

# Ekman heat transport for slab oceans

Codron (2012) の紹介

理学研究科惑星学専攻

米倉 裕亮

# 目次

1. はじめに
2. 1.5層モデル, 2層モデルの概要
3. 実験設定
4. 実験結果
5. 1.5層モデル, 2層モデルの比較
6. 結論

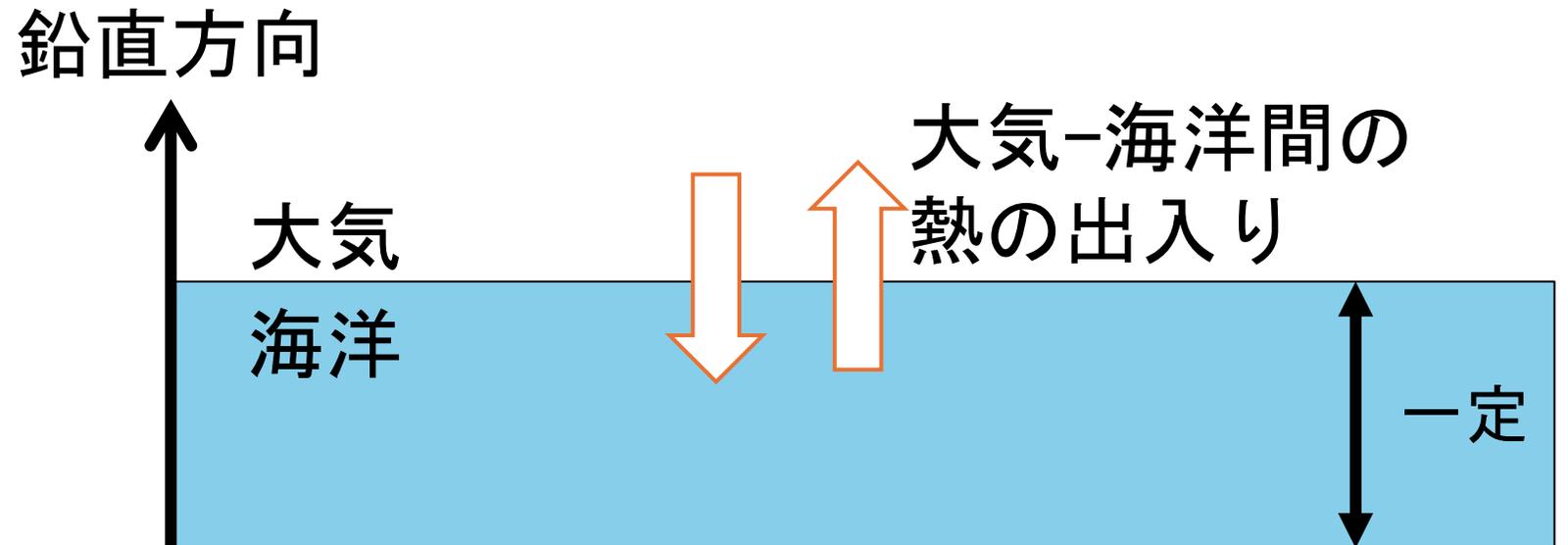
# 目次

1. はじめに
2. 1.5層モデル, 2層モデルの概要
3. 実験設定
4. 実験結果
5. 1.5層モデル, 2層モデルの比較
6. 結論

# はじめに

## ・ 板状の海を仮定した海洋モデル

- ・ 板状の海において，海面からそこまで一様な温度
- ・ 大気-海洋間の熱の出入りのみを考慮



# はじめに

## ・ 海惑星，地球における熱輸送の数値実験：

- ・ 拡散による熱輸送のみを取り入れる。
  - ・ 現在の地球の海面温度の構造を再現できない。  
(De Conto and Pollard, 2003)

## ・ 中緯度の海面温度異常についての数値実験：

- ・ 強い湧昇流のある場所における  
表層のエクマン輸送のみを取り入れる
  - ・ エクマン輸送が熱輸送に関して重要だとわかる。
  - ・ 全てのエクマン輸送は取り入れられていない  
(Alexander and Scott, 2008; Peng et al., 2006)

はじめに

## 論文の目標

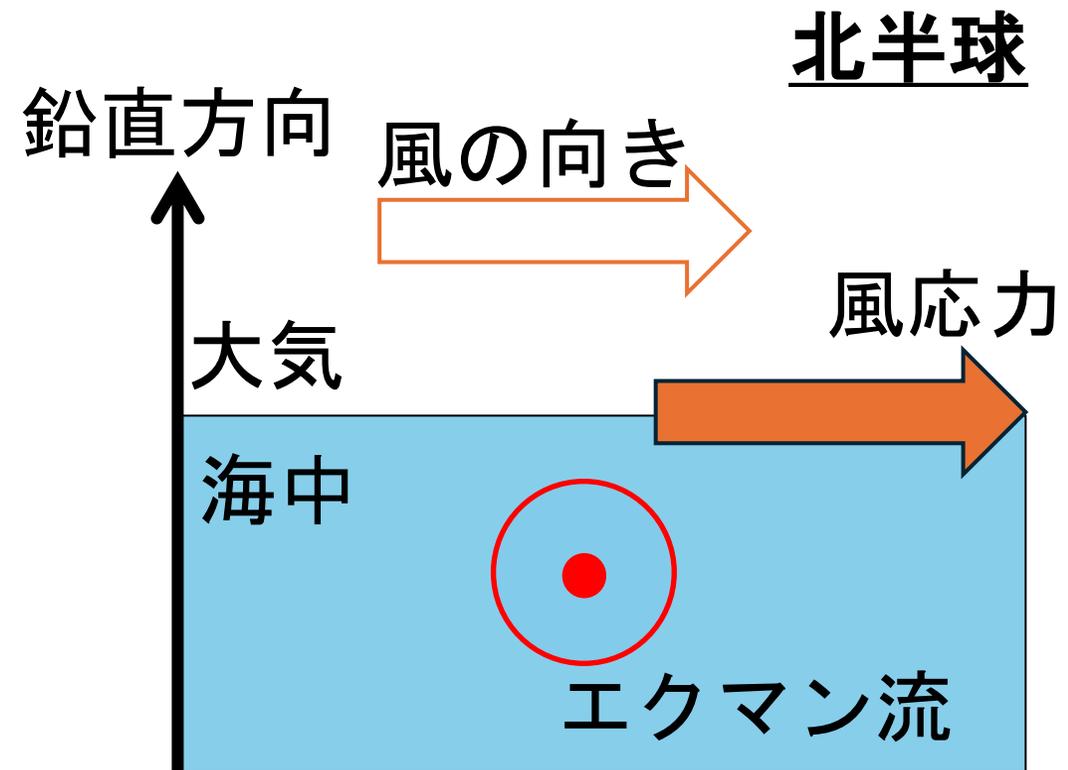
エクマン輸送による南北熱輸送の構造を  
再現することを目標とする

# はじめに

## エクマン輸送:

海面に加わる風応力の向きに対して  
北半球では右向き, 南半球では左向きに  
流れるエクマン流による輸送

このエクマン輸送によって  
熱も輸送される



# はじめに

- ・ 大規模スケールでの水平運動における運動量の釣り合いの式

$$\begin{cases} \epsilon u - fv = -1/\rho_0 \partial_x P + \partial_z (\overline{u'w'}) \\ \epsilon v + fu = -1/\rho_0 \partial_y P + \partial_z (\overline{v'w'}) \end{cases} \quad (1)$$

$u, v$ : 東西方向の速度, 南北方向の速度

$f$ : コリオリパラメータ

$\epsilon$ : 散逸の効果 ( $\epsilon = 10^{-5}$  [s<sup>-1</sup>])

$\rho_0$ : 海洋の密度 (定数)

左辺第一項: 摩擦力

左辺第二項: コリオリ力

右辺第一項: 圧力傾度力

右辺第二項: 乱流運動量フラックスの鉛直発散

# はじめに

圧力傾度力がない ( $\nabla P = 0$ ) の場合,

(1) 式を  $\rho_0$  倍し, 海面から表層混合層の底まで積分

$$\begin{cases} \epsilon M_x - f M_y = \tau_x \\ \epsilon M_y + f M_x = \tau_y \end{cases} \quad (2)$$

$\tau_x, \tau_y$  : 表面に加わる応力

$M_x, M_y$  : 質量輸送の東西成分と南北成分

# はじめに

(2) 式から，質量輸送はそれぞれ下のよう表せる．

$$\begin{cases} M_x = (\epsilon\tau_x + f\tau_y)/(\epsilon^2 + f^2) \\ M_y = (\epsilon\tau_y - f\tau_x)/(\epsilon^2 + f^2) \end{cases} \quad (3)$$

