

平成18年度 サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト 教員研修 気候科学コース

大気・海洋の観測・シミュレーションデータから見る気候の状態と変動

羽角博康

東京大学気候システム研究センター

はじめに

気候科学コース 趣旨

- 大気・海洋の観測・シミュレーションデータの描画を通して、現在の気候の状態を把握する
(※ 体系だった知識の習得は目的とし**ない**)
- 全球規模の気候の成り立ちについて、データ・講義を通して理解する
- 気候変動の実例をデータで見る
- 地球温暖化予測シミュレーションの結果を見る
- 気候の数値モデリングという概念および手法について知る

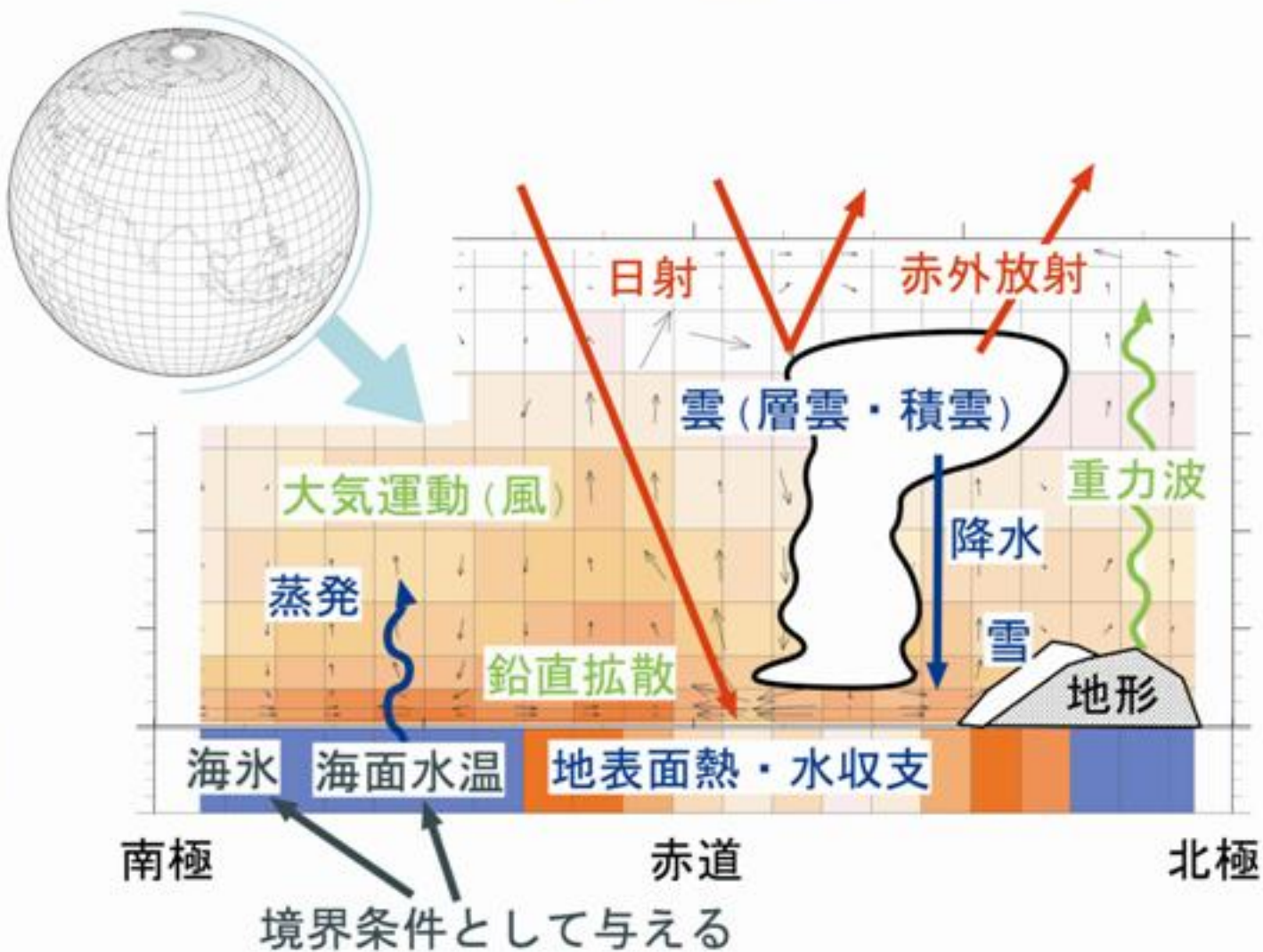
気候の数値モデリング

大気大循環モデル

- 天気予報にも用いられる、大気の数値モデル
- 大気の力学・熱力学を記述する偏微分方程式系、および陸面の状態を記述する方程式系を解く数値計算プログラム
- 大気組成・海面水温・入射太陽光を与えて大気および陸面の状態を得る
- 全球大気を有限の大きさを持つ“格子”に区切り、各格子点での温度・風速等を、一定の時間間隔ごとに計算する
- 格子で解像されない現象をどのように表現するかが重要(とくに雲と放射)

気候の数値モデリング

大気大循環モデル



気候の数値モデリング

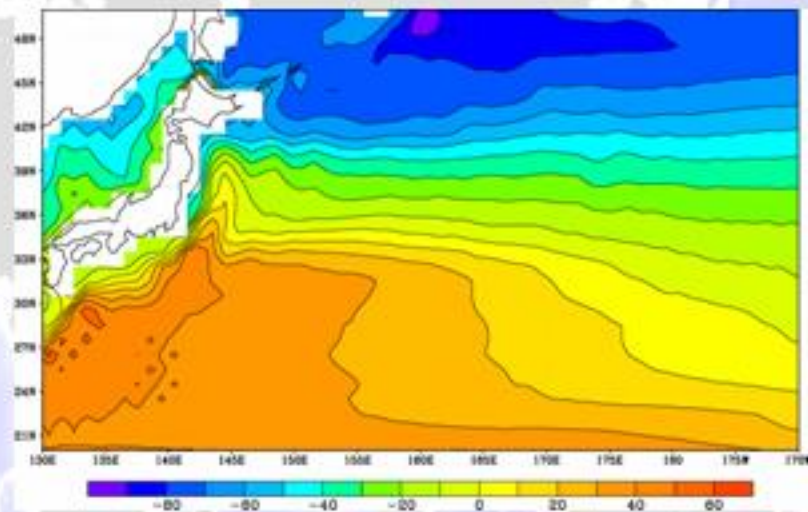
海洋大循環モデル

- 海洋の力学・熱力学を記述する偏微分方程式系(~大気と同じ)および海氷を記述する方程式系を解く数値計算プログラム
- 海上大気の状態(気温・湿度・風速など)を与えて海洋内部の状態を得る
- 大気大循環モデルと同様に、全球海洋を有限の大きさの“格子”に区切り、各格子点での温度・塩分・流速等を一定時間間隔ごとに計算する
- 格子で解像されない現象をどのように表現するかが重要(とくに“渦”運動)

