

# Tropical Pacific SST Pattern Problem

## 近年の熱帯太平洋海面水温パターン変化は謎

### Perspective

## Possible shift in controls of the tropical Pacific surface warming pattern

<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07452-7>

Received: 27 September 2023

Accepted: 16 April 2024

Published online: 12 June 2024

Masahiro Watanabe<sup>1</sup>, Sarah M. Kang<sup>2</sup>, Matthew Collins<sup>3</sup>, Yen-Ting Hwang<sup>4</sup>,  
Shayne McGregor<sup>5</sup> & Malte F. Stuecker<sup>6</sup>

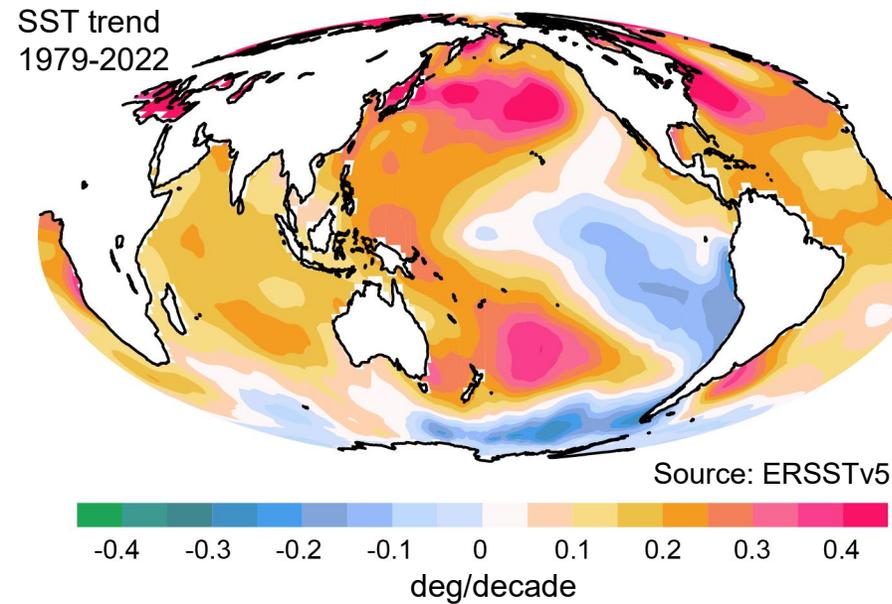
Changes in the sea surface temperature (SST) pattern in the tropical Pacific modulate radiative feedbacks to greenhouse gas forcing, the pace of global warming and regional



[www.clivar.org/TROPICS](http://www.clivar.org/TROPICS)



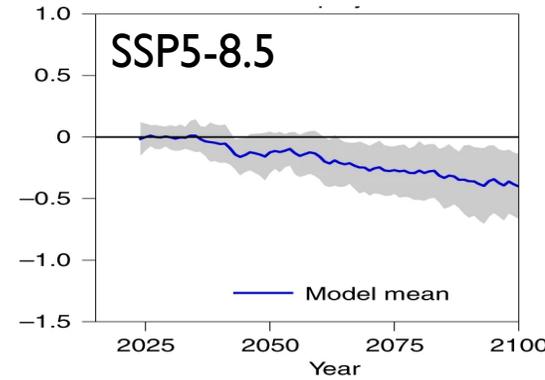
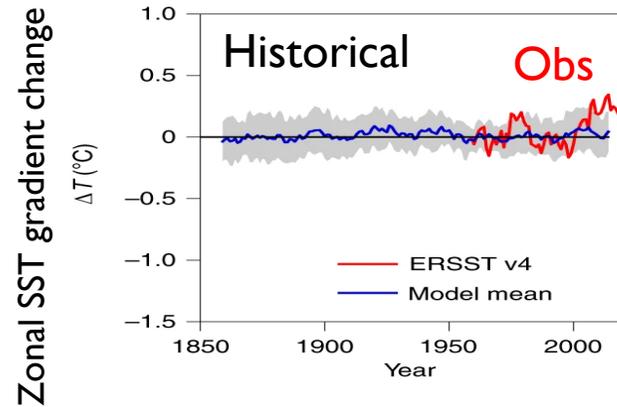
# Tropical Pacific SST Pattern Problem



Masa Watanabe, Sarah Kang, Mat Collins, Yen-Ting Hwang, Malte Stuecker, Shayne McGregor  
CLIVAR-CFMIP TROPICS working group members

# 何が問題か?

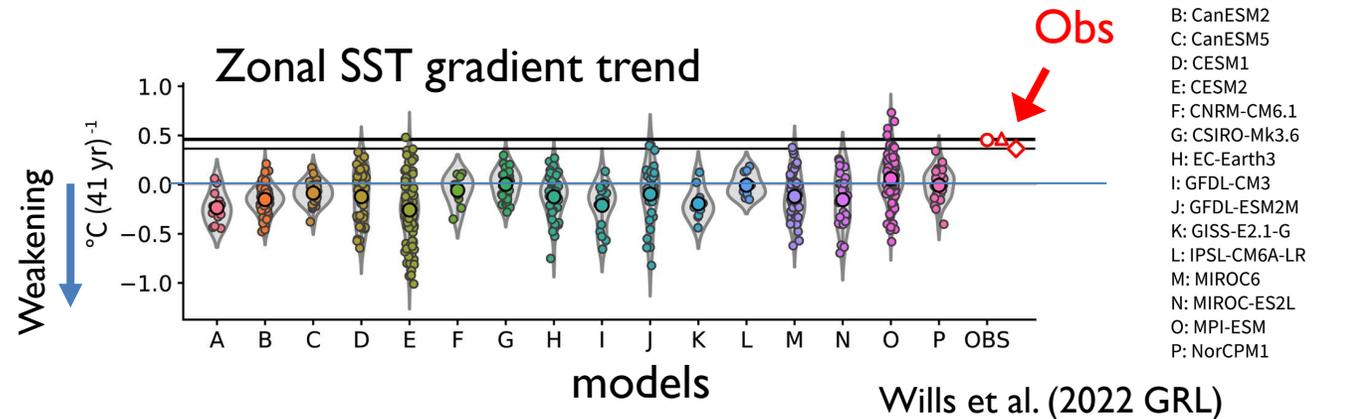
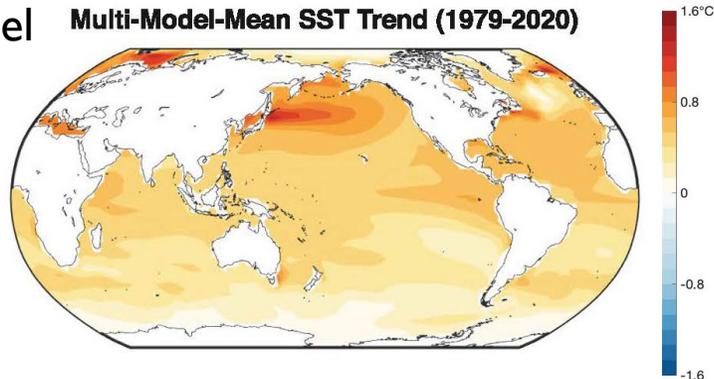
過去の観測された変化とモデルの将来予測が(一見)逆向き



Heede and Fedorov (2021 Nature CC)

過去のトレンド(1979-2020)がモデルと観測で逆向き

CMIP6 multi-model mean SST trend



- A: ACCESS-ESM1.5
- B: CanESM2
- C: CanESM5
- D: CESM1
- E: CESM2
- F: CNRM-CM6.1
- G: CSIRO-Mk3.6
- H: EC-Earth3
- I: GFDL-CM3
- J: GFDL-ESM2M
- K: GISS-E2.1-G
- L: IPSL-CM6A-LR
- M: MIROC6
- N: MIROC-ES2L
- O: MPI-ESM
- P: NorCPM1