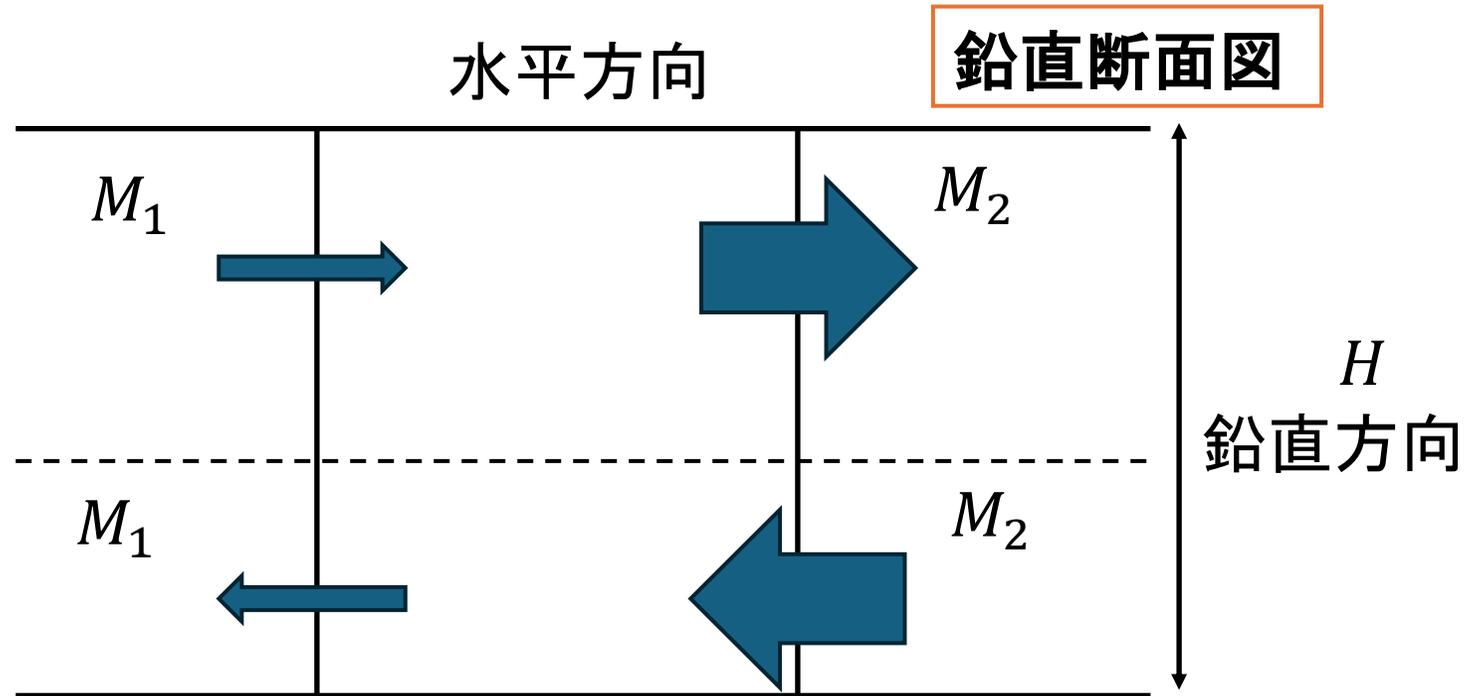
$\tau_x, \tau_y$  : 表面に加わる応力

$M_x, M_y$  : 質量輸送の東西成分と南北成分

# 目次

1. はじめに
2. 1.5層モデル, 2層モデルの概要
3. 実験設定
4. 実験結果
5. 1.5層モデル, 2層モデルの比較
6. 結論

# 1.5 層モデル



- 表層の質量輸送は風応力から計算
- 深層の質量輸送は表層の逆向き

$H$  : 層の厚さ [m]

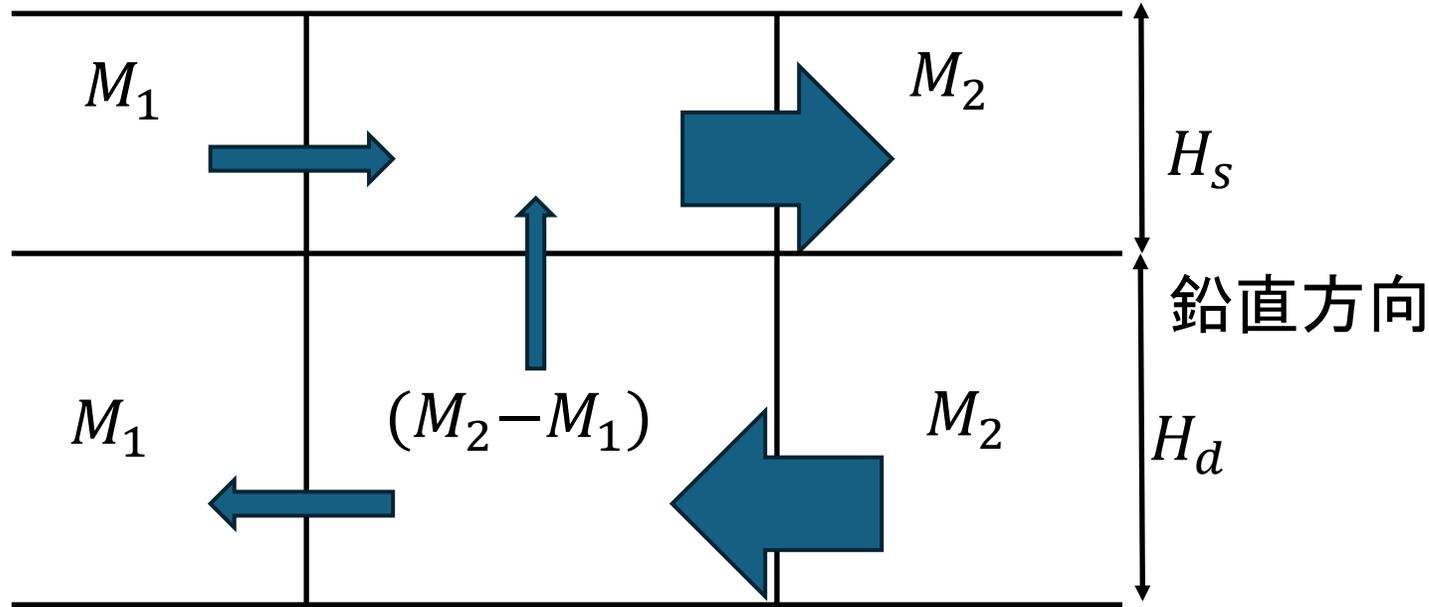
$M$  : 質量輸送

1, 2 : 左の境界, 右の境界

# 2 層モデル

水平方向

鉛直断面図



- 表層の質量輸送は風応力から計算
- 深層の質量輸送は表層の逆向き
- 表層と深層でそれぞれ質量が保存するように鉛直質量輸送

$H_s/d$  : 表層, 深層の厚さ [m]

$s, d$  : 表層, 深層

$M$  : 質量輸送

# モデルの概要 : 1.5 層モデル

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{1}{\rho C H} (F_{a-o} + F_{i-o}) + D \Delta T_s - \frac{1}{\rho H} \text{div}_H [\mathbf{M}(T_s - T_d)]$$

$F_{a-o}$  : 大気からの熱フラックス [W/m<sup>2</sup>]

$F_{i-o}$  : 海氷からの熱フラックス [W/m<sup>2</sup>]

$D$  : 水平拡散係数 [m<sup>2</sup>/s] (=25000 [m<sup>2</sup>/s])

$\text{div}_H$  : 水平発散の演算子

$\mathbf{M}$  : エクマン質量フラックス [kg/m/s] (風応力を与えて計算)

$C$  : 比熱 [J/kg/K] (定数)

$T_s, T_d$  : 表層, 深層の温度 ( $T_d = \alpha T_s + (1 - \alpha) T_0$ )