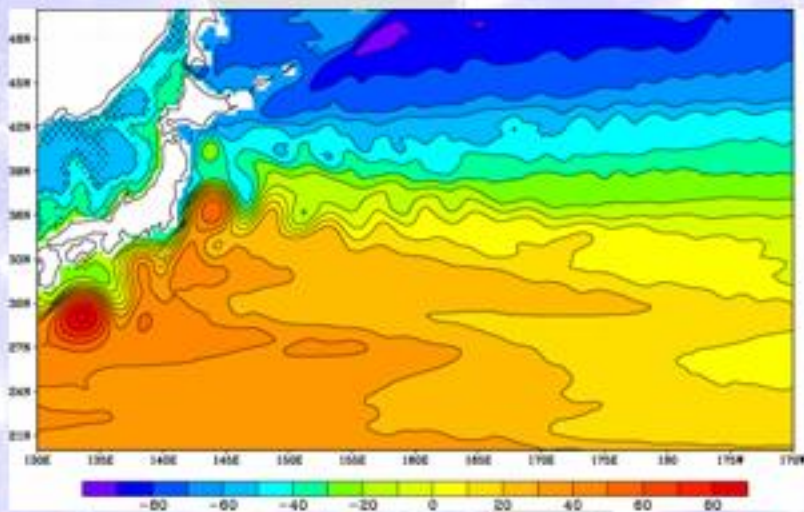
気候の数値モデリング

海洋大循環モデル

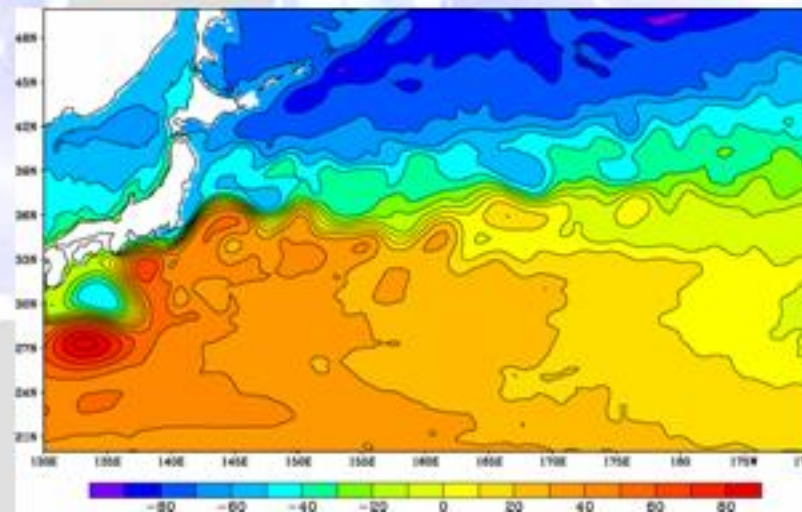
— 渦運動の表現と再現される循環 —



$1^\circ \times 1^\circ$



$1/3^\circ \times 1/3^\circ$



$1/4^\circ \times 1/6^\circ$

気候の数値モデリング

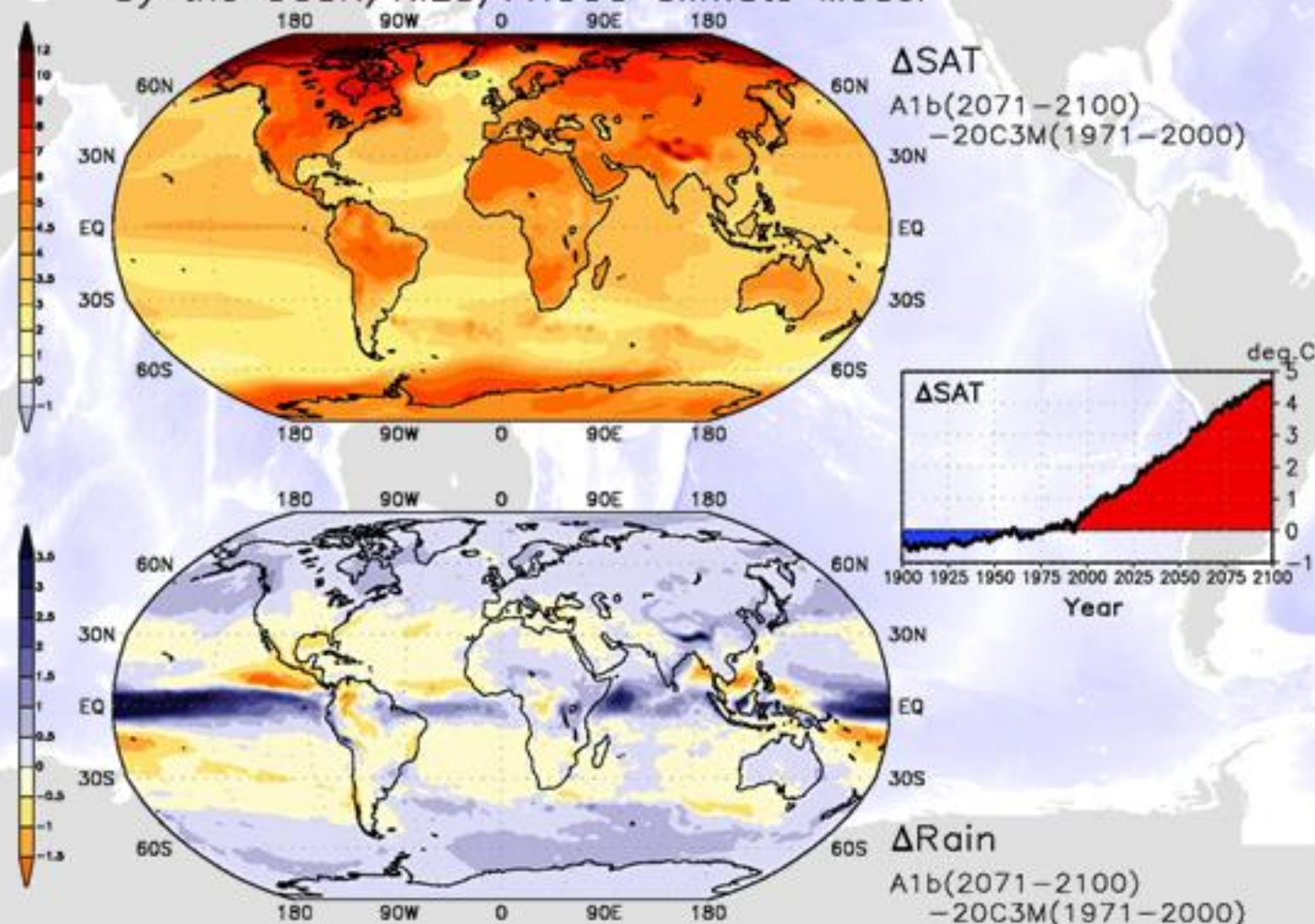
大気海洋結合モデル

- 大気大循環モデルで必要とされる海面水温を海洋大循環モデルで計算し、海洋大循環モデルで必要とされる海上大気の状態を大気大循環モデルで計算することにより、入射太陽光を与えるだけで大気・海洋・陸面といった気候系の(物理的)状態を再現・予測する数値計算プログラム
- 例えば、将来の大気中二酸化炭素濃度変化を与えれば、他には特別な情報を与えなくても、それに伴う気候変化予測を行うことができる

気候の数値モデリング

大気海洋結合モデルによる温暖化実験例

Global Warming Simulation
by the CCSR/NIES/FRCGC Climate Model



データセット

使用するデータセットの種類

- 観測

文字通りの直接観測(風速計・温度計など)や人工衛星などによる間接観測

...通常、時間・空間に一様にデータがあることは保障されない

- 再解析

観測データを数値モデルに“同化”して得られた格子データ

- シミュレーション(モデリング)

純粹に数値モデルによる再現・予測

大気の平均的状态

気圧座標系

-観測との兼ね合い、および数学的定式化のメリットのため、鉛直座標として高度ではなく気圧を用いることがよくある

-静水圧の関係式: $dp/dz = -\rho g$... 高度と気圧の対応
(p : 気圧, z : 高度, ρ : 密度, g : 重力加速度)

等温大気の場合: 気体の状態方程式 $p = \rho RT$ (R : 気体定数, T : 気温)より

$$p = p_s \exp(-RT(z-z_s)/g)$$

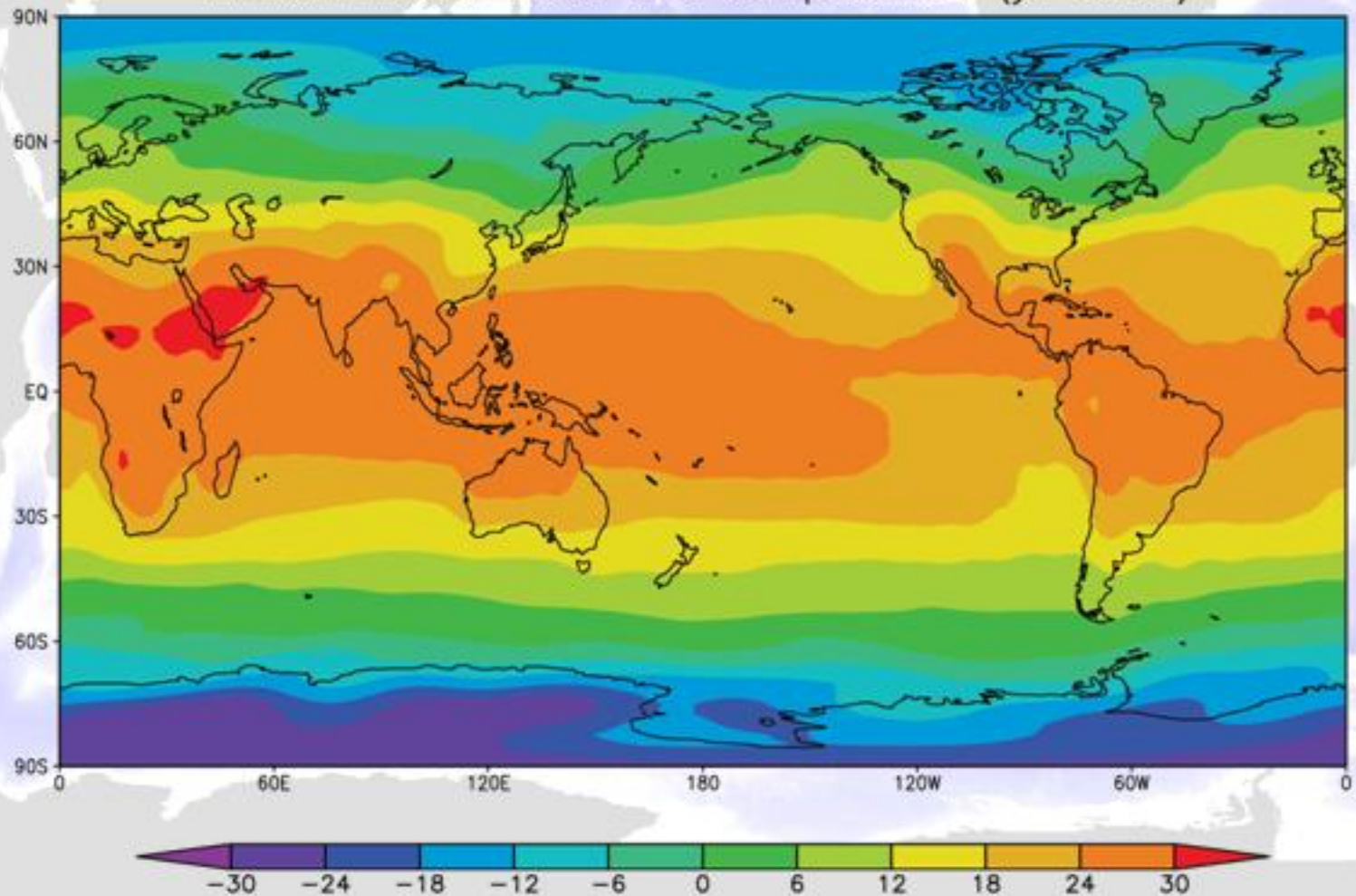
(p_s : 地表面気圧, z_s : 地表面高度)

$R = 287 \text{ J/kgK}$, $T = 273 \text{ K}$ として、 $g/RT \sim 8 \text{ km}$

大氣の平均的状态

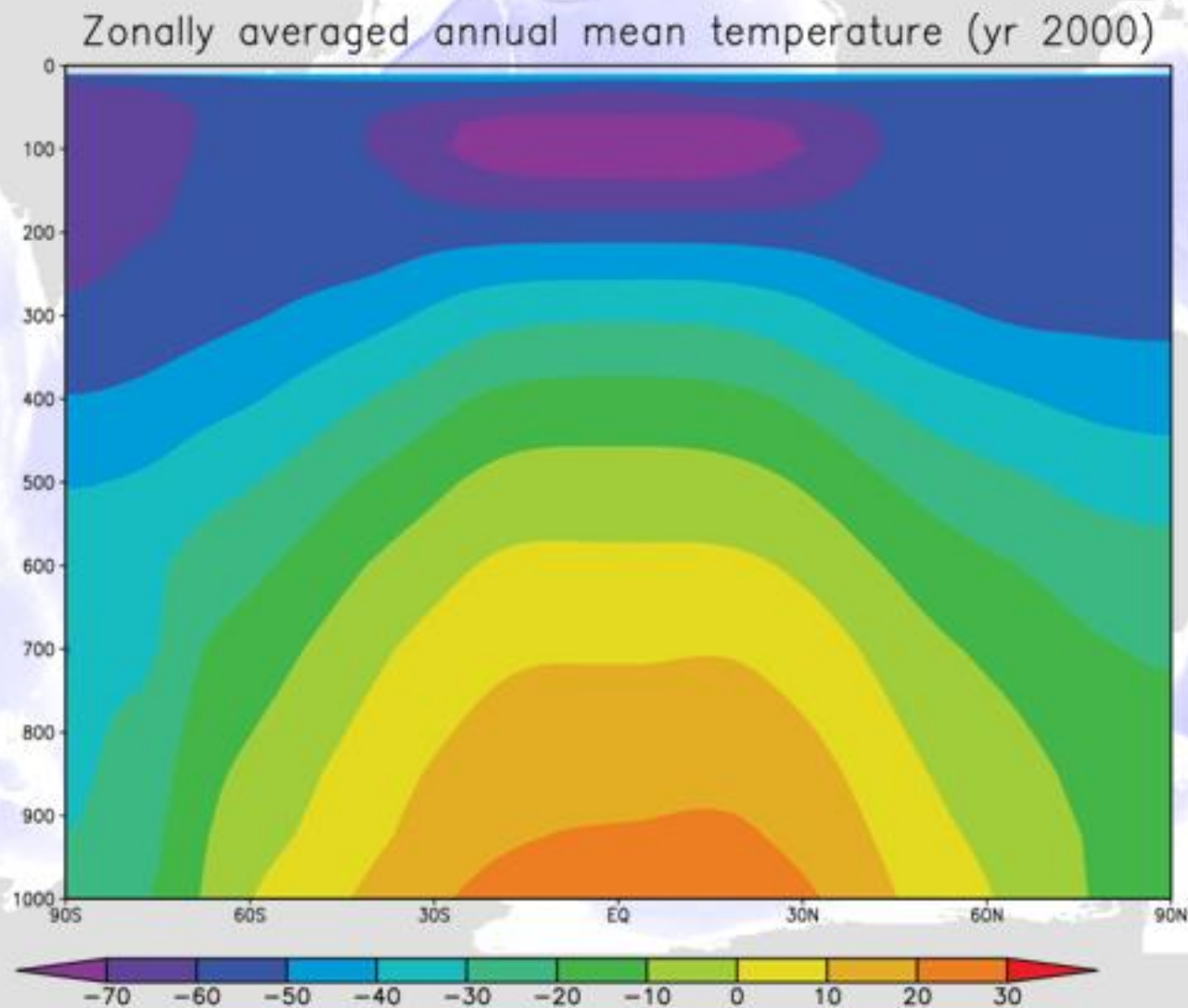
地表付近の年平均気温

Annual mean 1000 hPa temperature (yr 2000)