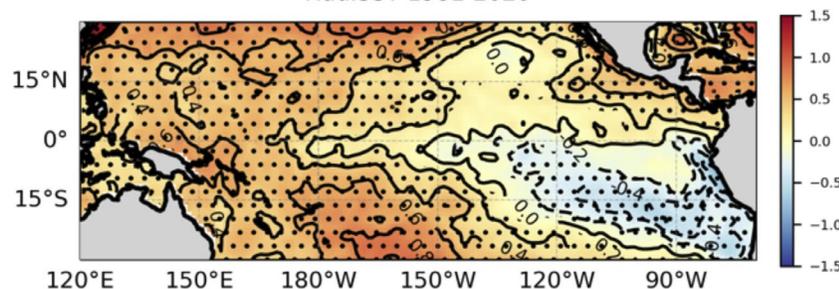
# 何故問題か？

近未来の台風トラックの変化は過去の観測された変化と大きく違う

1981-2020 trends, observations

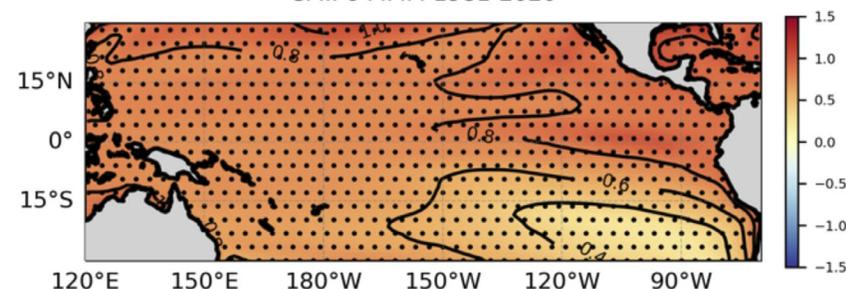
HadISST 1981-2020

海面水温



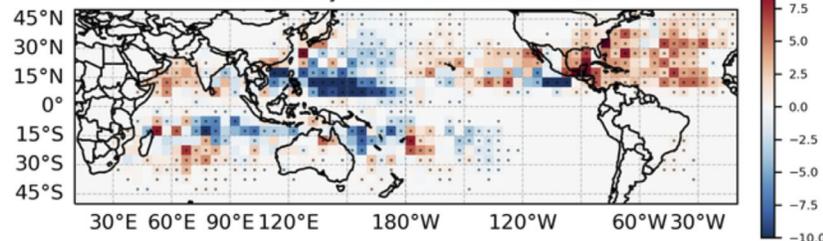
1981-2020 trends, CMIP6

CMIP6 MMM 1981-2020

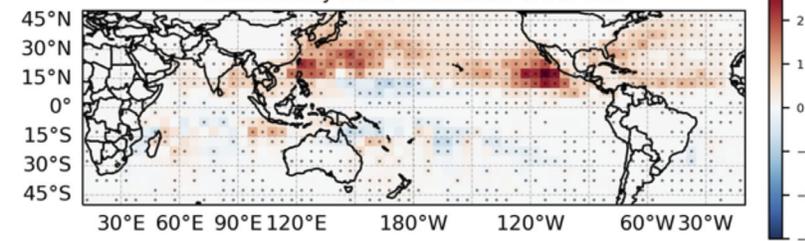


熱帯低気圧  
存在密度

track density trend 1981-2020 IBTrACS



track density trend 1981-2020 CHAZ CRH



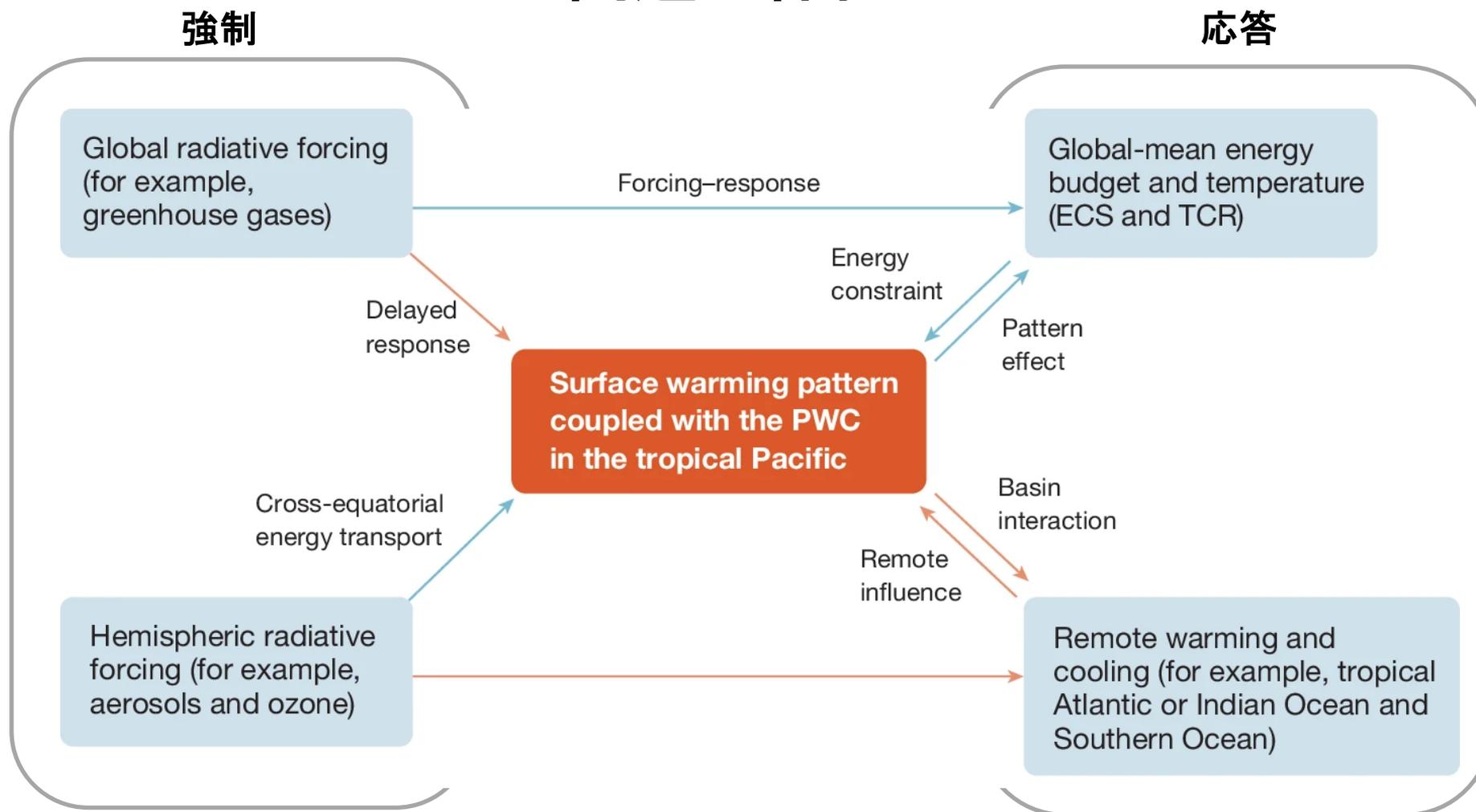
Sobel et al. (2023 PNAS)

