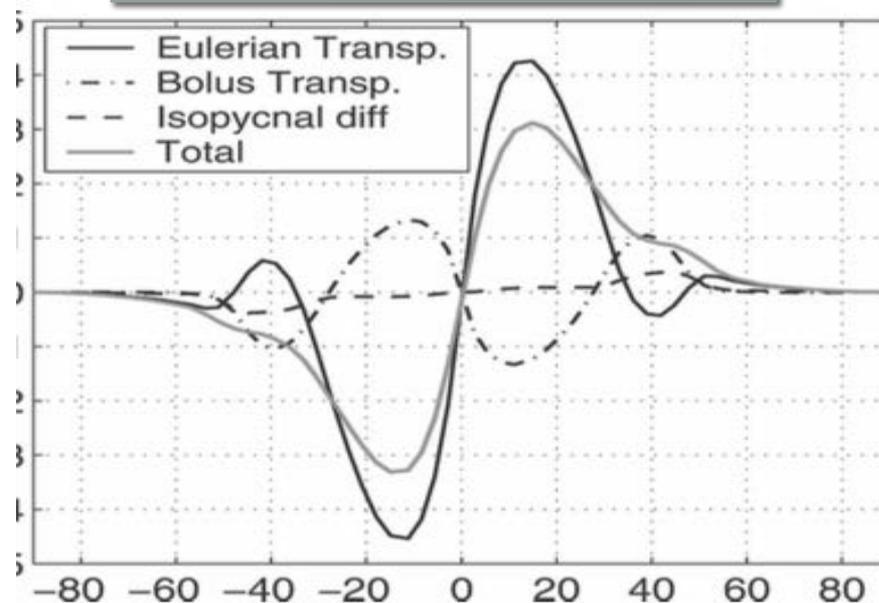
- 合計( $H_A + H_O$ )では, 極大が 2 つあるような分布となった.
  - $H_O$  の輸送の南北分布が関係しているように見える.

# 海洋南北熱輸送の収支

This study



Marshall et al. (2007)



オイラー輸送(破線)  
ボラス輸送(点線)  
等密度面混合(一点破線)  
Total(実線)

- 海洋熱輸送のボラス輸送の寄与が小さい
- 海洋全熱輸送は,子午面循環による熱輸送で大体決まっている.

# 結果の整理

- M07 の結果とよく似た水惑星の大気海洋大循環のパターンが, 定性的には得られた.
- しかし, 結合系全体としてはまだ平衡に達していない.
  - 海氷の厚さが増え続けている.
- 今後の課題
  - 熱収支, 水収支の確認
  - 海氷の取り扱いの再考
    - 海氷の輸送過程
    - 海氷面アルベドのパラメタリゼーション

# まとめ

---

# まとめ

- 大気海洋の両方の循環を考慮した水惑星の気候の探索のために、大気海洋海氷結合モデルを開発している。
  - 今後、太陽定数依存性の調査を行う。
- 現在地球のパラメータを与えた水惑星実験を行った。
  - 長時間積分 (海洋 4000 年積分) 後、定性的には、M07 とよく似た大気海洋大循環のパターンが得られた。
  - 海氷の厚さは依然として増加し続けている。
  - 直近の課題は、結合系の平衡状態を得ることである。

# 議論(聞きたいこと)

---

# 聞きたいこと

- 海洋大循環モデル(氷も?)の検証方法
  - 現実的設定でのフル計算以外に方法はあるのか?
- パラメタリゼーションの検証方法
  - フルモデルに組み込む以外に方法はあるか?
  - たとえばGMスキーム: 渦解像モデルとの比較などは?
- 現在の海洋モデルの困難は?

# 参考文献

- Enderton, D., and J. Marshall, 2009: Explorations of atmosphere–ocean–ice climates on an aquaplanet and their meridional energy transports. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 1593–1611.
- Ferreira, D., Marshall, J., Rose, B., 2011: Climate Determinism Revisited: Multiple Equilibria in a Complex Climate Model. *J. Climate*, **24**, 992–1012.
- Marshall, J., D. Ferreira, J. M. Campin, and D. Enderton, 2007: Mean climate and variability of the atmosphere and ocean on an aquaplanet. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 4270–4286.
- Rose, B., and J. Marshall, 2009: Ocean heat transport, sea-ice and multiple climate states: Insights from energy balance models. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 2828–2843.
- Rose, B., E. J. (2015), Stable “Waterbelt” climates controlled by tropical ocean heat transport: A nonlinear coupled climate mechanism of relevance to Snowball Earth, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*