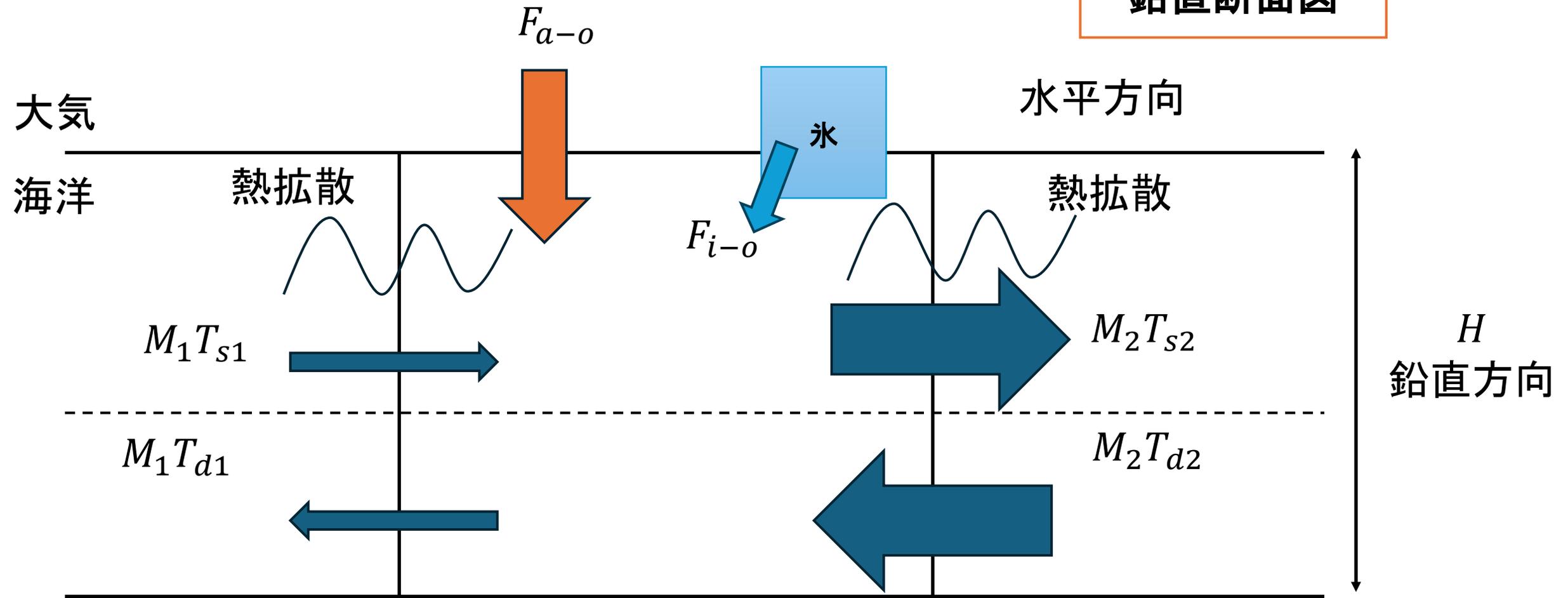
$\alpha$  : 1.5層モデルで深層の温度を与えるパラメタ (=2/3)

$T_0$  : 海水の凝固点温度 [K] (定数)

# 1.5 層モデルのイメージ図(1次元)

熱輸送, 熱拡散, 大気と氷からの熱フラックスによって加熱または冷却される.

鉛直断面図



# モデルの概要：2層モデル

上：表層の式

下：深層の式

$$\begin{aligned}\frac{\partial T_s}{\partial t} &= \frac{1}{\rho C H_s} (F_{a-o} + F_{i-o} + F_c) + D \Delta T_s - \frac{1}{\rho H_s} [\text{div}_H(\mathbf{M} T_s) - W T_{s/d}] \\ \frac{\partial T_d}{\partial t} &= \frac{1}{\rho C H_d} (-F_c) + D \Delta T_d - \frac{1}{\rho H_d} [\text{div}_H(\mathbf{M} T_d) + W T_{s/d}]\end{aligned}$$

$F_c$  : 対流熱フラックス [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$W$  : 鉛直質量フラックス ( $= \text{div}_H \mathbf{M}$ ) [ $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ ]

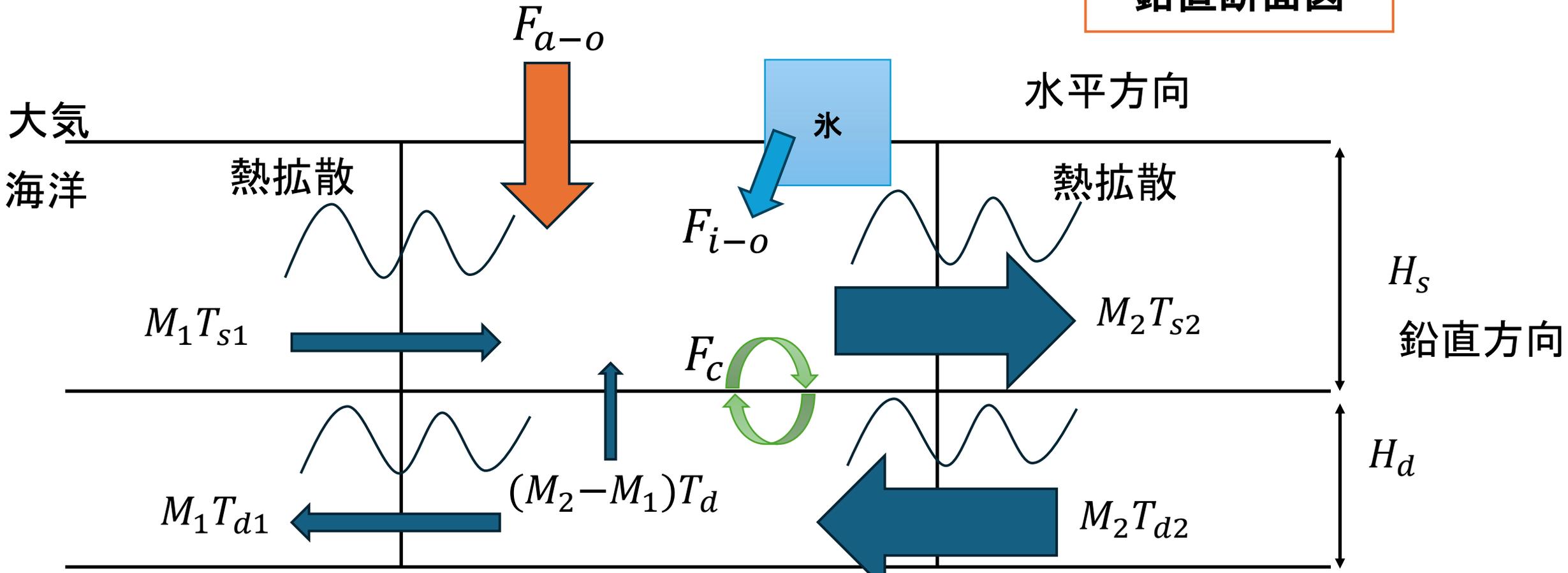
$T_{s/d}$  : 鉛直方向に移流する温度 [K]

( $W$ の符号により,  $T_s$  と  $T_d$  が変化)

# 2 層モデルのイメージ図 (1 次元)

熱輸送, 熱拡散, 大気と氷からの熱フラックス, 対流熱フラックス, 鉛直熱フラックスによって加熱または冷却される.

鉛直断面図



# 目次

1. はじめに
2. 1.5層モデル, 2層モデルの概要
3. **実験設定**
4. 実験結果
5. 1.5層モデル, 2層モデルの比較
6. 結論

# 実験設定

- 結合モデルを用いる
  - 今回構築したモデルと LMDZ 大気大循環モデルを結合
  - 格子点間隔：
    - $48 \times 48$  (経度方向に 7.5 度, 緯度方向に 3.75 度間隔)
  - ORCHIDEE 陸面モデル (Krinner et al. 2005) を用いる