熱帯太平洋SSTパターン変化の要因分析と科学的理解は地域気候・気象の将来変化予測にとって重要

## モデルー観測の不整合を説明し得る仮説

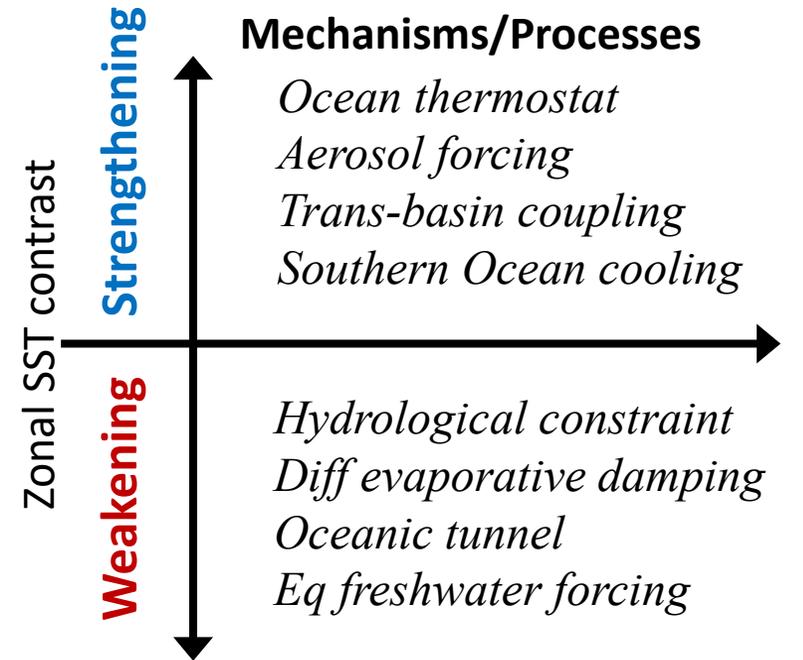
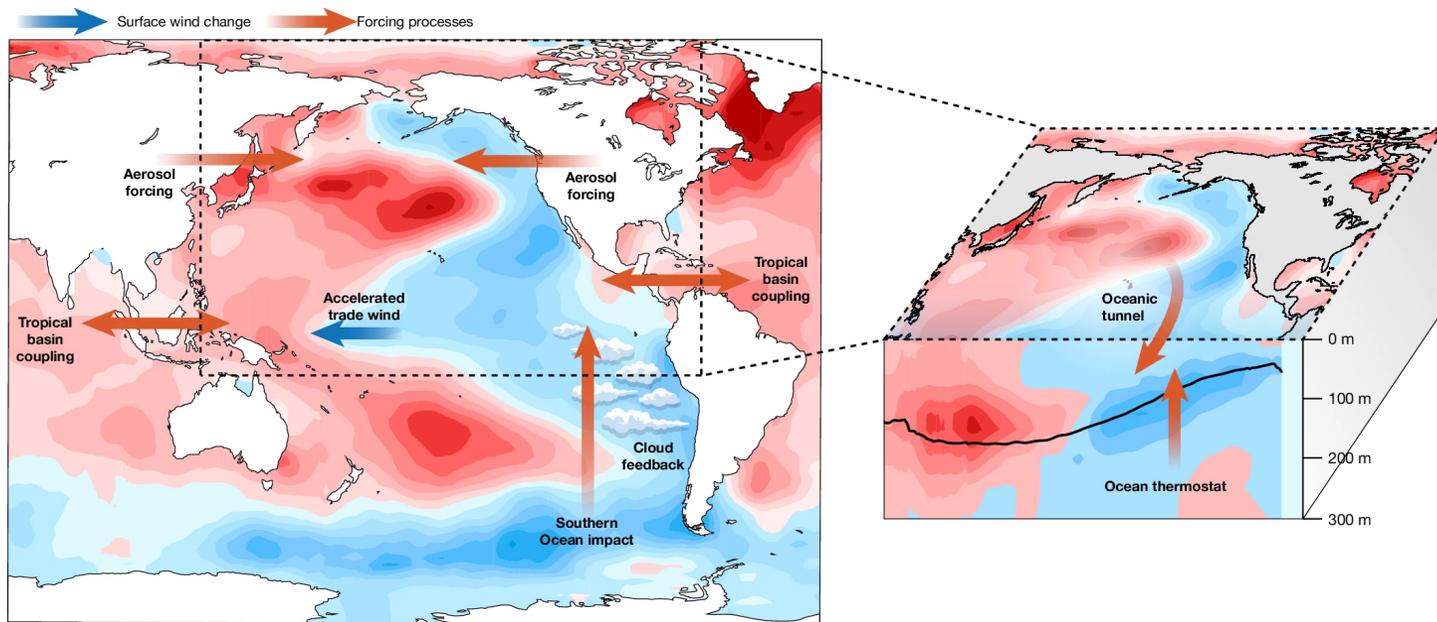
- #1 観測のトレンドは内部変動(ほぼIPO)の極端な状態である
- #2 観測のトレンドは極端ではない内部変動で説明され、モデルが内部変動を過小評価している
- #3 観測のトレンドは内部変動+強制応答で説明され、**強制応答がモデルで過小評価あるいは適切に表現されていない**

# 問題の枠組み



\* トレンドの向きに作用しないプロセス(ビヤクネスフィードバックなど)は省略

# 強制応答メカニズムざっとまとめ

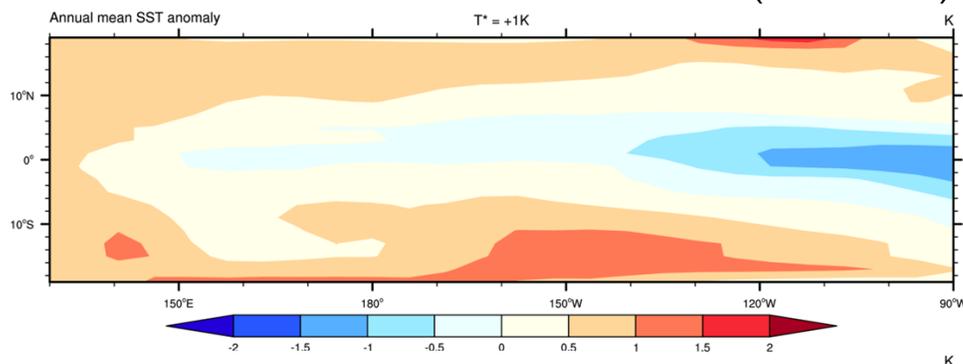


Watanabe et al. (2024 Nature)

# 海洋力学サーモスタット

赤道東部太平洋の温暖化を抑制する(場合によっては寒冷化させる)時間スケールの速いメカニズム

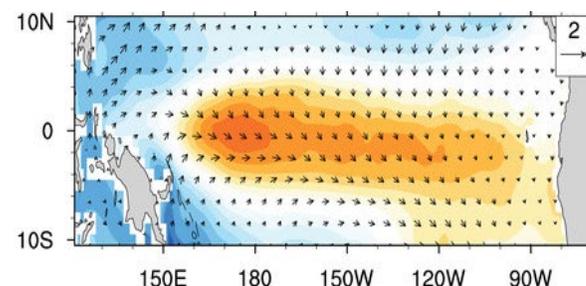
海面の一樣熱強制に対するSSTの応答 (CZ model)



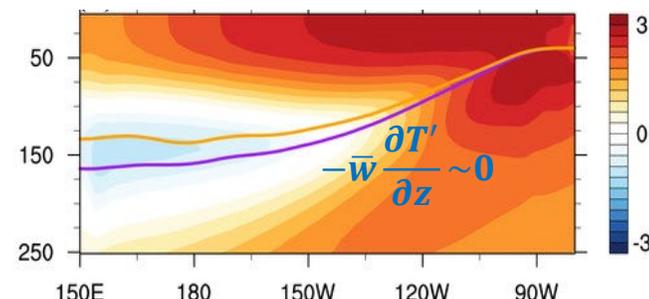
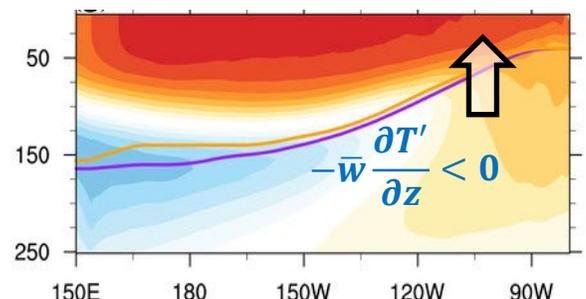
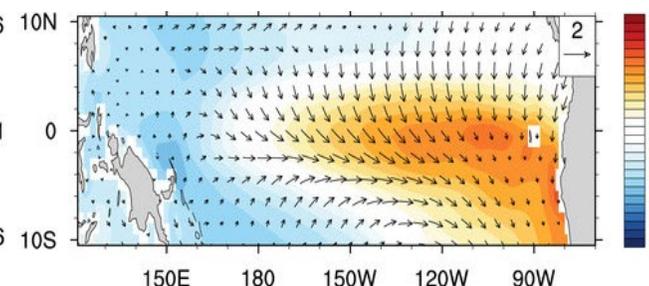
Courtesy of Wentao Li  
(reproducing Clement et al. 1996)

GCM (CESMI) における海面の一樣熱強制に対するSST応答

速い応答 (1-10年目)



遅い応答 (81-100年目)