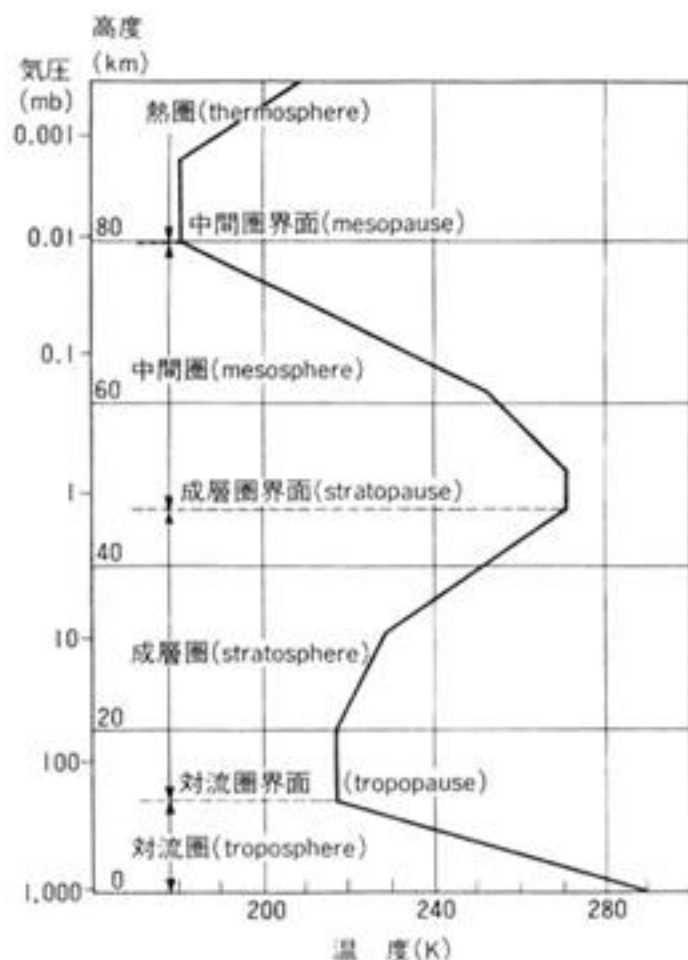
大氣の平均的状態

年平均・東西平均気温



大気の平均的状态

大気の平均的鉛直温度構造



**太陽光による大気の加熱
(太陽光の吸収)**

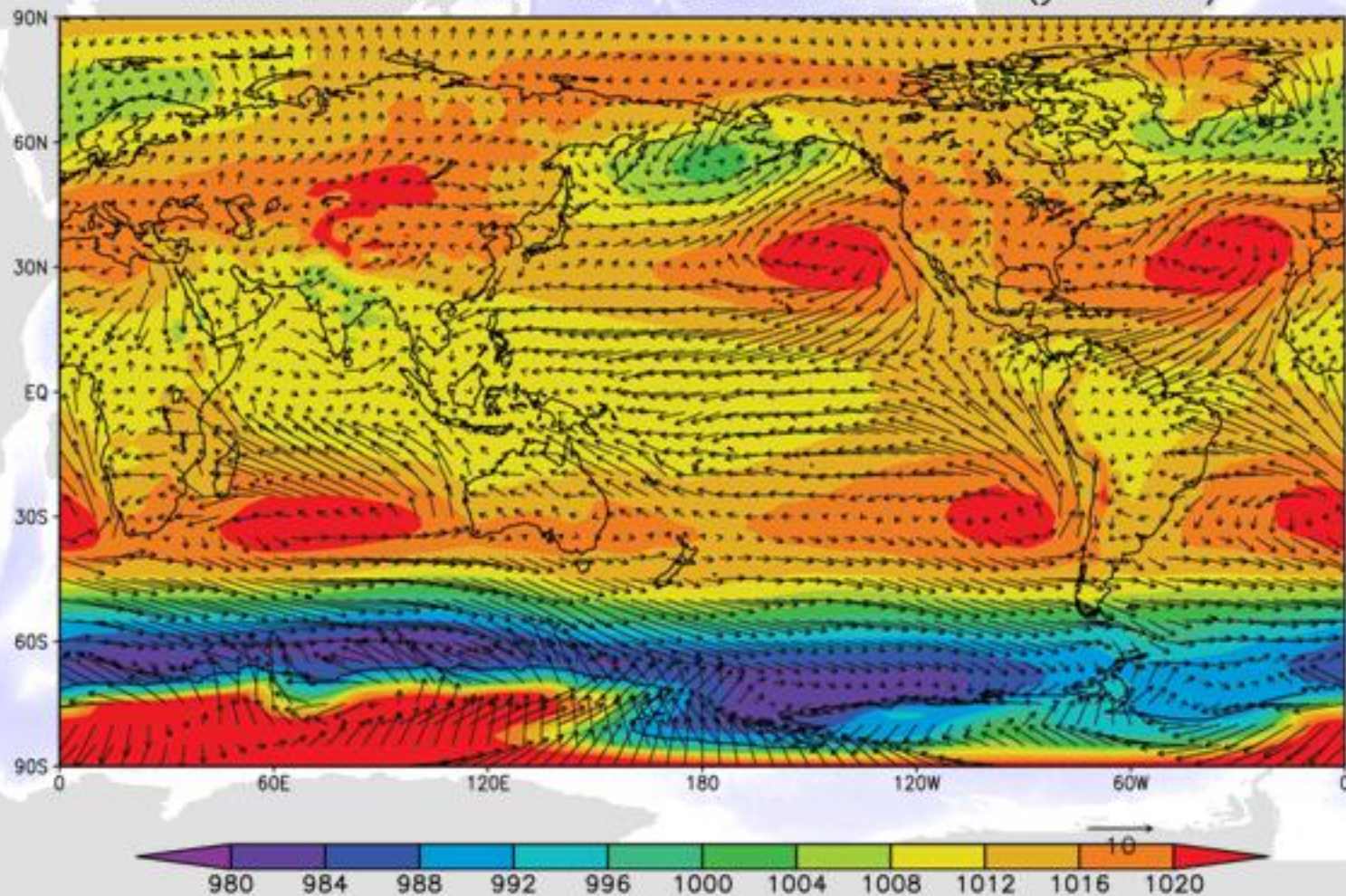
**-地表面
海水・植生・地面などによる吸収**

**-成層圏
オゾンの光化学反応に伴う紫外線吸収**

大気の平均的状态

年平均海面校正気圧と地表付近の風

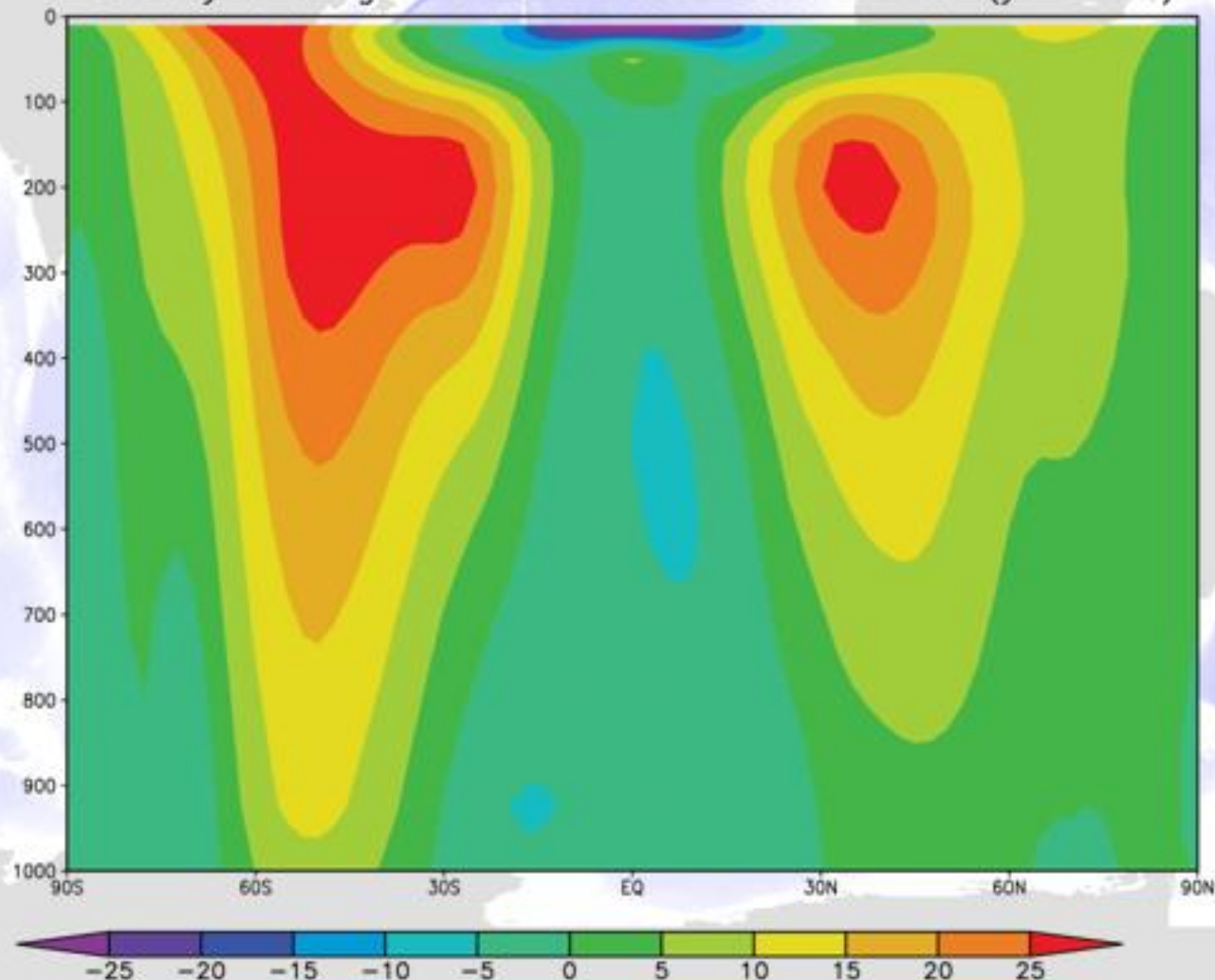
Annual mean SLP and 1000 hPa winds (yr 2000)