# 実験設定

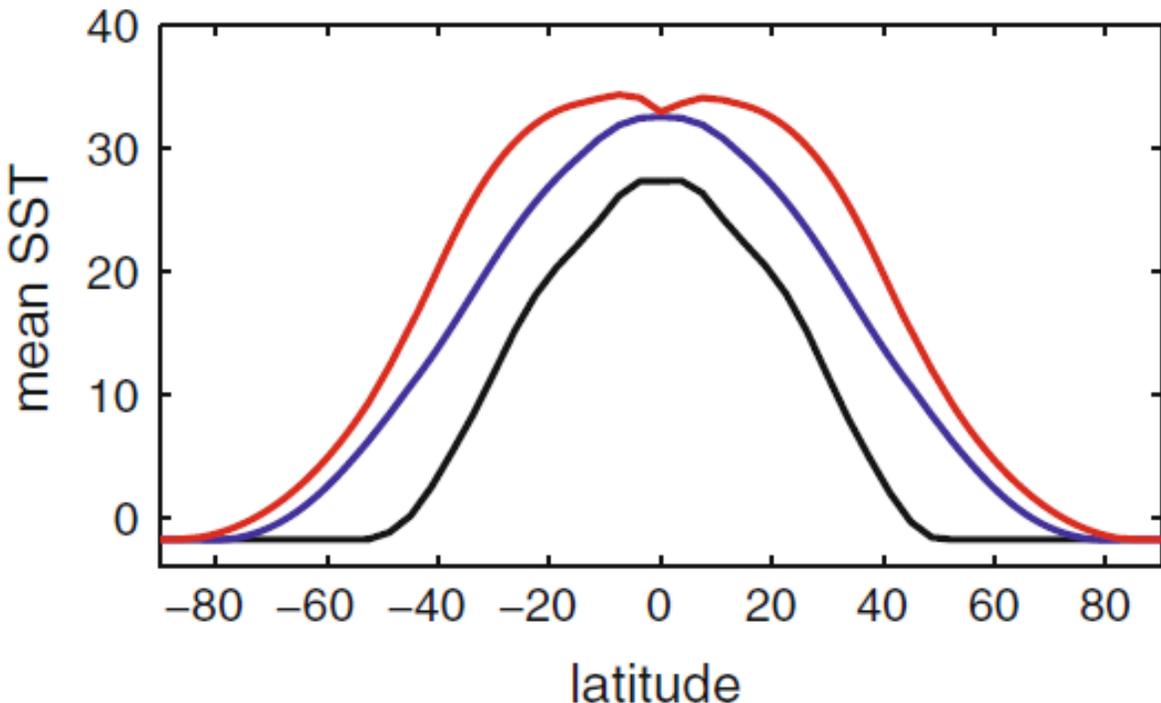
実験は下の表の 4 つの場合のどれかを行う。

拡散	エクマン輸送
×	×
○	×
○	1.5 層モデル
○	2 層モデル

# 目次

1. はじめに
2. 1.5層モデル, 2層モデルの概要
3. 実験設定
4. **実験結果**
5. 1.5層モデル, 2層モデルの比較
6. 結論

# 海惑星での実験結果 (南北構造)



## 海面温度

(年平均, 東西平均)

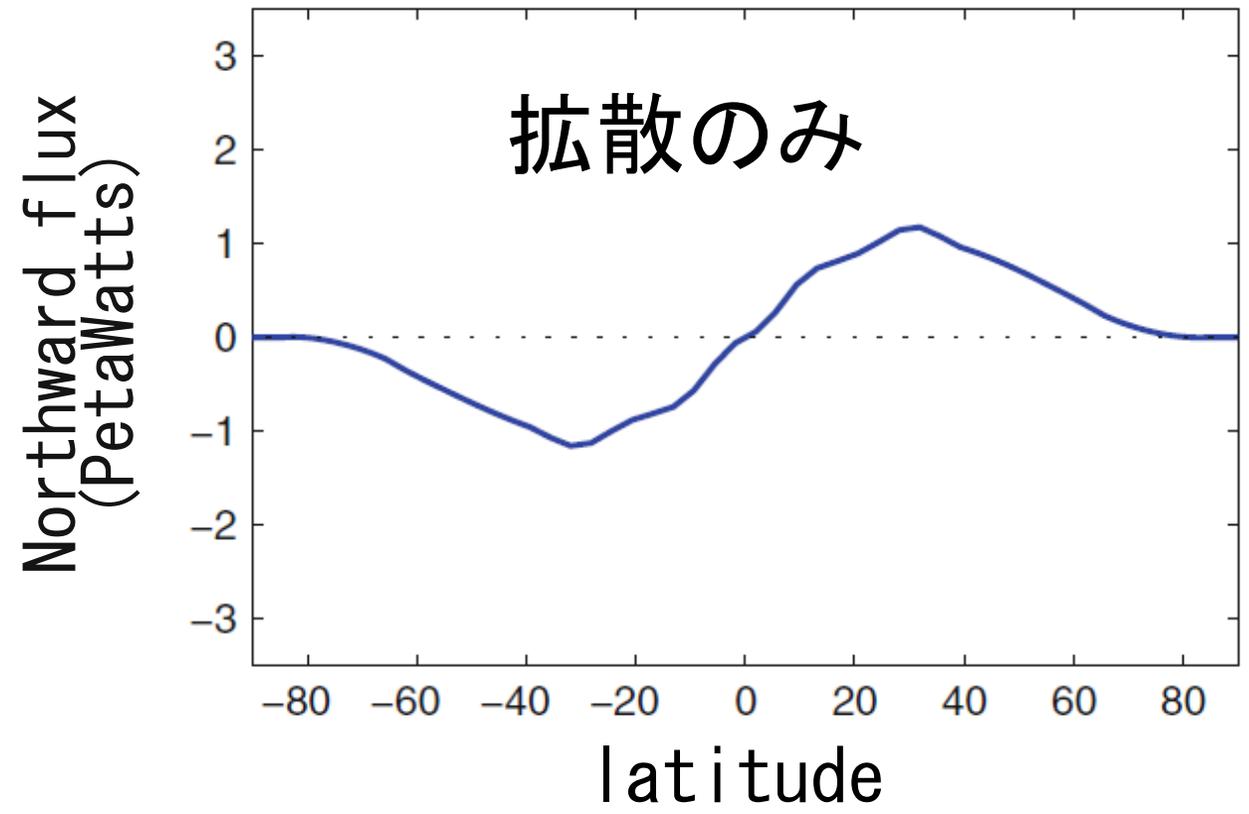
- 黒, 青: 赤道でピークを持つ。
- 赤:
  - 表層で, 東風による極向きのエクマン輸送が赤道で極向きに熱を輸送
  - 深層から湧昇があり, 赤道が冷却

	拡散	エクマン輸送
黒	×	×
青	○	×
赤	○	1.5 層モデル
	○	2 層モデル

# 海惑星での実験結果 (南北構造)

## 海洋における南北熱輸送 (東西平均, 年平均)

- 中緯度にピークが存在.
- 拡散による熱輸送により, 海水の面積が減少.



拡散	エクマン輸送
×	×
○	×
○	1.5 層モデル
○	2 層モデル

# 海惑星での実験結果 (南北構造)

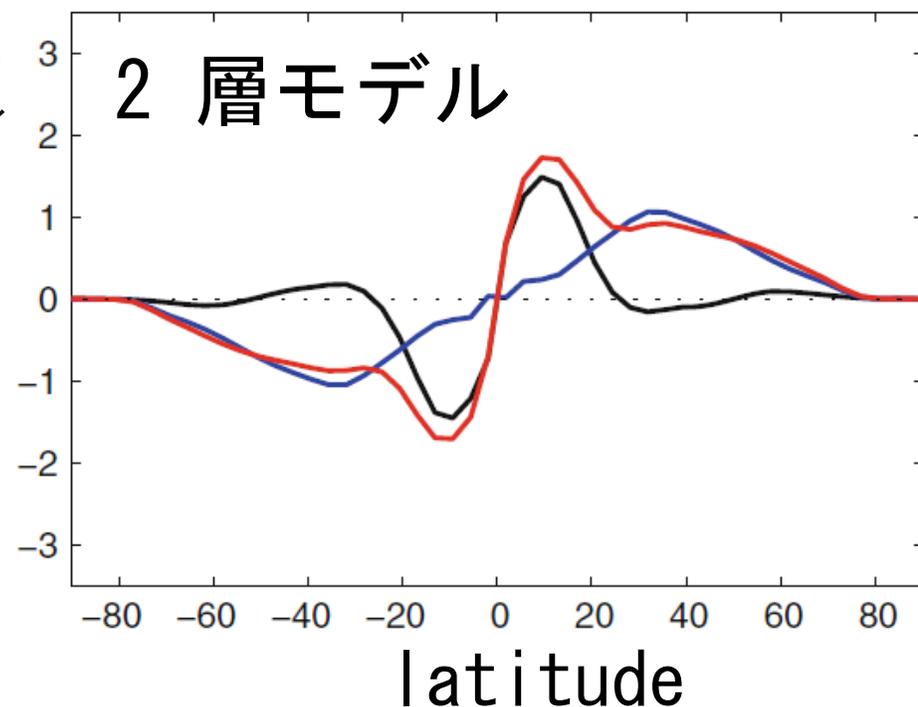
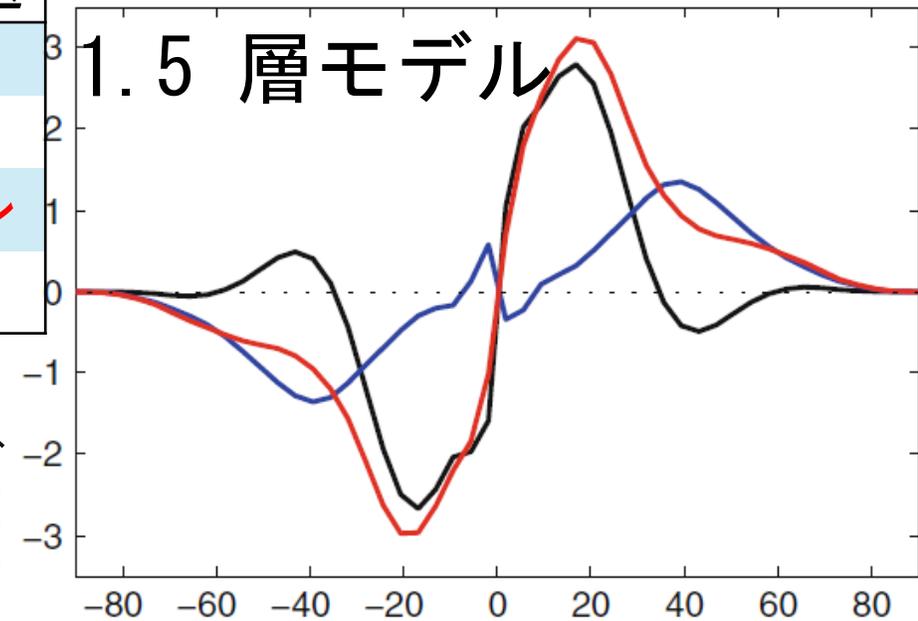
拡散	エクマン輸送
×	×
○	×
○	1.5 層モデル
○	2 層モデル