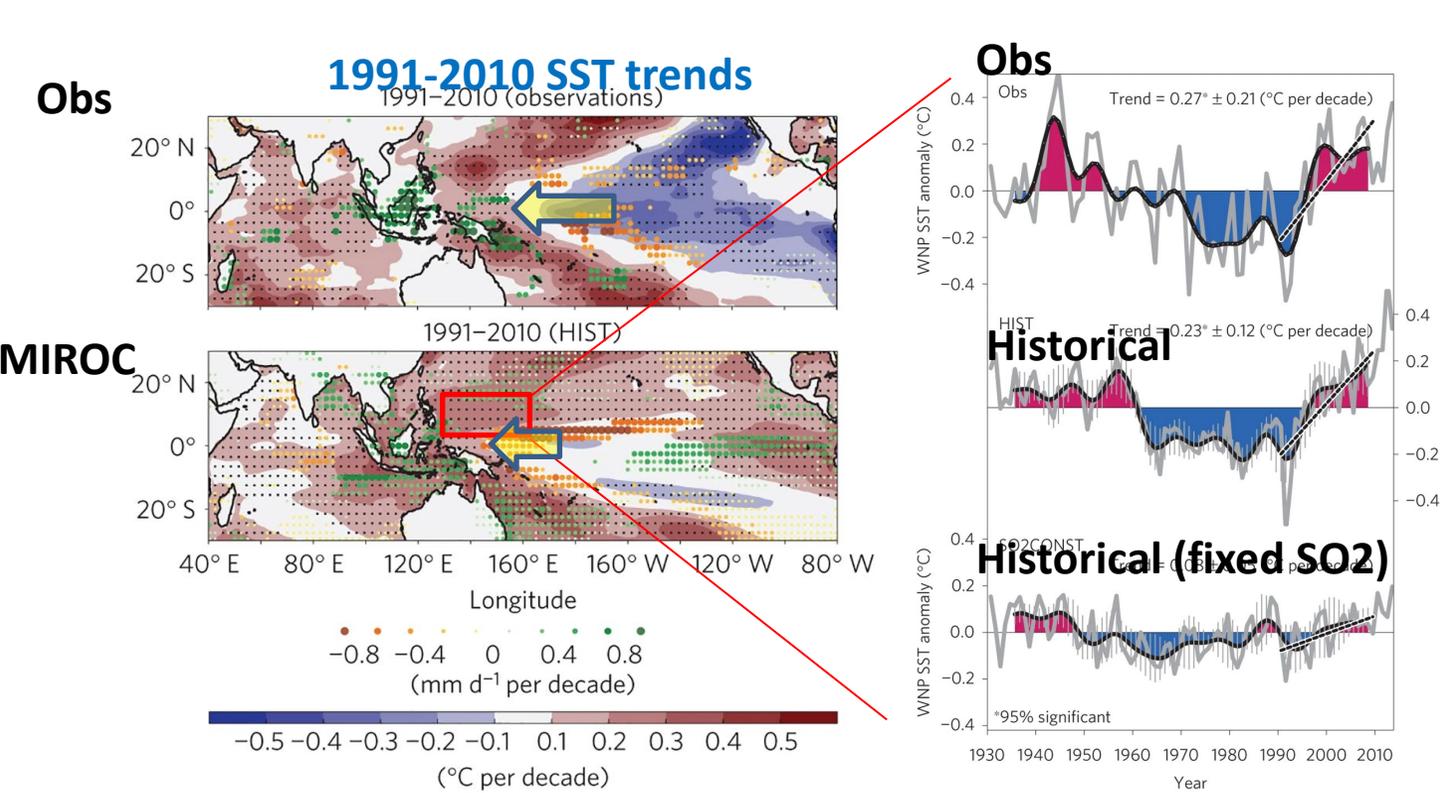


Luo et al. (2017 JC)

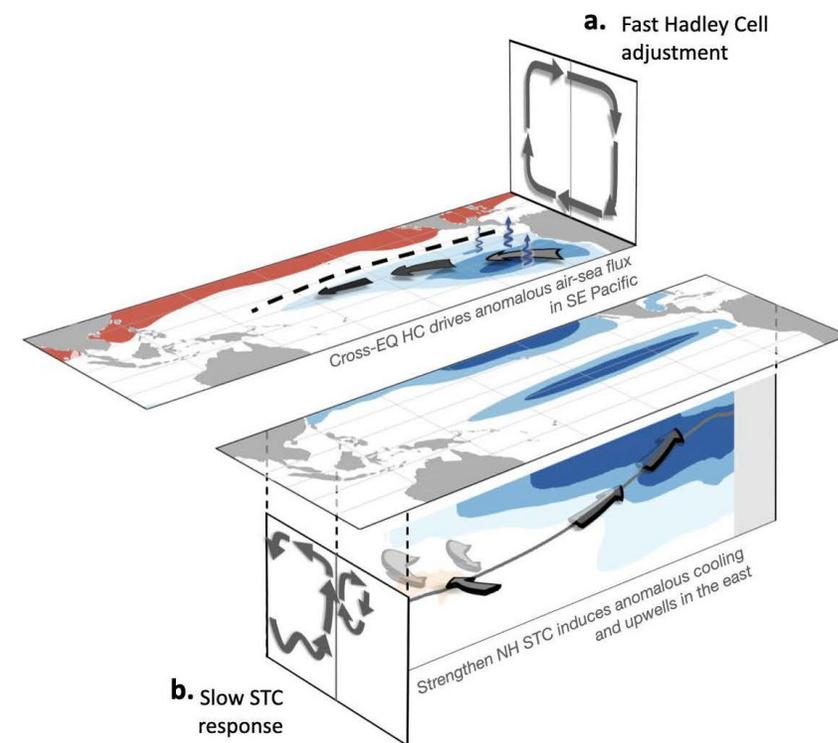
このメカニズムは東部赤道太平洋の亜表層が温暖化すると効率的に働かない

# エアロゾルの放射効果

北半球における硫酸性エアロゾルの排出減(1980年代以降)は、熱帯太平洋のSST東西勾配を強めていた



Takahashi & Watanabe (2016 Nature CC)



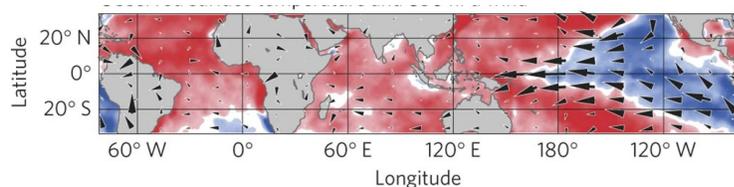
Hwang et al. (2024 PNAS)