大氣の平均的状態

年平均・東西平均西風

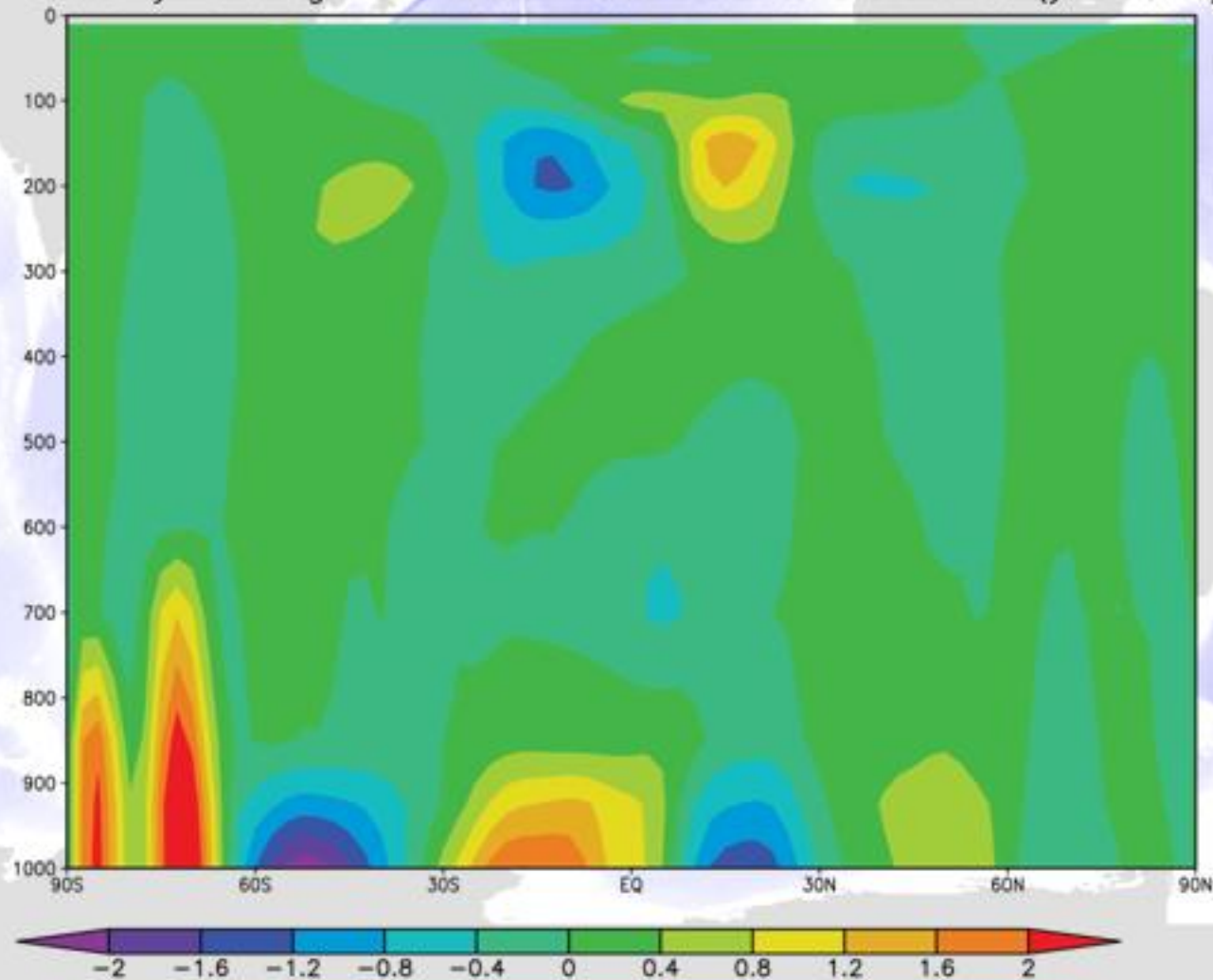
Zonally averaged annual mean zonal winds (yr 2000)



大氣の平均的状態

年平均・東西平均南風

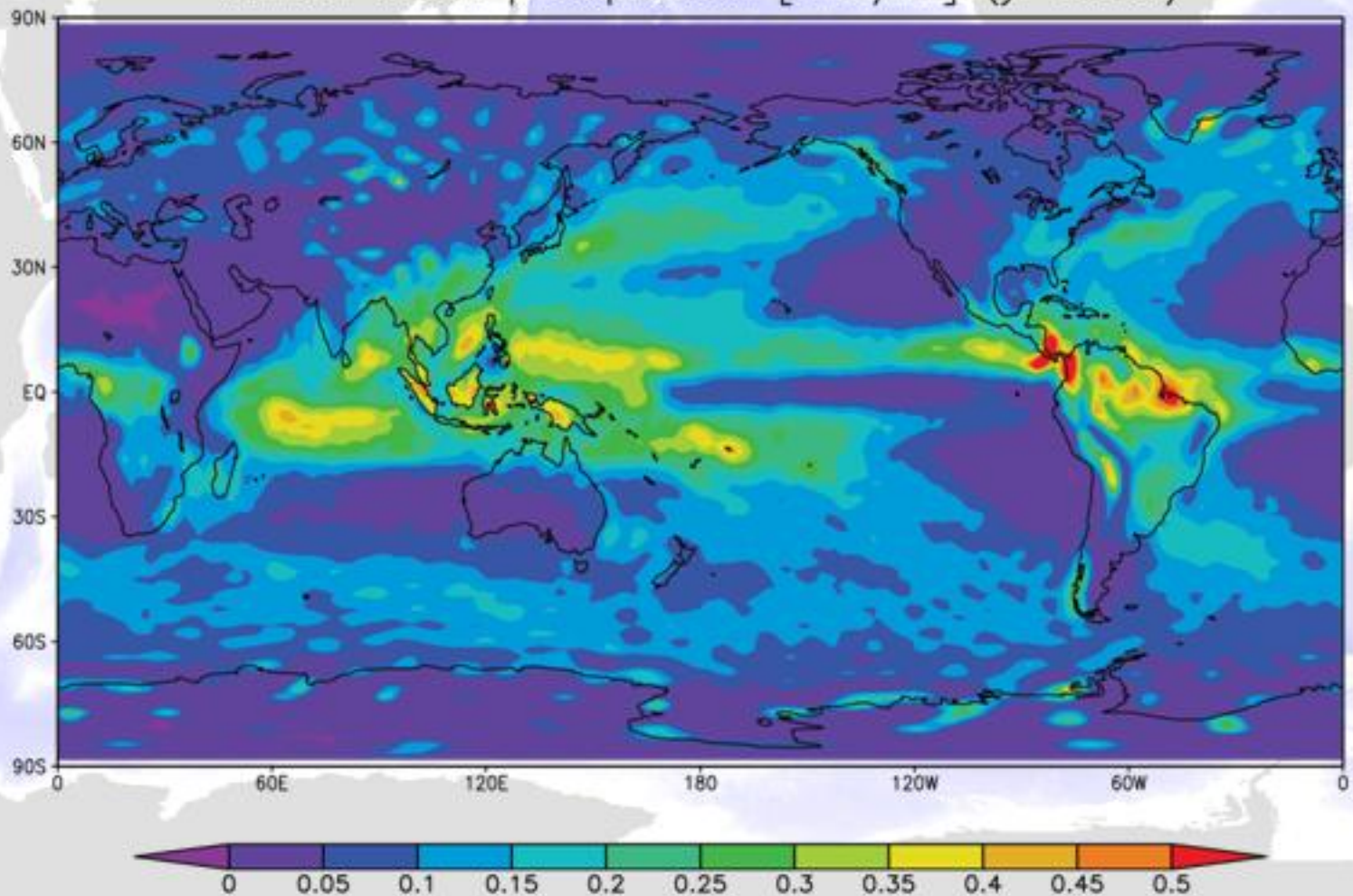
Zonally averaged annual mean meridional winds (yr 2000)



大氣の平均的状態

年平均降水量

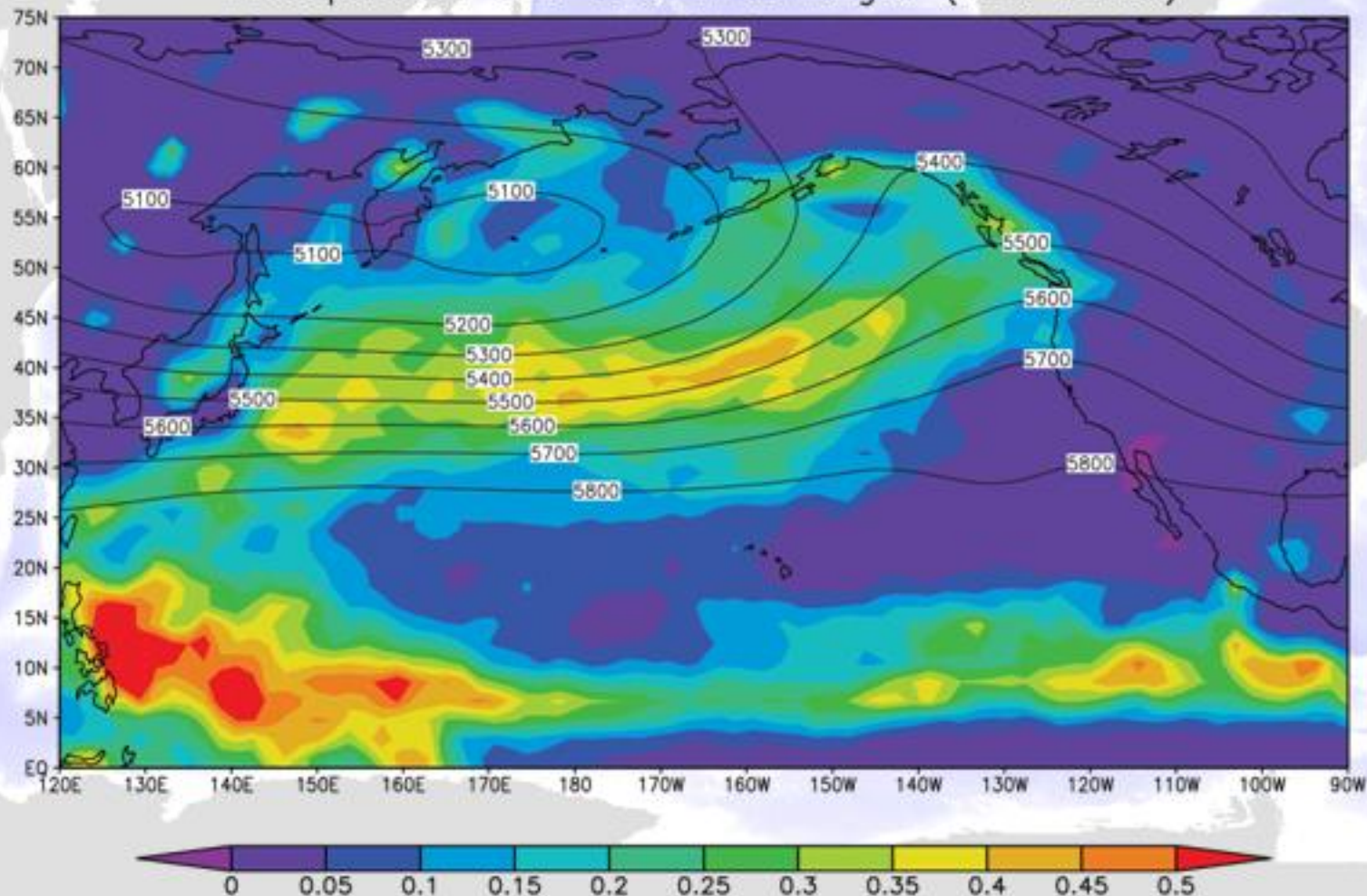
Annual mean precipitation [mm/hr] (yr 2000)