## 海洋における南北熱輸送 (東西平均, 年平均)

- 亜熱帯で極向き熱輸送の極大値が存在.
- 1.5 層モデルでは, 赤道付近で拡散の極大値が存在する.

青: 拡散による熱輸送  
 黒: エクマン輸送  
 赤: 上記の合計

Northward flux  
(PetaWatts)



# 現在の地球気候

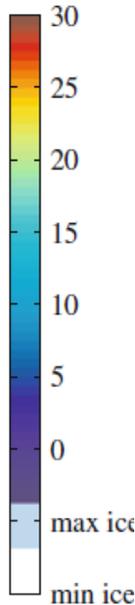
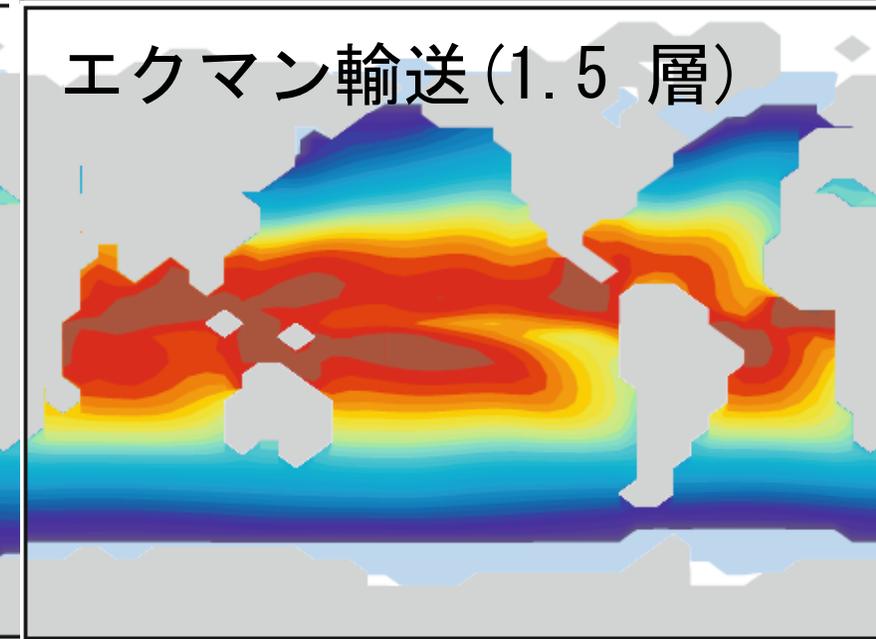
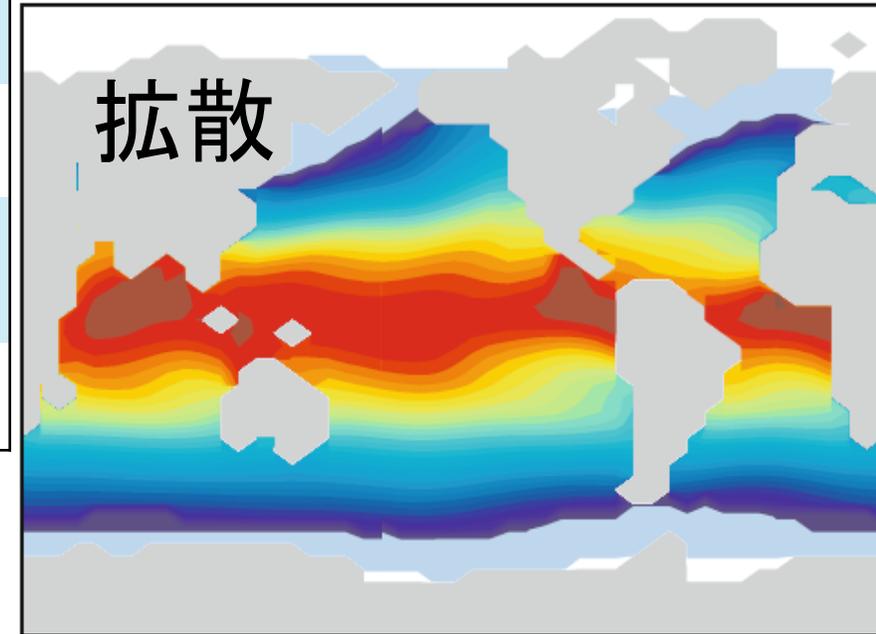
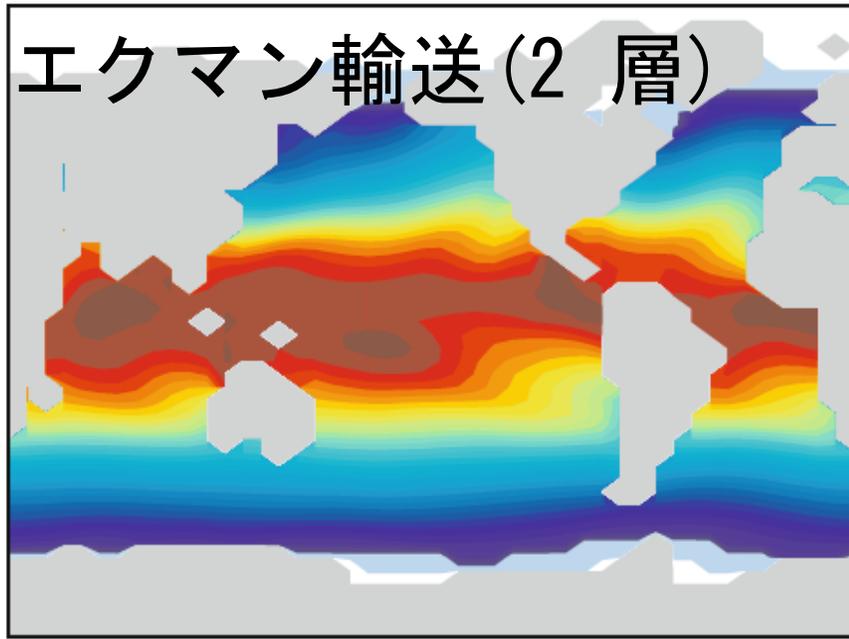
## 海面温度の 数値計算結果 (年平均)

- ・ 拡散のみだと氷の最大範囲が大きすぎる
- ・ 南太平洋の東側で湧昇による冷却  
(1.5層モデルで顕著)

[°C]