全ての将来排出シナリオ (SSP3-7.0除く) で将来のエアロゾル排出の減少が想定されている

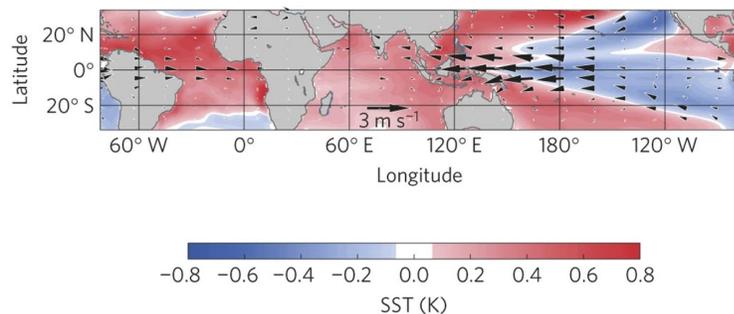
# 熱帯海盆間相互作用

## 1979-2012年の SST & 850 hPa 水平風のトレンド

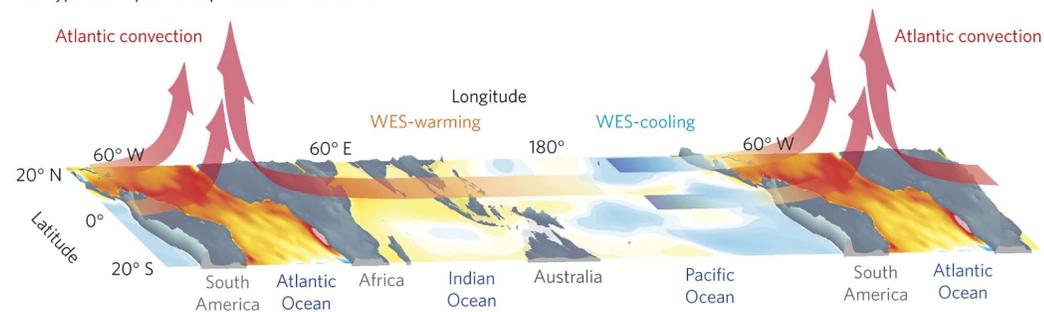
### 観測値



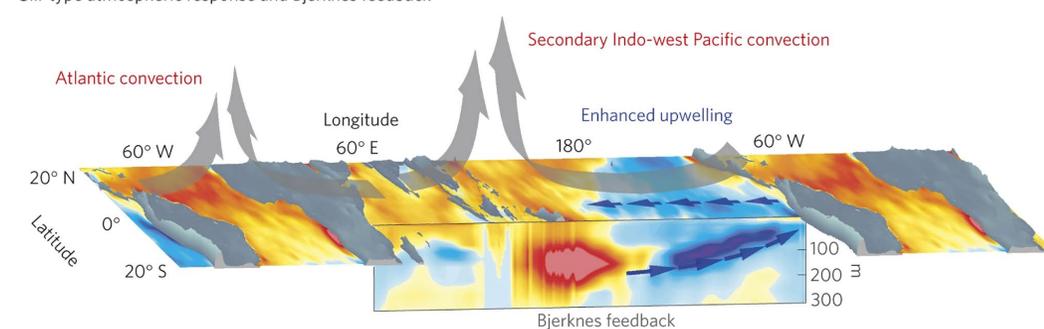
### 気候モデル (CESM1 Atlantic pacemaker exp)



a Gill-type atmospheric response and WES effect



b Gill-type atmospheric response and Bjerknes feedback

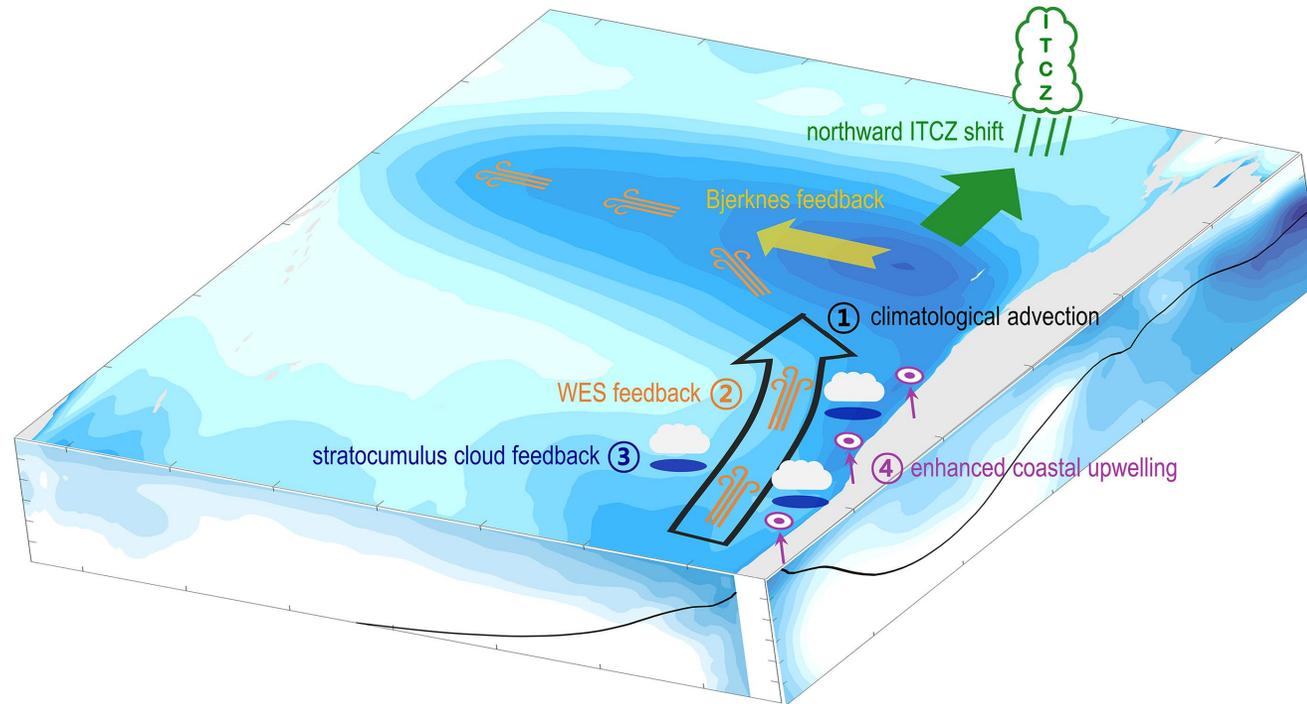


Li et al. (2015 Nature CC)

熱帯大西洋・インド洋の相対的温暖化は太平洋SSTの東西勾配を強めるようにはたらく  
このメカニズムは多くの気候モデルで過小評価されているかもしれない (Luo et al. 2018 Clim Dyn, Cai et al. 2019 Science)

# 南大洋の寒冷化

観測された南大洋SSTの低下は雲フィードバック & 大気海洋のテレコネクションを通じて熱帯東部太平洋を冷却し得る

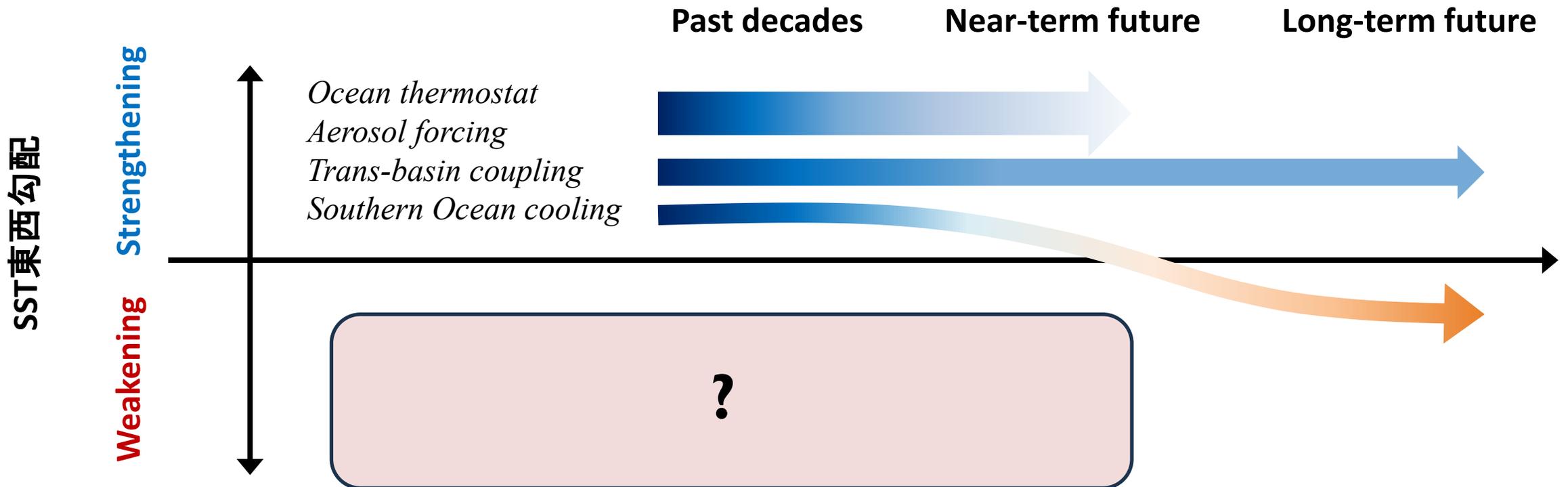


Kim et al. (2022 PNAS)