大氣の平均的状态

12月降水量と 500 hPa 等压面高度

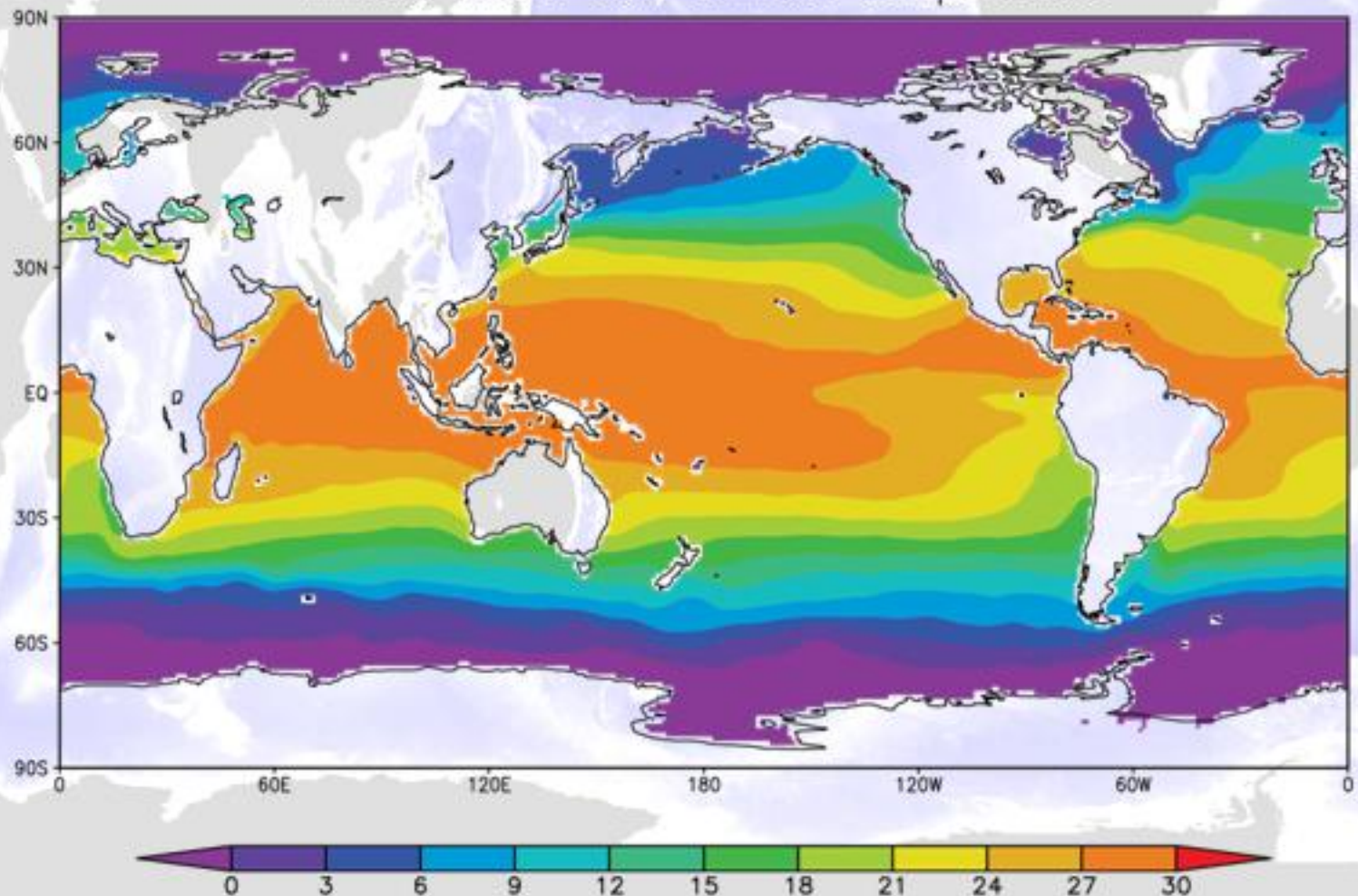
Precipitation and 500 hPa height (DEC 2000)