拡散	エクマン輸送
×	×
○	×
○	1.5層モデル
○	2層モデル

薄青：海氷の最大拡大範囲  
白：海氷の最小拡大範囲



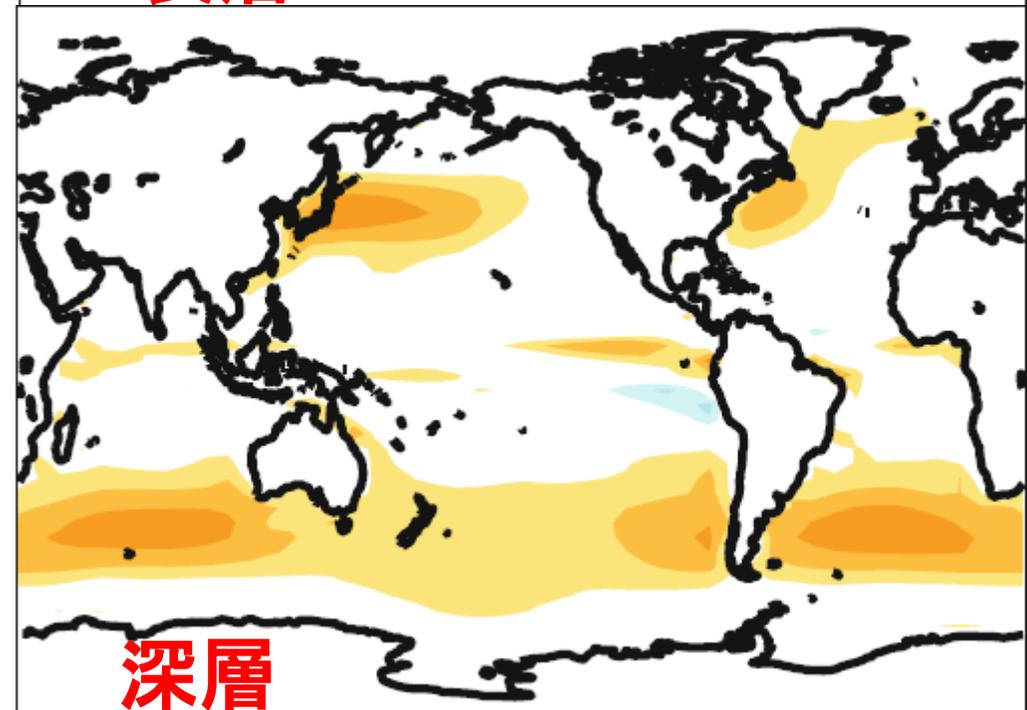
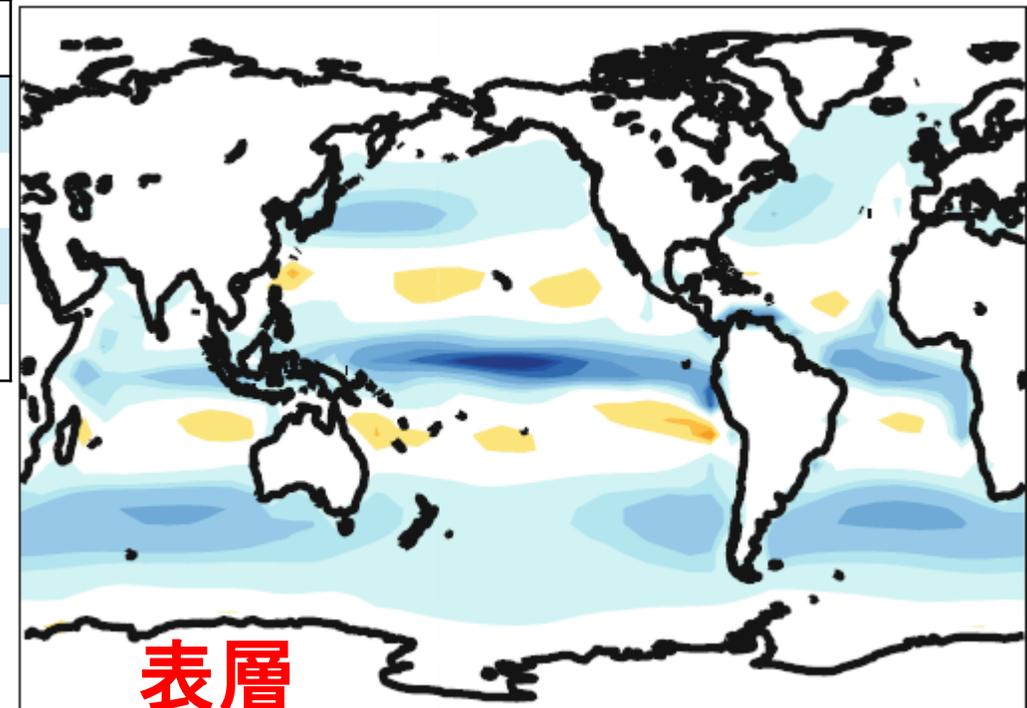
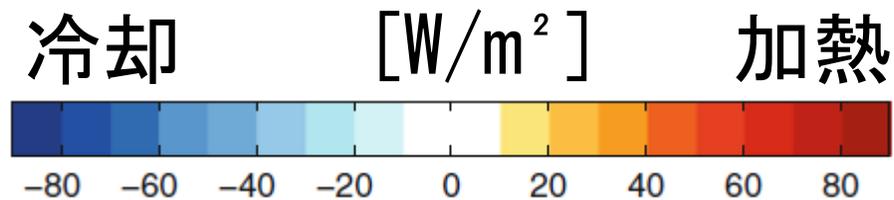
# 現在の地球気候

拡散	エクマン輸送
×	×
○	×
○	1.5 層モデル
○	2 層モデル

## 表層と深層の加熱(年平均)

※エクマン輸送のみ表示

- ・ 表層は赤道での冷却の効果が最も大きい
- ・ 深層は中緯度で加熱の効果が最も大きい

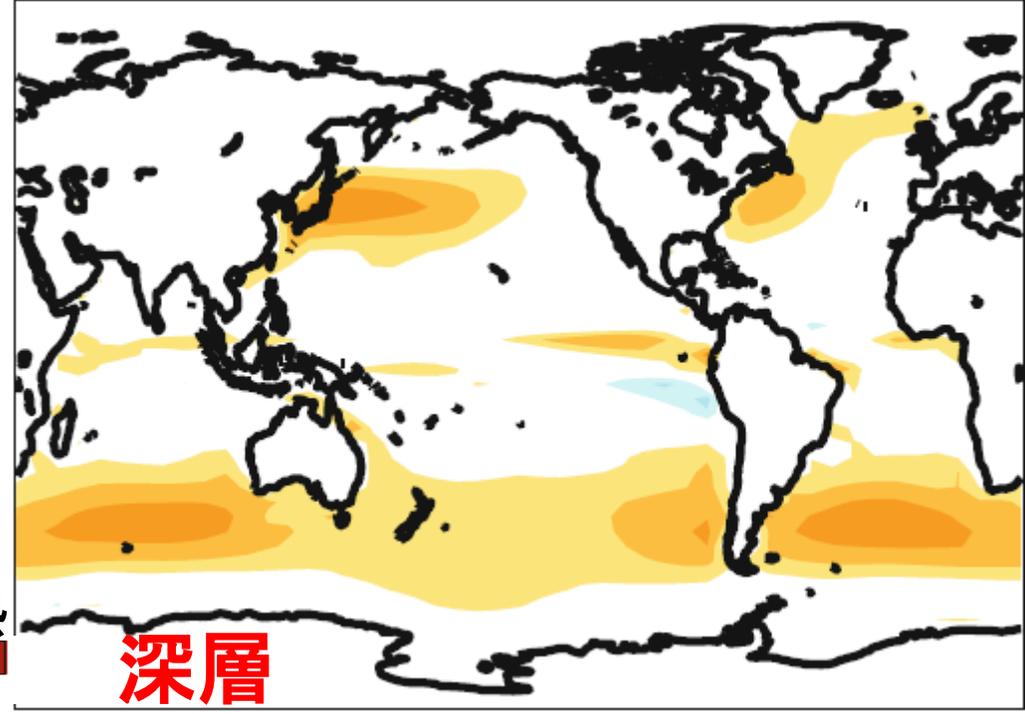
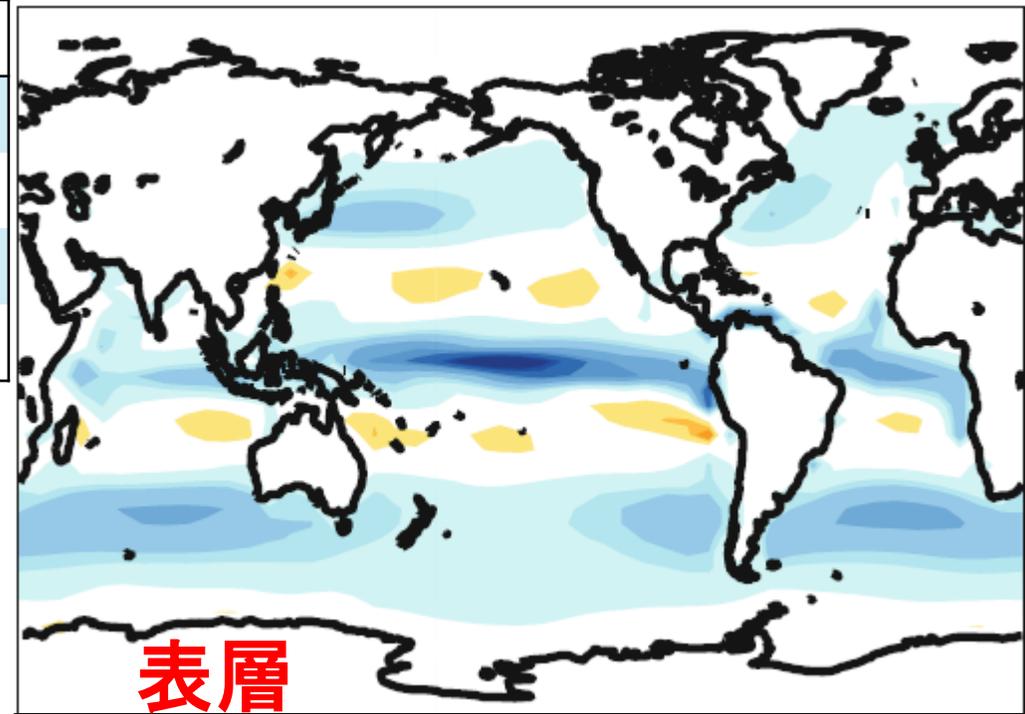
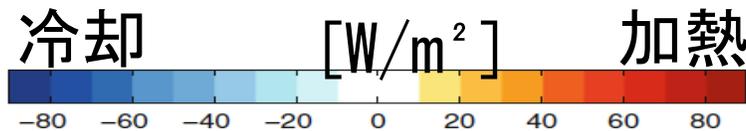