ほとんどのGCMでは南大洋寒冷化は再現されていない

仮に南大洋寒冷化があっても、雲フィードバックの過小評価によりモデルはこのメカニズムをうまく表現できていない<sup>12</sup>

# 個々のメカニズムの評価 (multiple lines of evidence)



- SST東西勾配を強めるように働くメカニズムの大多数は今後100年続くことはなさそうである
- では、勾配を弱めるメカニズムは？

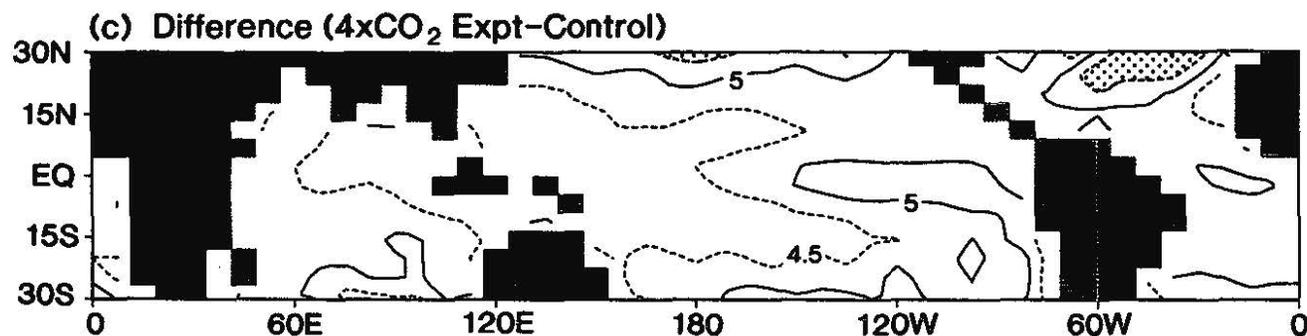
# CO<sub>2</sub> 倍増時の熱帯太平洋の気候応答 — 古典的研究 —

- 大気安定度の増加
- ウォーカー循環の弱化
- 赤道域の降水増加
- SST東西勾配の低下

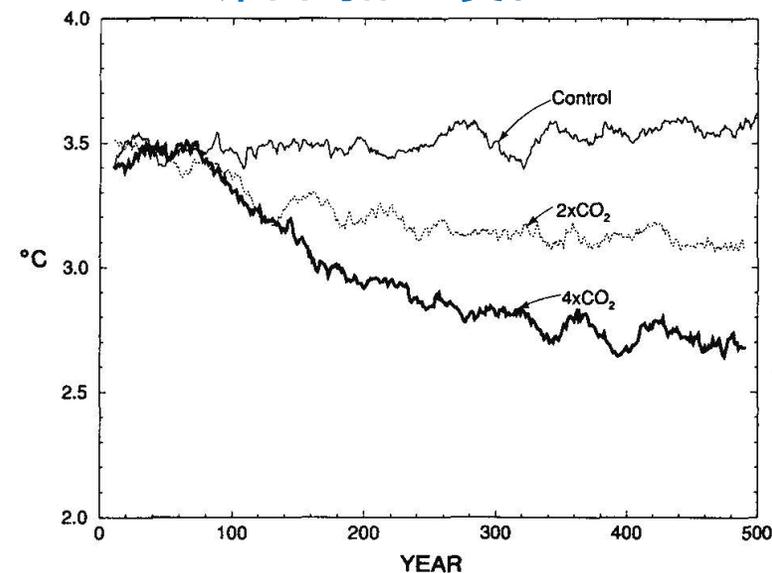


すべて、CMIP6モデルアンサンブルでも同様にみられる応答

## 4xCO<sub>2</sub>時のSSTパターン変化



## SST東西勾配の変化



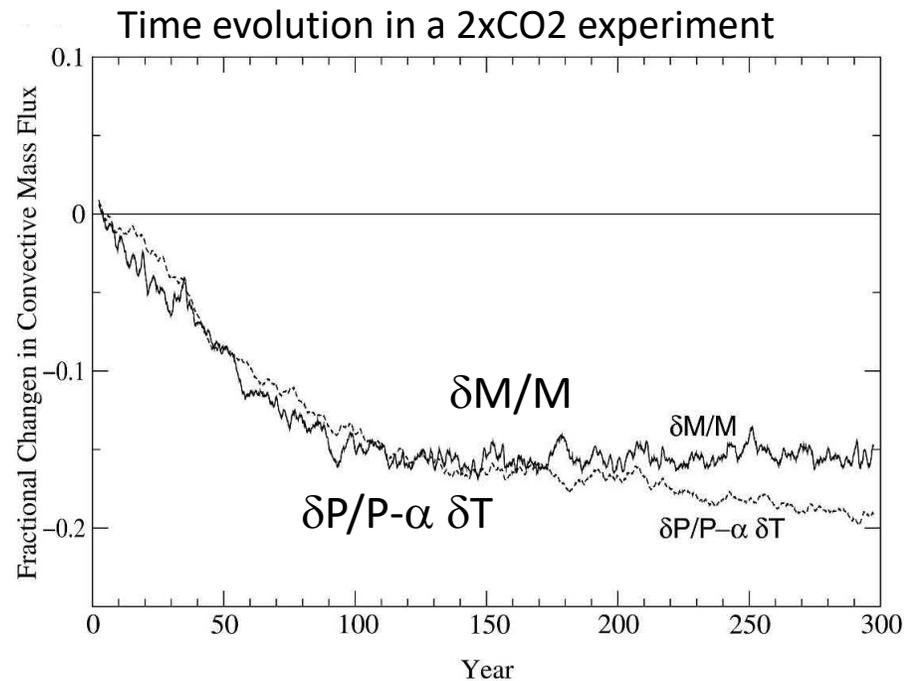
# 温暖化に伴うウォーカー循環の弱化

全球平均積雲質量フラックス( $\Delta M \propto \omega_{\uparrow}$ )が減少するメカニズム

全球水収支による制約

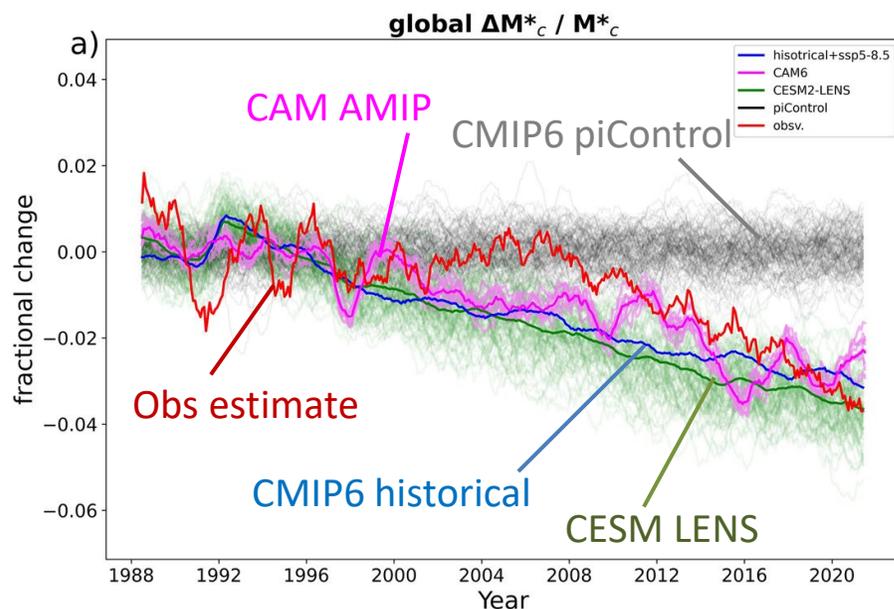
$$\frac{\Delta M}{\bar{M}} = \frac{\Delta P}{\bar{P}} - \frac{\Delta q}{\bar{q}} \approx \frac{\Delta P}{\bar{P}} - \alpha \Delta T \sim -5\%/K$$