海洋の平均的状态

年平均海面水温

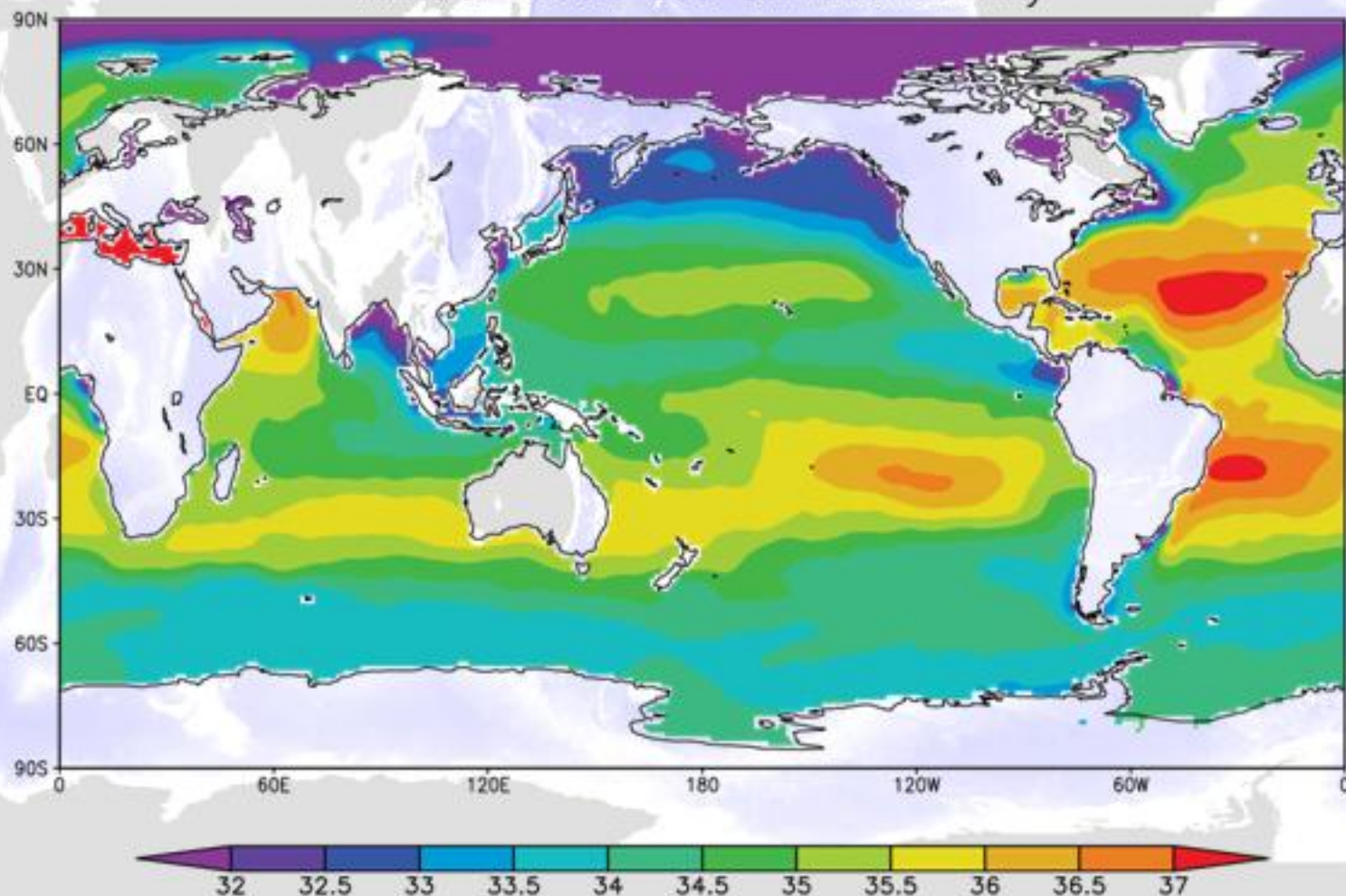
Annual mean sea surface temperature



海洋の平均的状态

年平均海面塩分

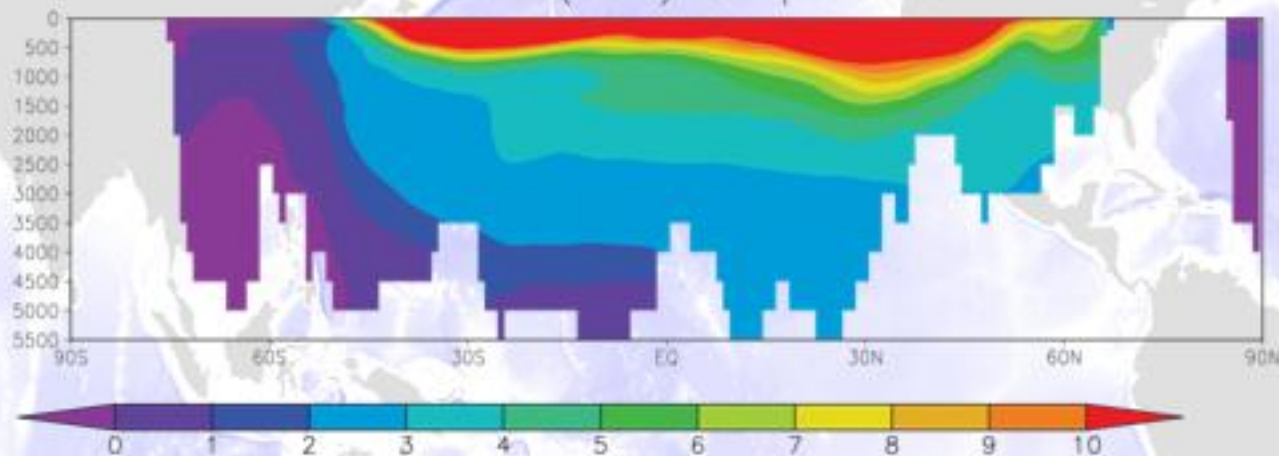
Annual mean sea surface salinity



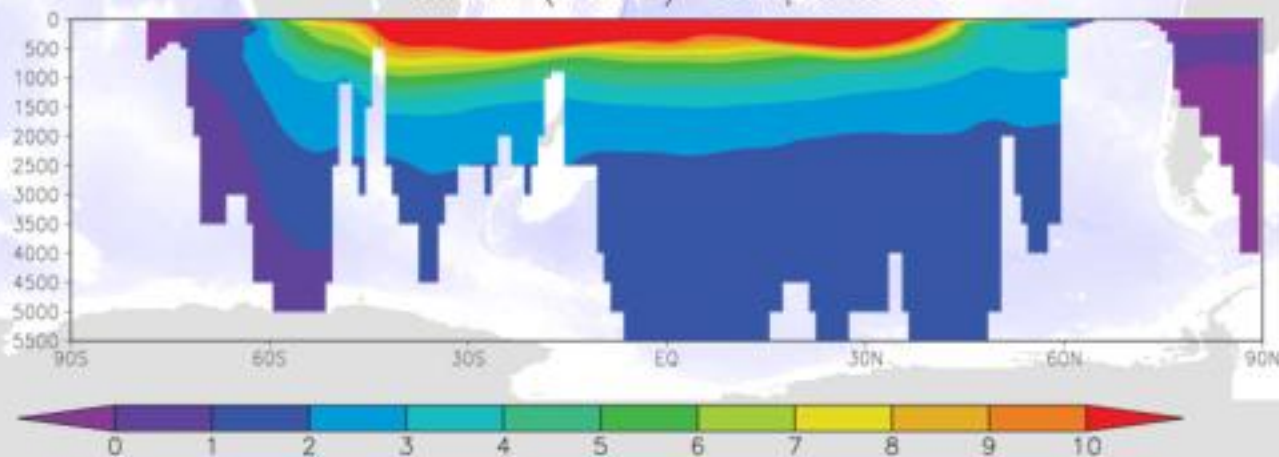
海洋の平均的状态

水温の緯度-深さ分布

Atlantic (30W) temperature



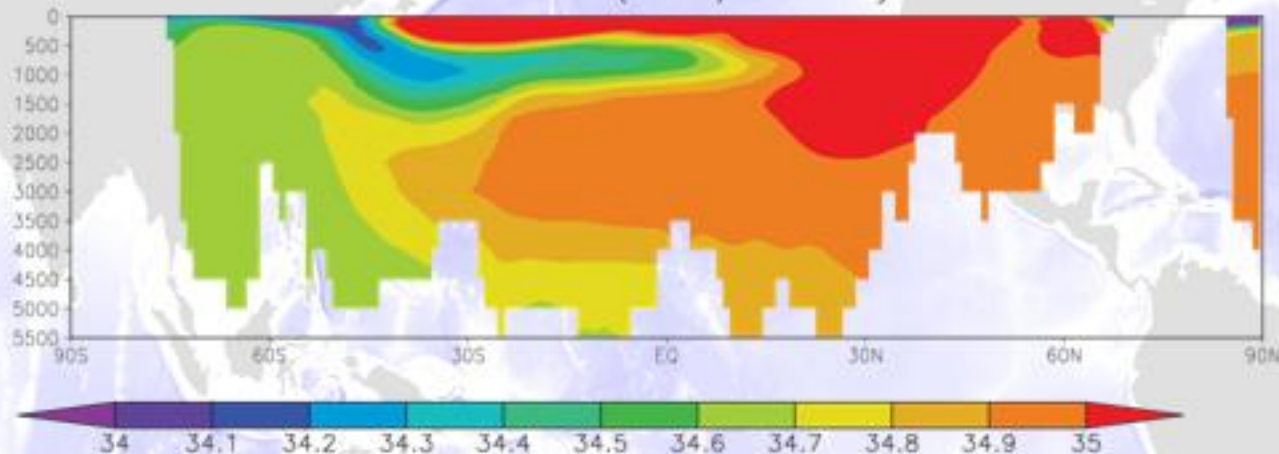
Pacific (180E) temperature



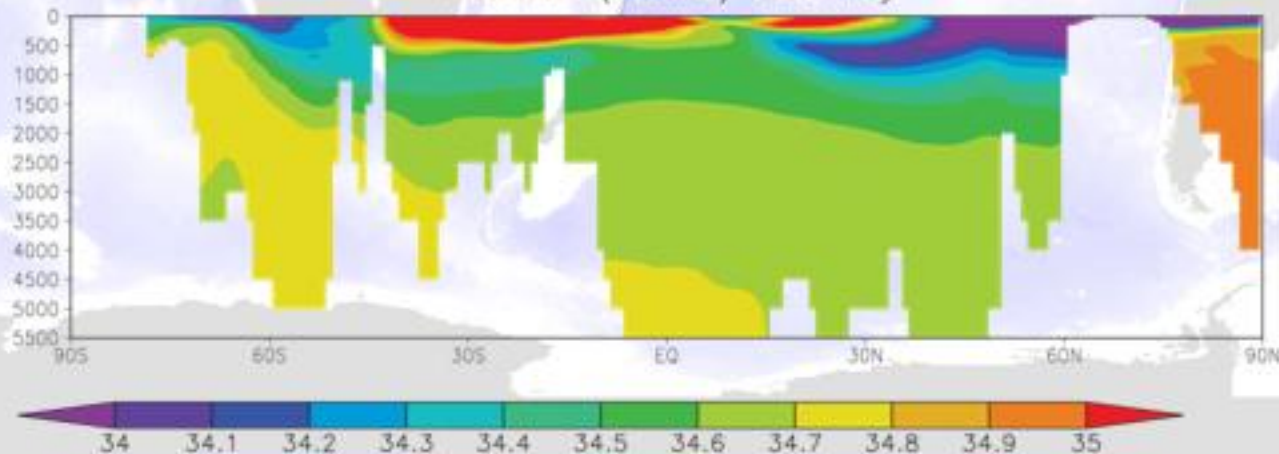
海洋の平均的状态

塩分の緯度-深さ分布

Atlantic (30W) salinity



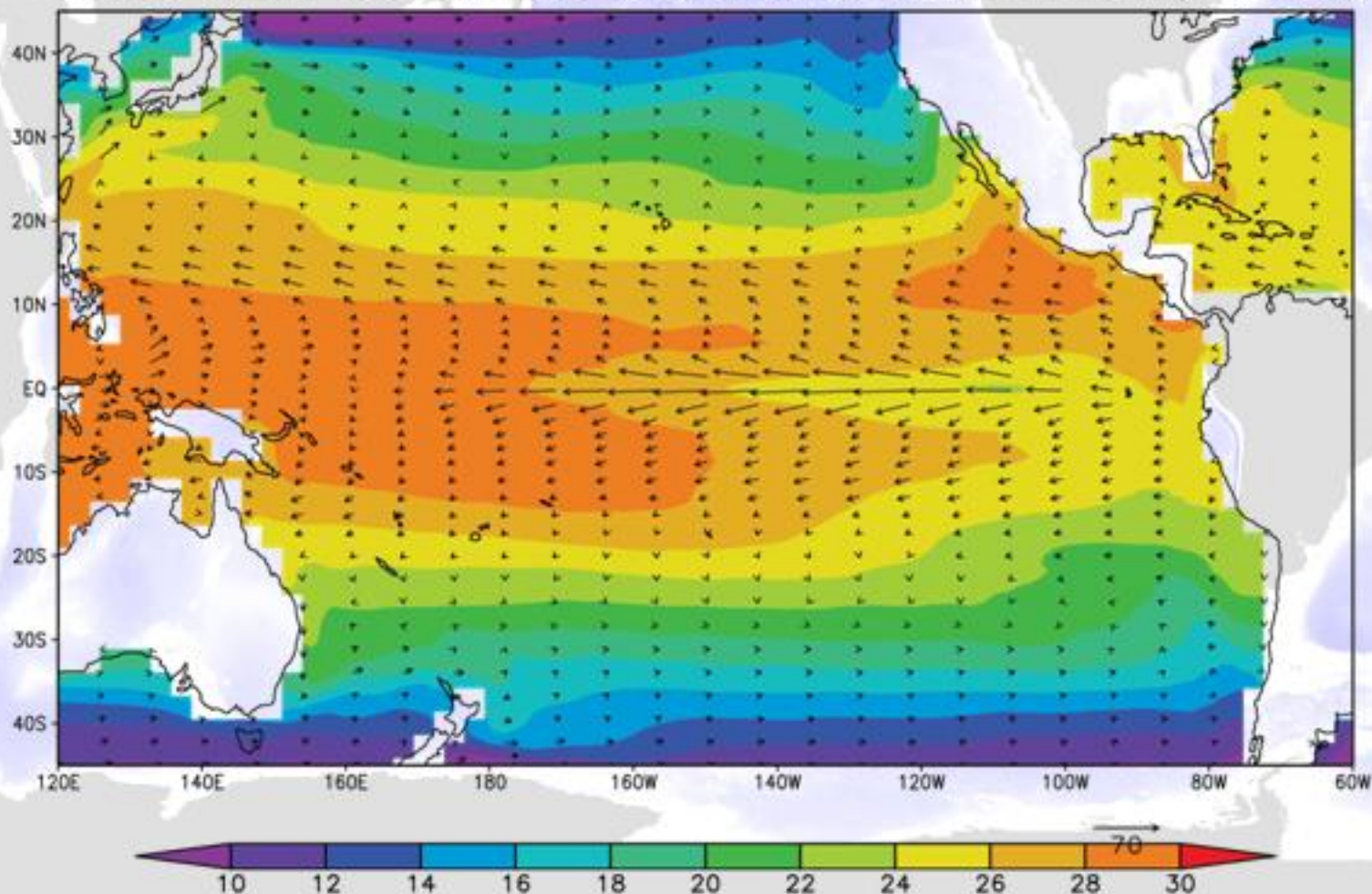
Pacific (180E) salinity



海洋の平均的状态

太平洋低緯度の海面水温と流速

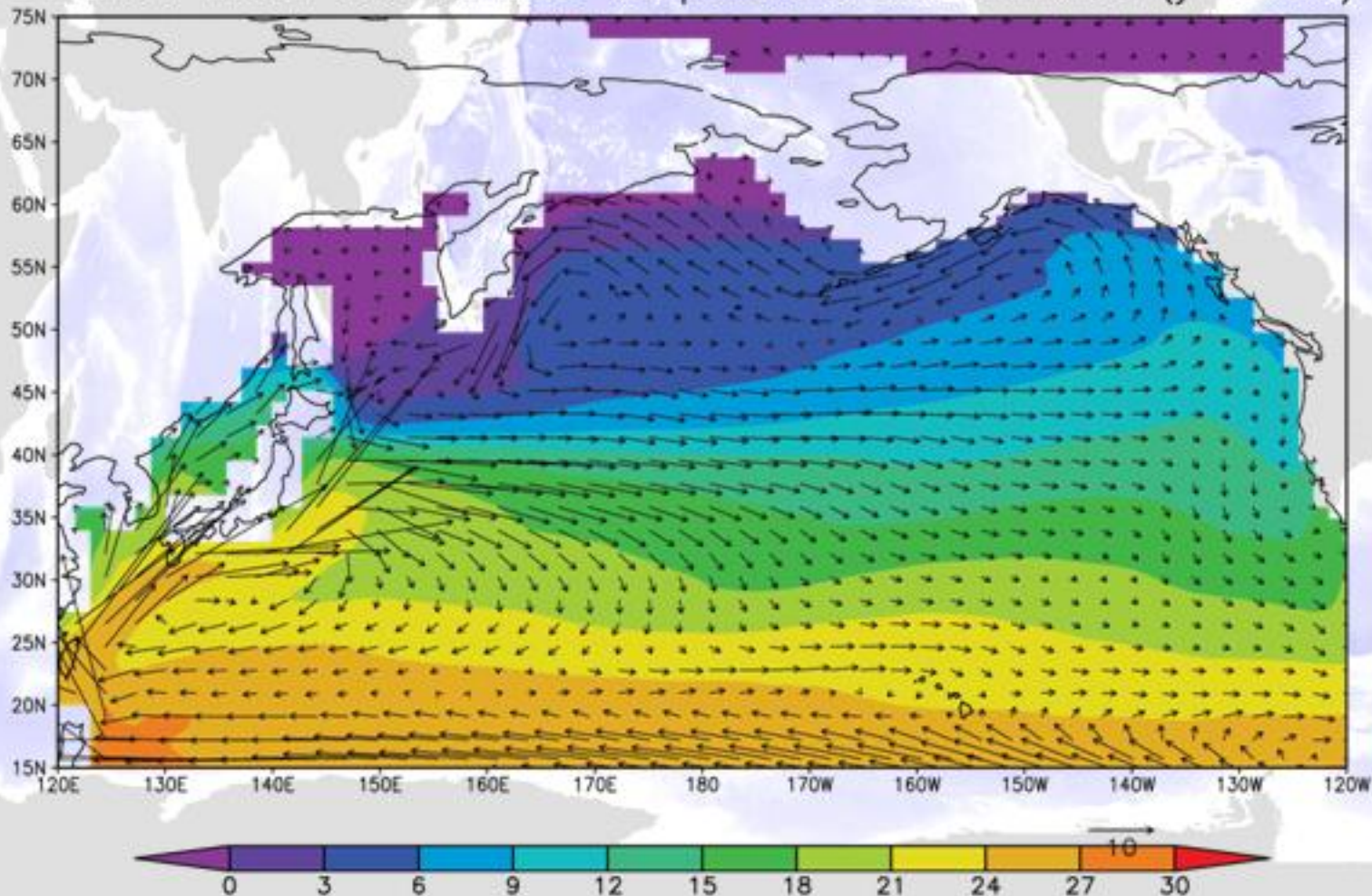
Annual mean sea surface temperature and currents (yr 2000)