# 現在の地球気候

拡散	エクマン輸送
×	×
○	×
○	1.5 層モデル
○	2 層モデル

## 前のスライドと 同じ図

- ・ 赤道（表層）の冷却：  
湧昇で深層から冷たい水が来るため
  - ・ 赤道の東風の影響
- ・ 中緯度（表層）の冷却：  
高緯度側から冷たい水が来るため
  - ・ 中緯度の西風の影響
- ・ 中緯度（深層）の加熱：  
低緯度側から暖かい水が来るため



# 現在の地球気候

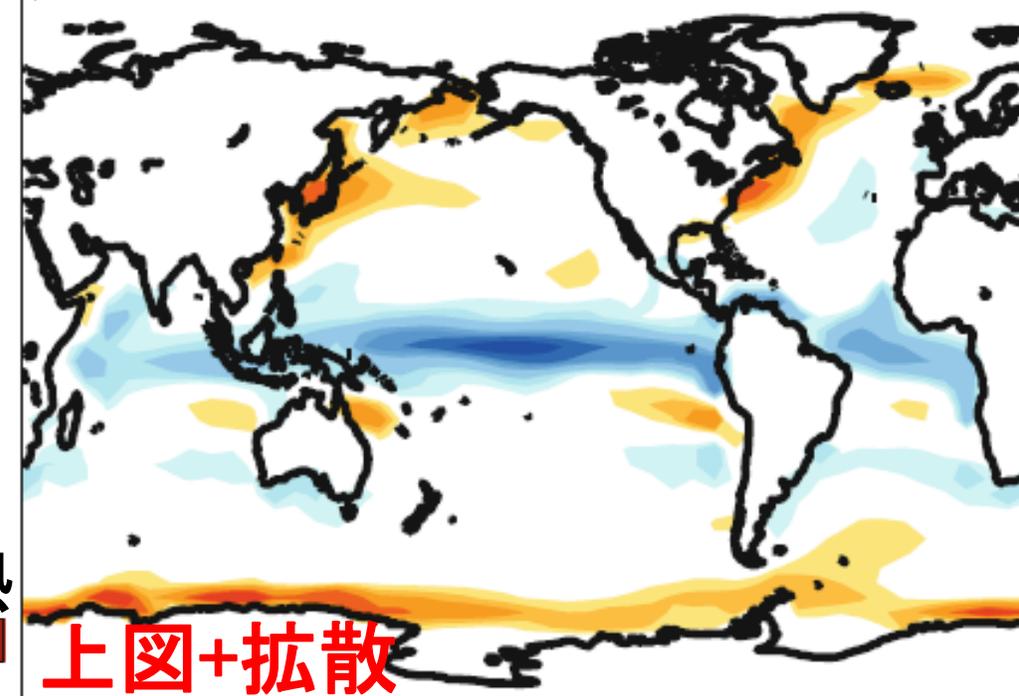
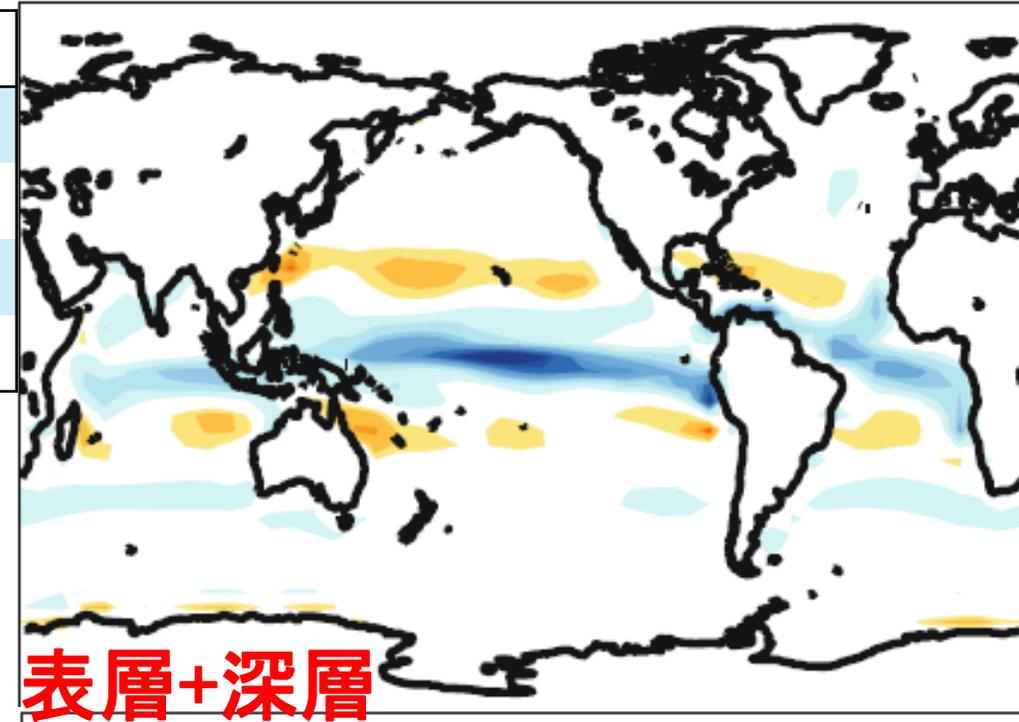
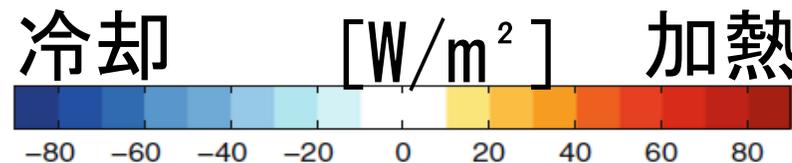
拡散	エクマン輸送
×	×
○	×
○	1.5 層モデル
○	2 層モデル