-
+
++

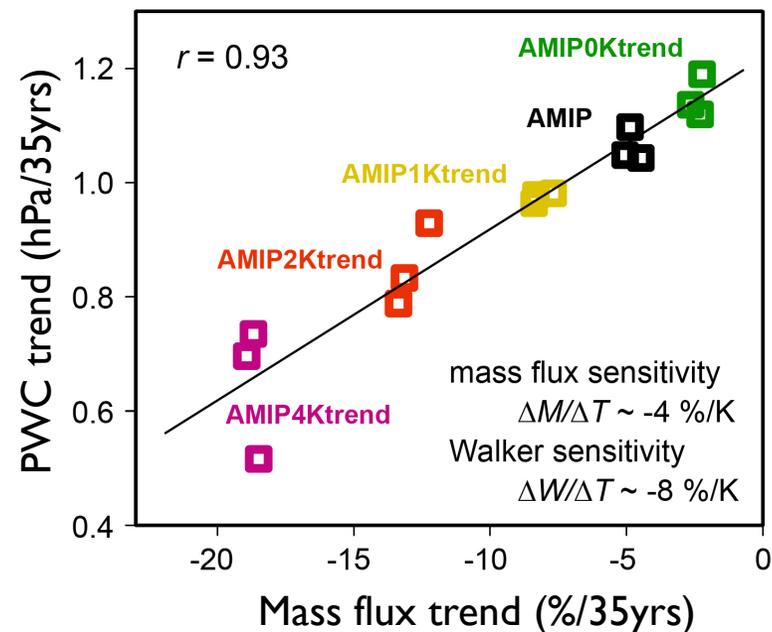


# 温暖化に伴うウォーカー循環の弱化

全球平均積雲質量フラックス( $\Delta M$ )は過去数十年で減少しているが、ウォーカー循環は強化している



Shrestha and Soden (2023 GRL)



Watanabe et al. (2023 GRL)

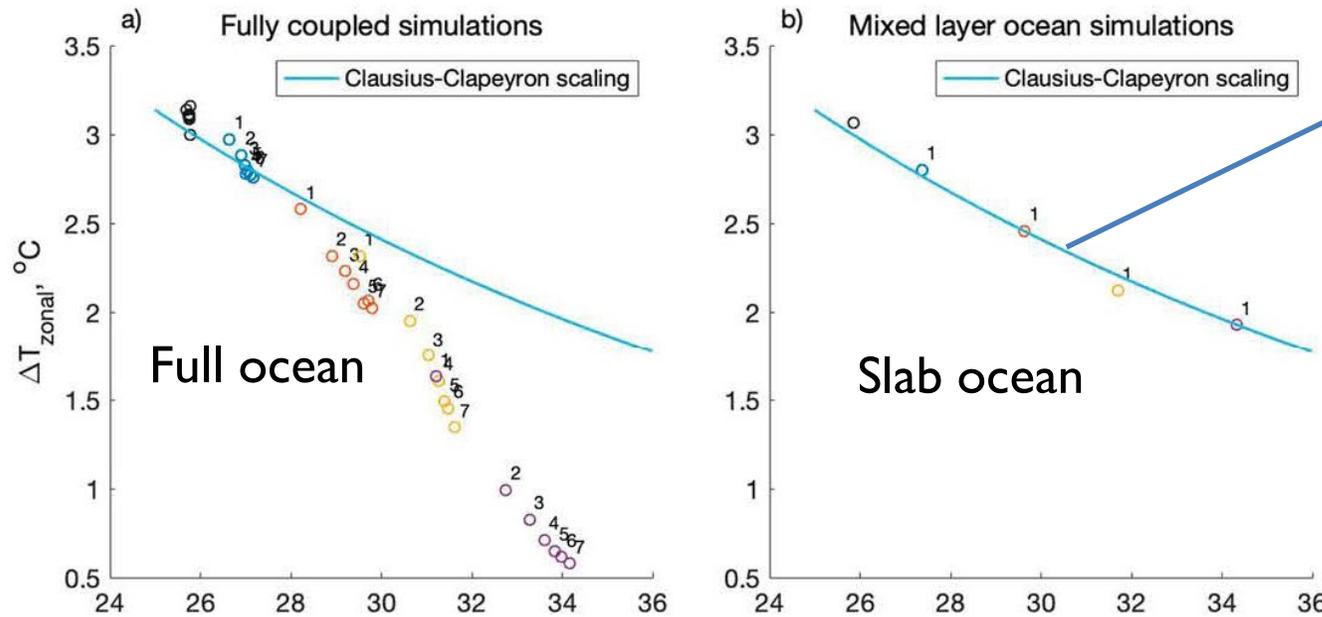
見かけの不一致は、SSTパターンの循環に対する効果による( $\Delta M$ はほぼ影響されない)  
 一様な温度上昇で、ウォーカー循環は  $\sim 8\%/K$  の割合で弱化するが、現在の温暖化レベルではパターン効果に負ける

# 海面フラックスのダンピング効果

海面蒸発による温暖化の抑制は西で強く、東で弱い (i.e., the west-east difference in evaporative cooling)  $\Rightarrow$  温暖化時にSST東西勾配を弱めるようにはたらく (Knutson & Manabe 1995 JC)

気候モデルによる理想化温暖化実験(GCM NxCO<sub>2</sub> exp)の結果

SST東西勾配弱化  
↓



理論値  
(クラウジウス・クラ  
ペイロン)

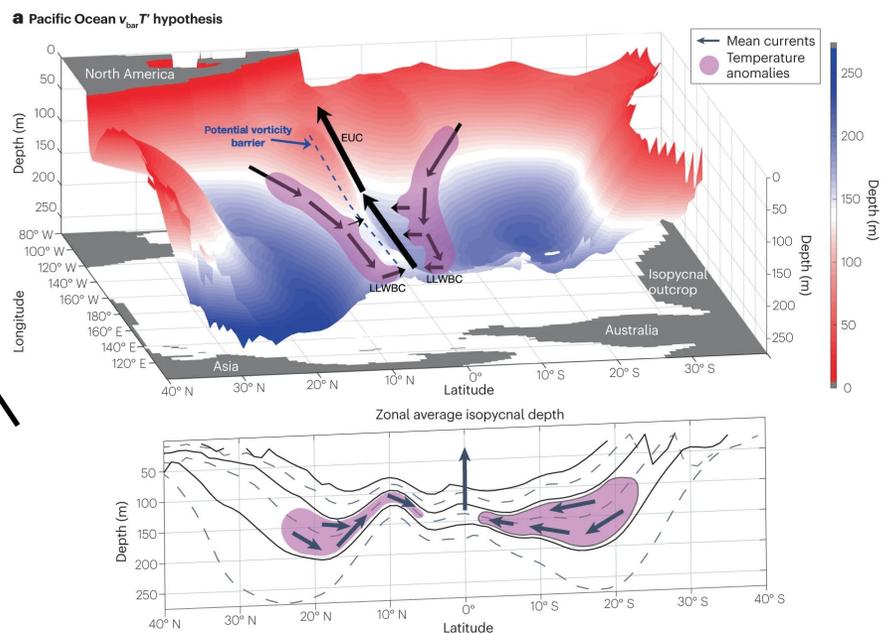
熱帯平均 SST (degC)  $\propto$  温暖化レベル

Heede et al. (2020 JC)

# 海洋トンネル(熱帯-中高緯度結合)

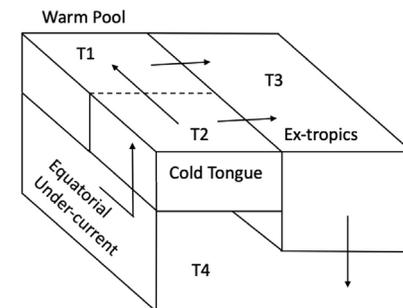
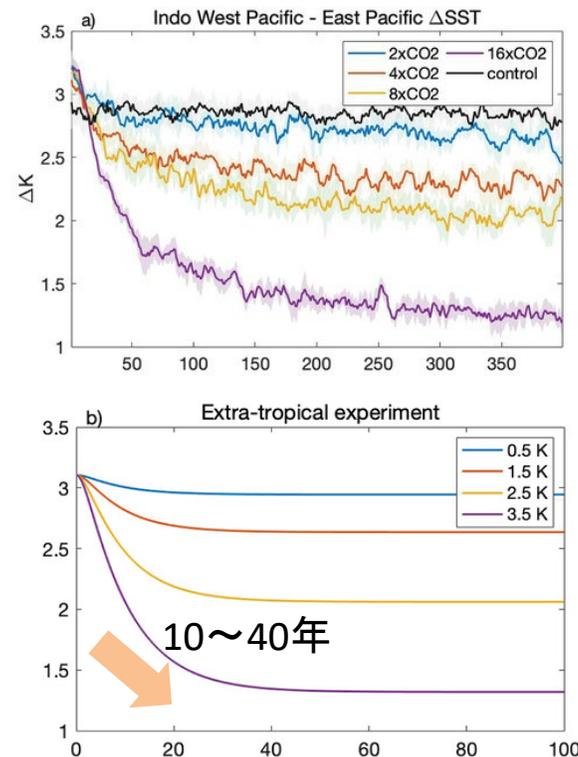
中緯度海洋の温暖化は亜熱帯セルを介してゆっくりと東部赤道太平洋の亜表層に伝わる