海洋の平均的状态

北太平洋の海面水温と流速

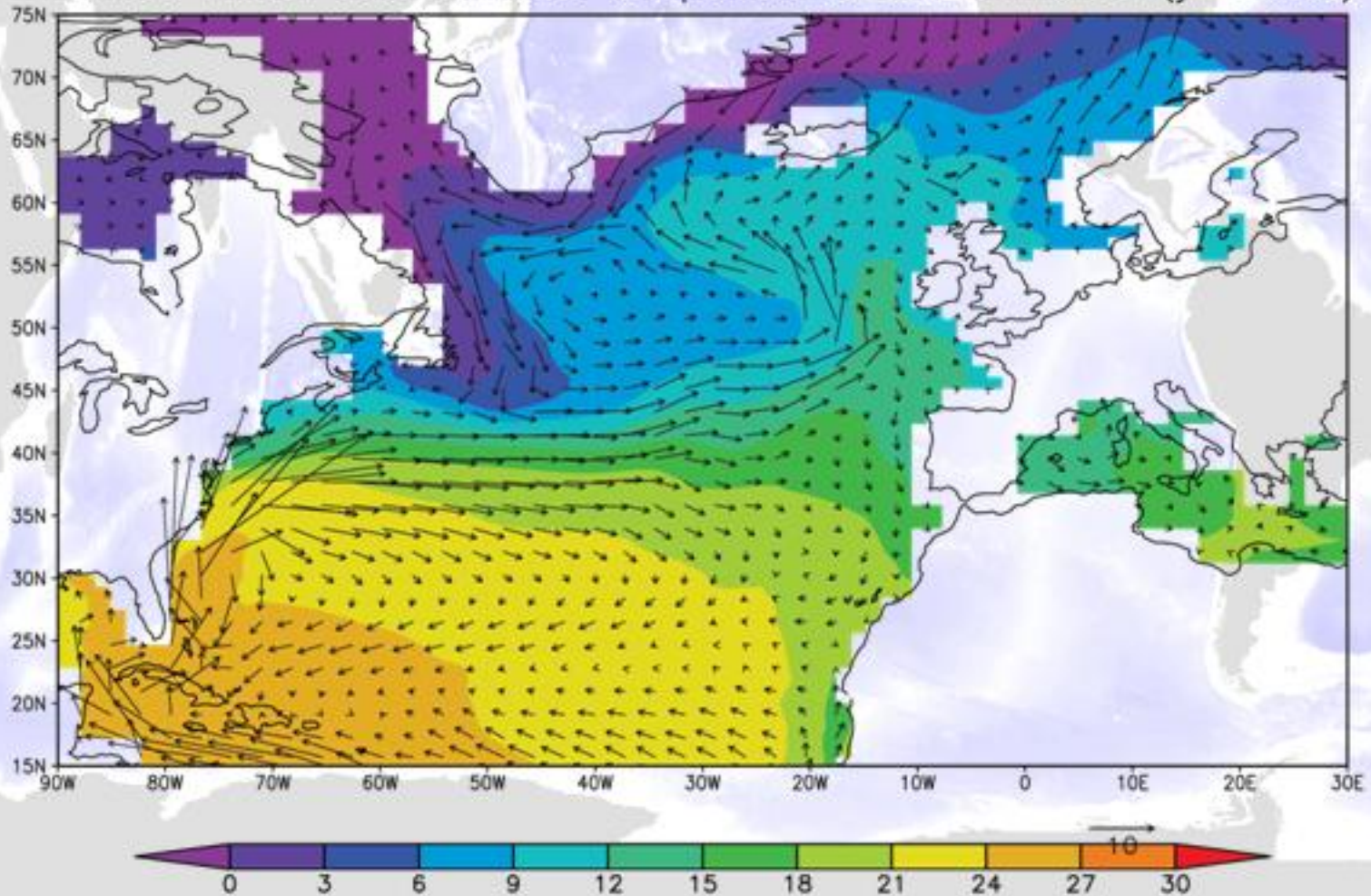
Annual mean sea surface temperature and currents (yr 2000)



海洋の平均的状态

北大西洋の海面水温と流速

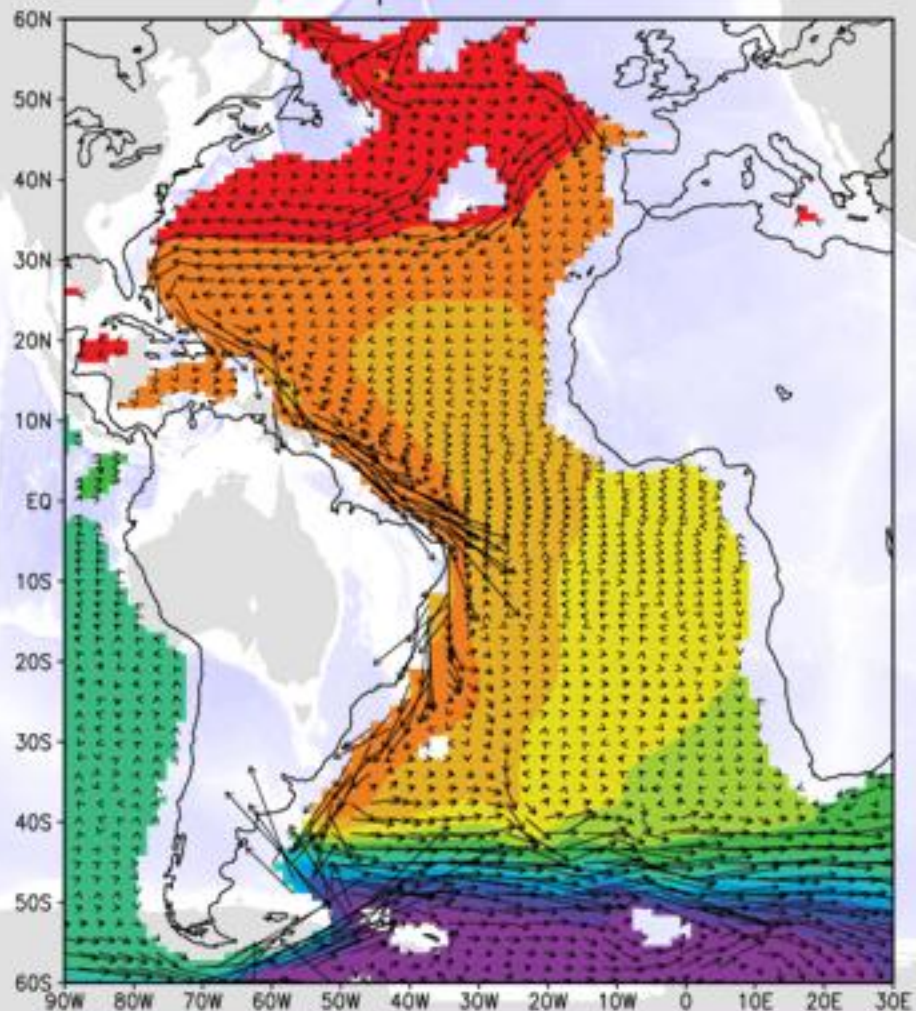
Annual mean sea surface temperature and currents (yr 2000)