上：表層と深層の合計の加熱

下：上図に拡散の効果を追加（年平均）

※上図はエクマン輸送のみ表示

- ・ 上図：  
熱帯に冷却， 亜熱帯に加熱が存在
- ・ 下図：  
大陸の東側（特に北半球）と  
南極の沿岸で，  
加熱が存在

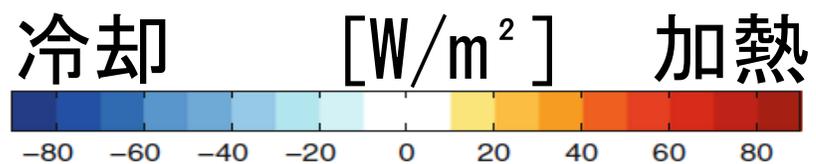
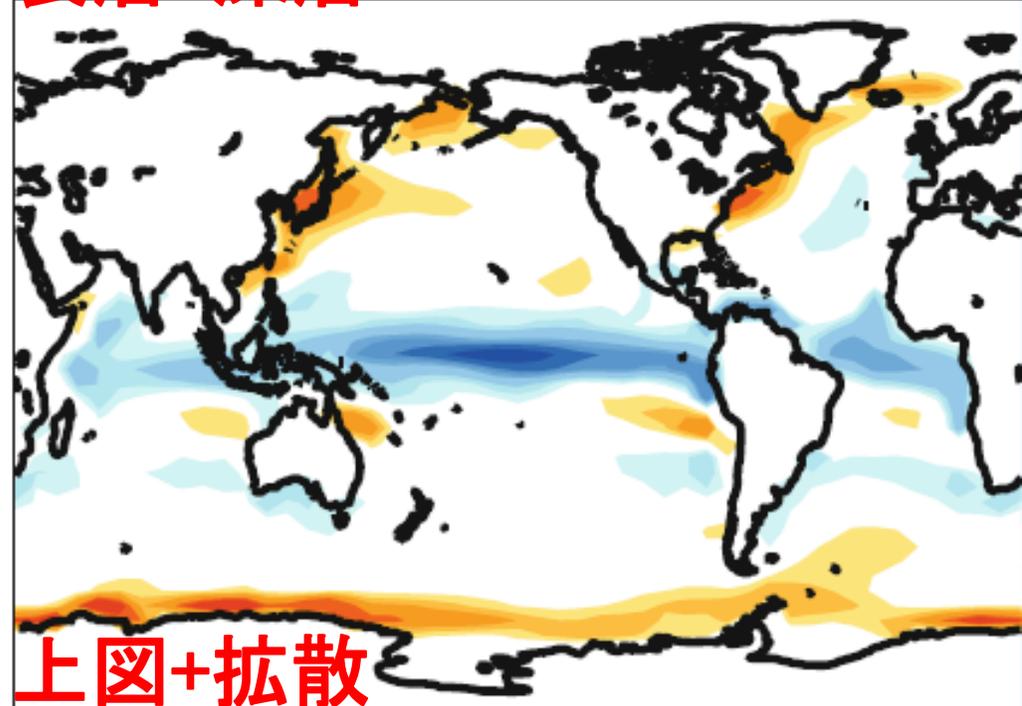
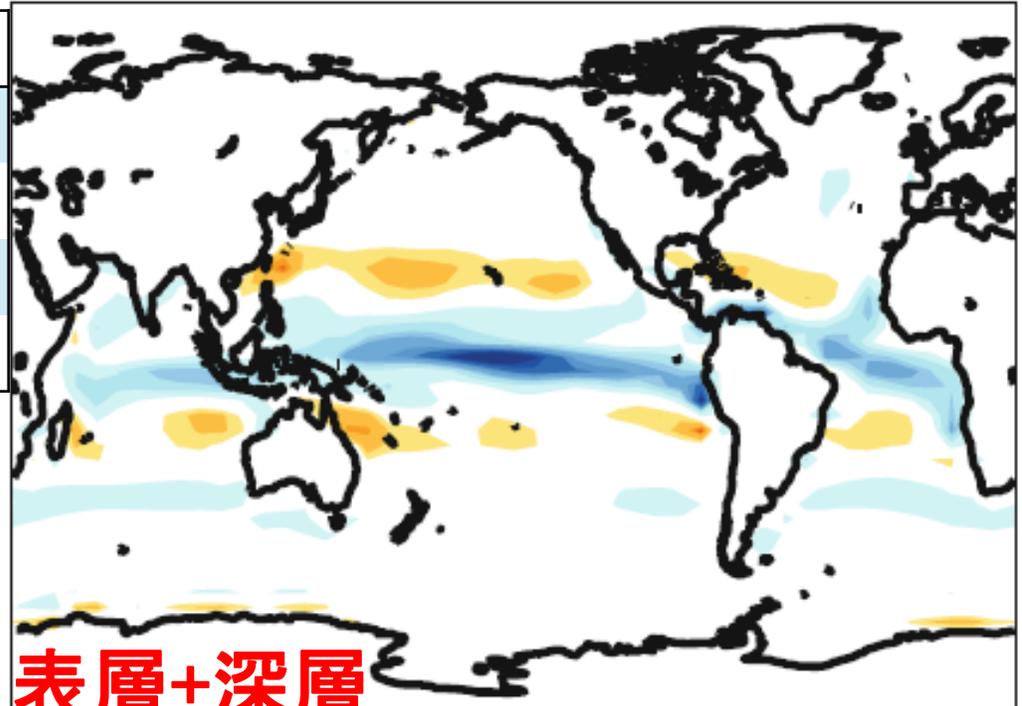


# 現在の地球気候

## 前のスライドと 同じ図

拡散	エクマン輸送
×	×
○	×
○	1.5 層モデル
○	2 層モデル

- 上図: 赤道の表層で極向きのエクマン輸送があり, 赤道で冷却, 亜熱帯で加熱される.
- 下図: 中緯度より高緯度では, 温度勾配が小さく, 熱拡散によって加熱される.



# 目次

1. はじめに
2. 1.5層モデル, 2層モデルの概要
3. 実験設定
4. 実験結果
5. 1.5層モデル, 2層モデルの比較
6. 結論

# 1.5 層モデルと 2 層モデルの比較

	利点	注意点
1.5 層モデル	<ul style="list-style-type: none"><li>非常に良い南北熱輸送の再現が可能.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>表層, 深層の温度が独立に時間発展することに関連する物理が取り入れられない</li></ul>
2 層モデル	<ul style="list-style-type: none"><li>表層深層間の相互作用と対流調節により複雑だが, 物理的な仕組みが明確で解釈が容易.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>湧昇流による赤道の冷却と熱帯の南北熱フラックスの過小評価.</li></ul>

# 目次

1. はじめに
2. 1.5層モデル, 2層モデルの概要
3. 実験設定
4. 実験結果
5. 1.5層モデル, 2層モデルの比較
6. **結論**

# 結論

- 南北熱輸送の構造:

緯度 20 度付近で極向きの熱輸送が最大となり、その赤道側では冷却、極側では加熱される。

これは、Smith et al. (2006) と Marshall et al. (2007) の GCM による結果と一致。

- 1.5 層モデルの温度構造と拡散のみの温度構造の比較:

1.5 層モデルでは、赤道で温度の極小値が存在。拡散による輸送のみだと、極小値は見られない。

# 結論

- 結合モデルによる実験の結果：  
赤道の低温領域や東の境界における湧昇流をよく再現することができる。
  - インド洋の湧昇流，ギニア湾が高温であることは問題。
- 環流による熱輸送の欠如：
  - 中緯度で重要。
  - Ice-albedo フィードバックを通して平均状態を変化させうる。

# 参考文献

- Alexander MA, Scott JD, 2008:  
The role of Ekman ocean heat transport in the Northern Hemisphere response to ENSO. *J Clim* 21(21):5688-5707
- Codron, F., 2012:  
Ekman heat transport for slab ocean, *Climate Dynamics*, 38, 379–389.
- De Conto RM, Pollard D, 2003:  
Rapid cenozoic glaciation of antarctica induced by declining atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature* 421(6920):245-249. doi:10.1038/nature01290

# 参考文献

- Hourdin F, Musat I, Bony S, Braconnot P, Codron F, Dufresne J, Fairhead L, Filiberti M, Friedlingstein P, Grandpeix J, Krinner G, LeVan P, Li Z, Lott F, 2006:  
The LMDZ4 general circulation model: climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection. *Clim Dyn* 27(7):787-813. doi:10.1007/s00382-006-0158-0
- Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudre N, Oge J, Polcher J, Friedlingstein P, Ciais P, Sitch S, Prentice IC, 2005:  
A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles* 19:33. doi:200510.1029/2003GB002199

# 参考文献

- Marshall J, Ferreira D, Campin JM, Enderton D, 2007:  
Mean climate and variability of the atmosphere and ocean on an aquaplanet, J Atmospheric Sci 64(12):4270-4286
- Peng S, Robinson WA, Li S, Alexander MA, 2006:  
Effects of Ekman transport on the NAO response to a tropical atlantic SST anomaly. J Clim 19(19):4803. doi:10.1175/JCLI3910.1
- Smith RS, Dubois C, Marotzke J, 2006:  
Global climate and ocean circulation on an aquaplanet Ocean-Atmosphere general circulation model, J Clim 19(18):4719-4737