## 海洋内部の熱輸送経路



Capotondi et al. (2023 Nature Reviews)

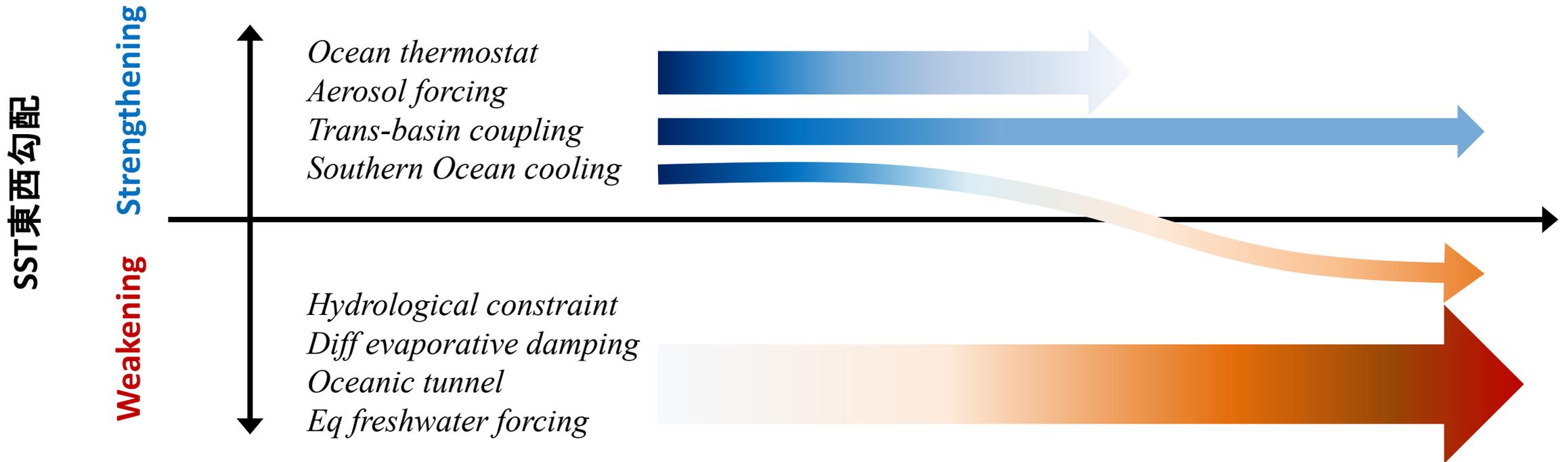
## GCM NxCO2実験におけるSST東西勾配の変化



Heede et al. (2020 JC)

このメカニズムが働くとサーモスタットの効果はなくなってゆくはず

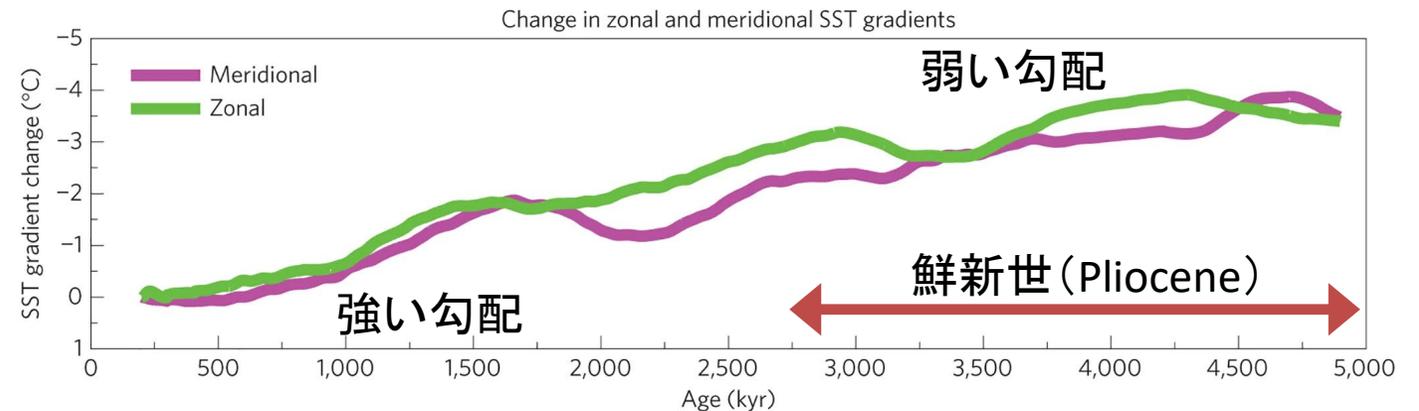
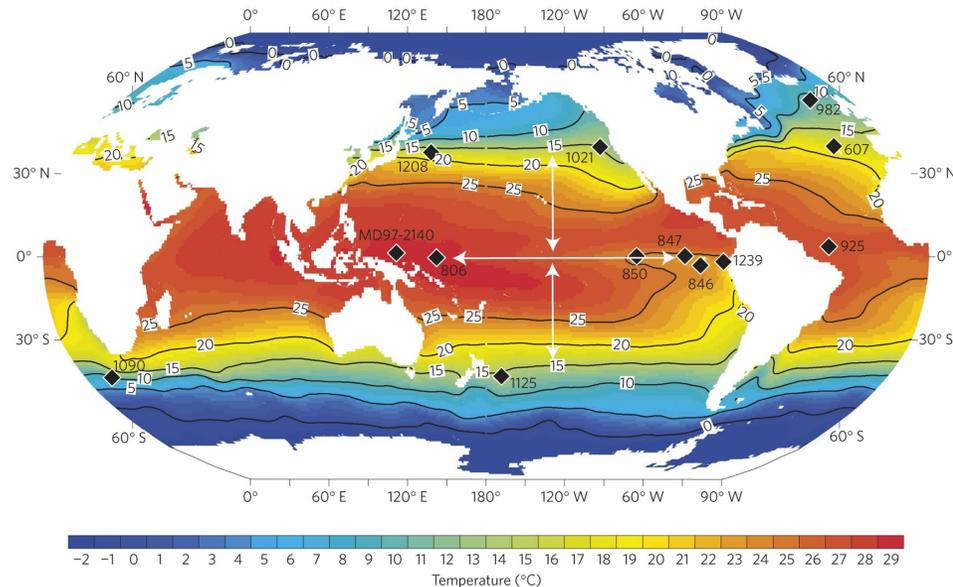
# 個々のメカニズムの評価 (multiple lines of evidence)



\* Time of emergence (from strengthening to weakening) is unclear

# 古気候学的エビデンス

古気候プロキシから再現される鮮新世(温暖な気候)以降のSST分布は、南北勾配と東西勾配が連動していることを示す



東西勾配 = 暖水域 - 冷舌域  
 南北勾配 = 熱帯 - 中高緯度

Fedorov et al. (2015 Nature Geo)  
 (also Tierney et al. 2019 GRL, Wycech et al. 2019 Paleoceanogr)

鮮新世の気候は将来の温暖化した気候の代替と考えられる ⇒ 将来のSST東西勾配は弱化することを示唆

## Narrative

*Mechanisms leading to strengthening of the zonal SST contrast have been efficient in the past and those leading to a weakening were less efficient but will become dominant at large global warming levels*

*熱帯太平洋のSST東西勾配を強化させるメカニズムは、過去は効率的であったが、将来温暖化レベルが上昇すると弱化させるメカニズムが支配的になるだろう*

## これから何をすべきか

- ナラティブの検証
  - 各メカニズムの役割を**定量化する**
  - 決定的なエビデンス
  - emergent constraint
  - 理論
  
- モデルの内部変動再現性を調べる(冒頭の仮説#2)
  
- モデルのバイアス/誤差/足りないプロセスを突き止める

IPCC AR7までに物理プロセスに基づく確かな説明を可能にすることが目標！