海洋の平均的状态

大西洋深層の水温と流速

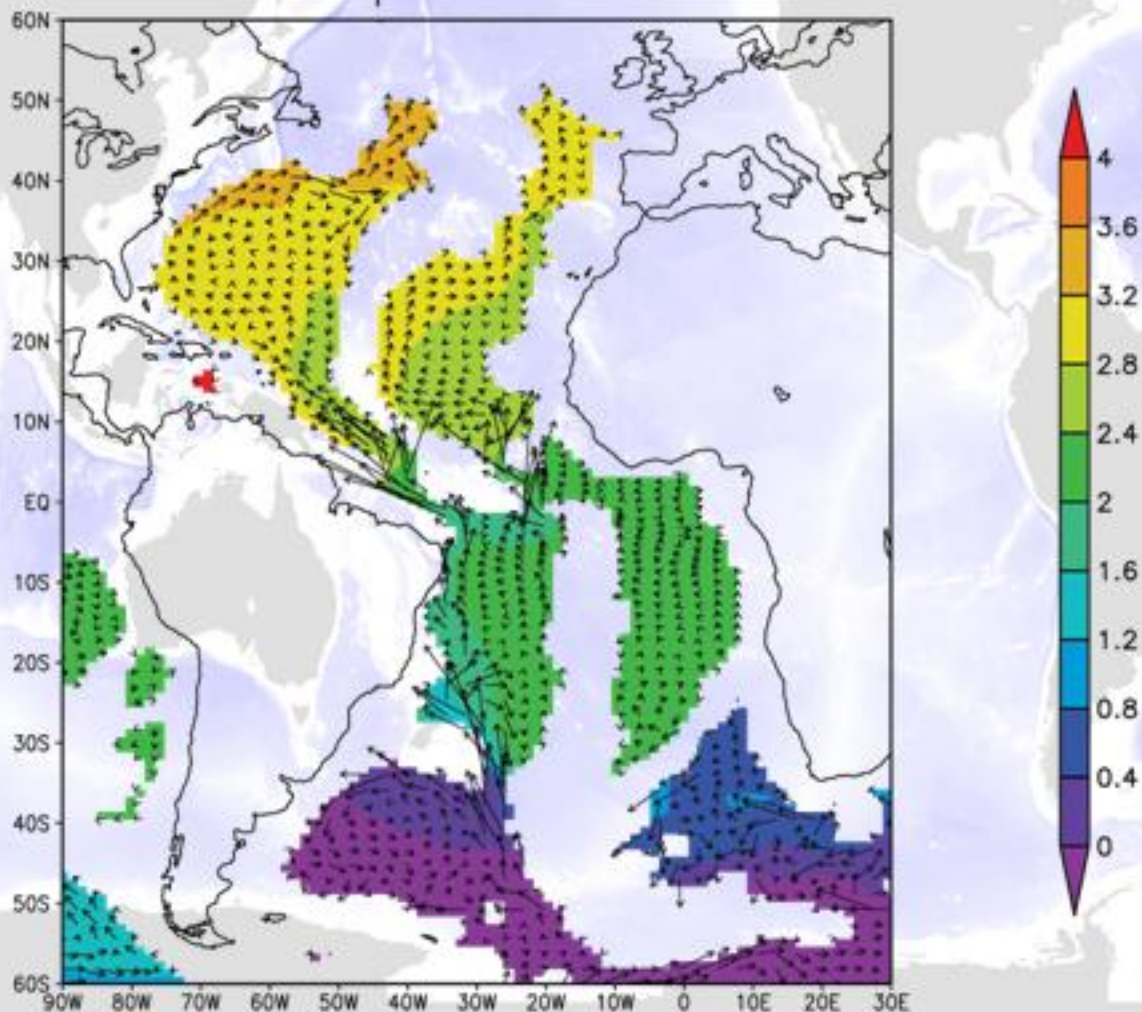
2500 m temperature and currents



海洋の平均的状态

大西洋底層の水温と流速

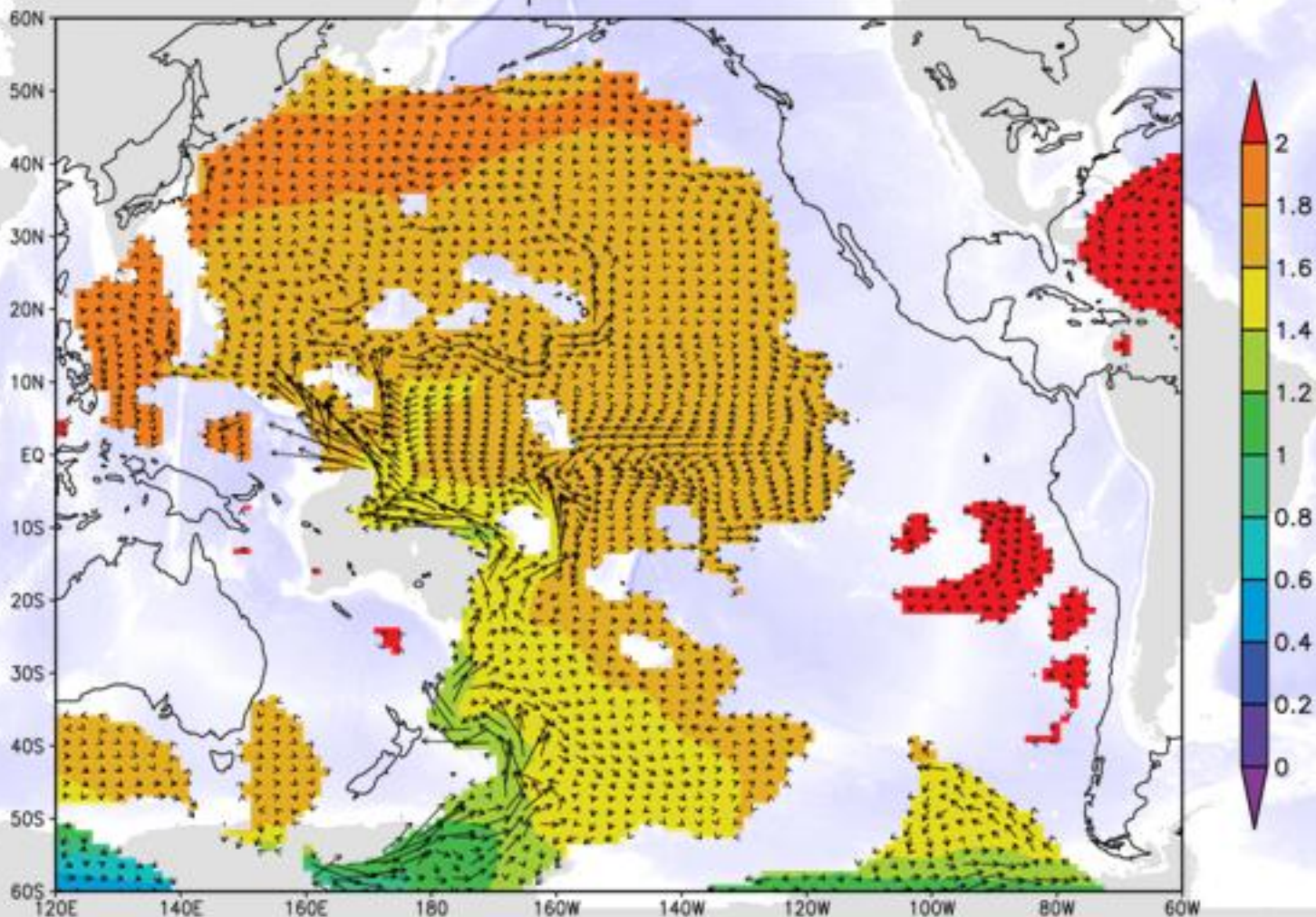
4000 m temperature and currents



海洋の平均的状态

太平洋深層の水温と流速

4000 m temperature and currents



気候変動:エルニーニョ

エルニーニョと南方振動

(ENSO: El Nino and Southern Oscillation)

-エルニーニョ(El Nino)

ペルー沖および東部赤道太平洋の海面水温が通常よりも高い状態

1982-83, 1997-98 など

cf.) ラニーニャ(La Nina): エルニーニョの逆

1988-89, 1996-97 など

-南方振動

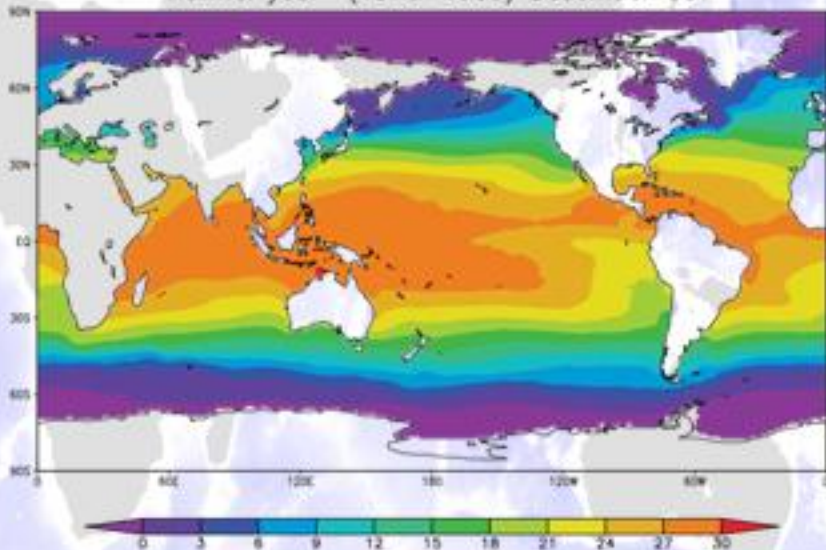
南太平洋の東西で連動した気圧変動(シーソー現象)

気候変動:エルニーニョ

エルニーニョ

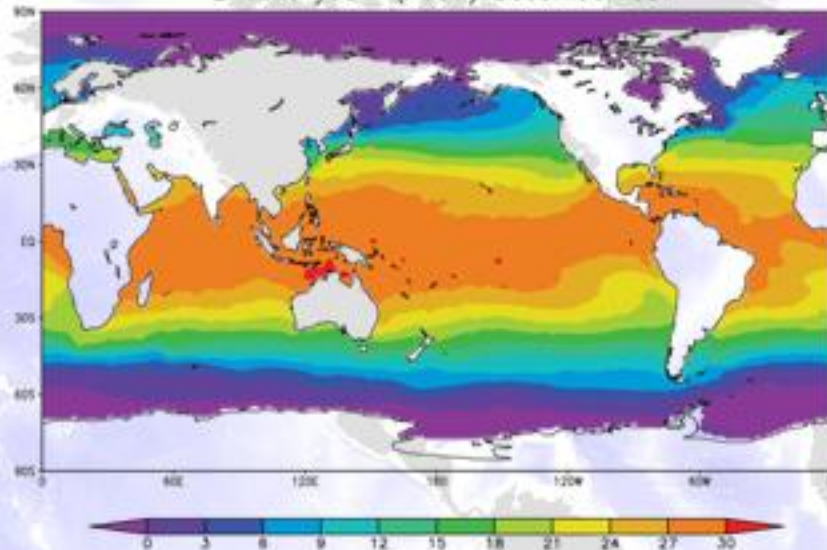
12月海面水温

"Normal year" (1970-1999) December SST

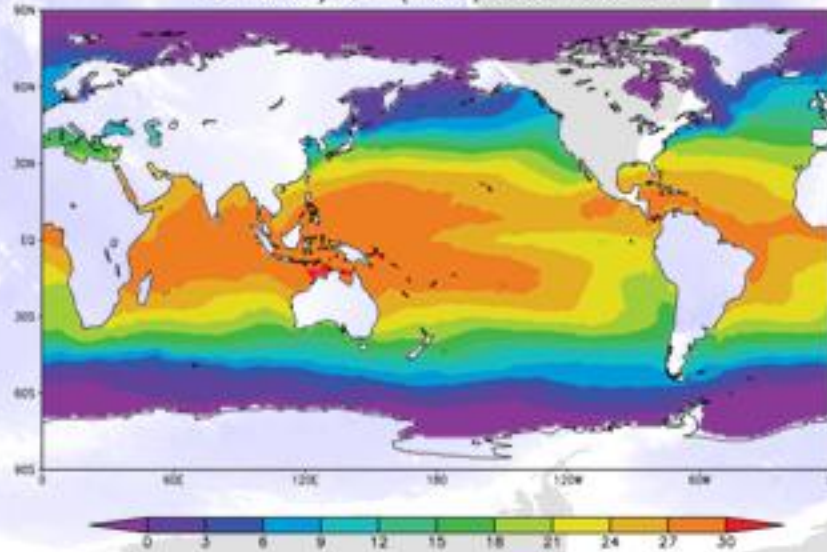


平年

"El Nino year" (1997) December SST



"La Nina year" (1988) December SST

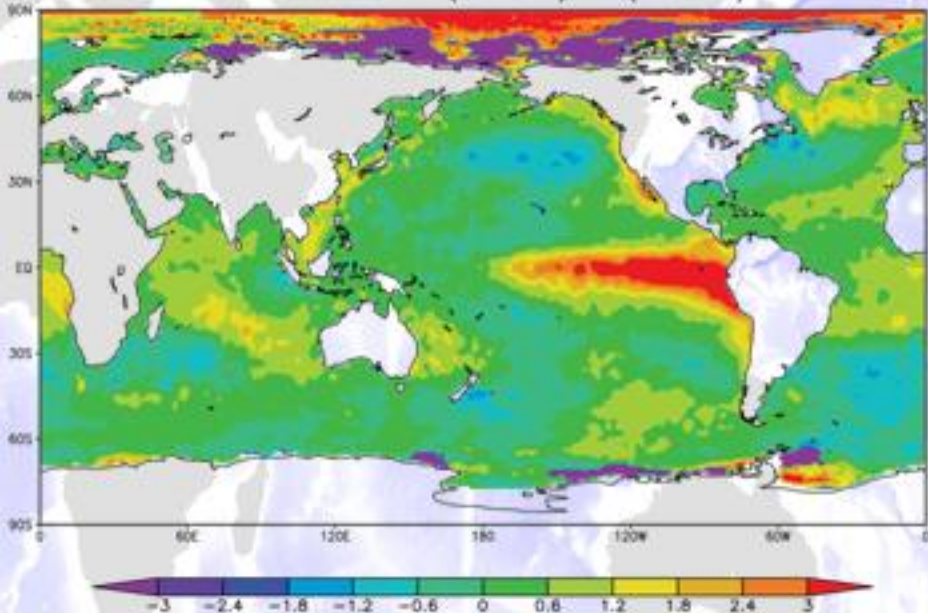


ラニーニャ

気候変動:エルニーニョ

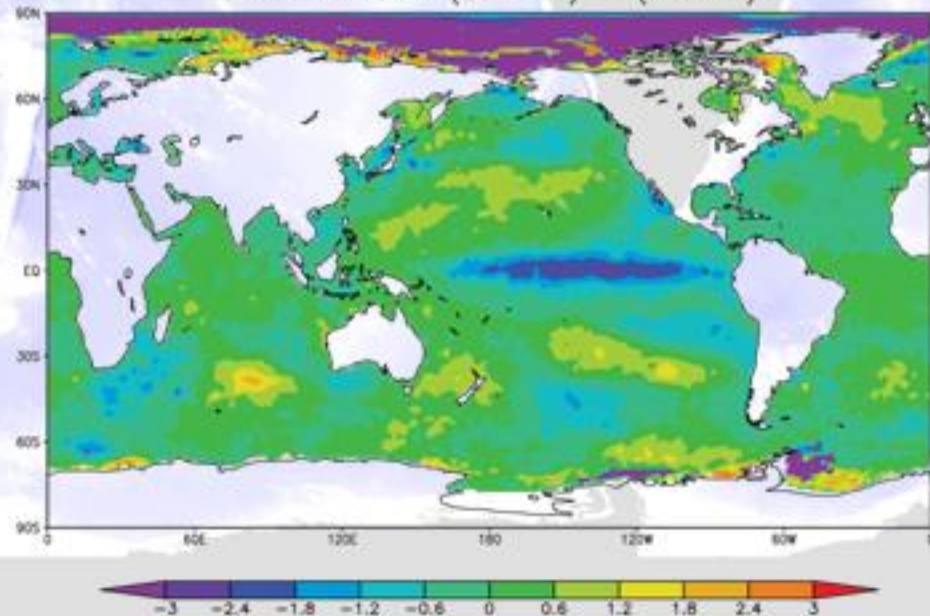
12月海面水温: 平年からの差

December SST: (El Nino) - (Normal)



ラニーニャ

December SST: (La Nina) - (Normal)

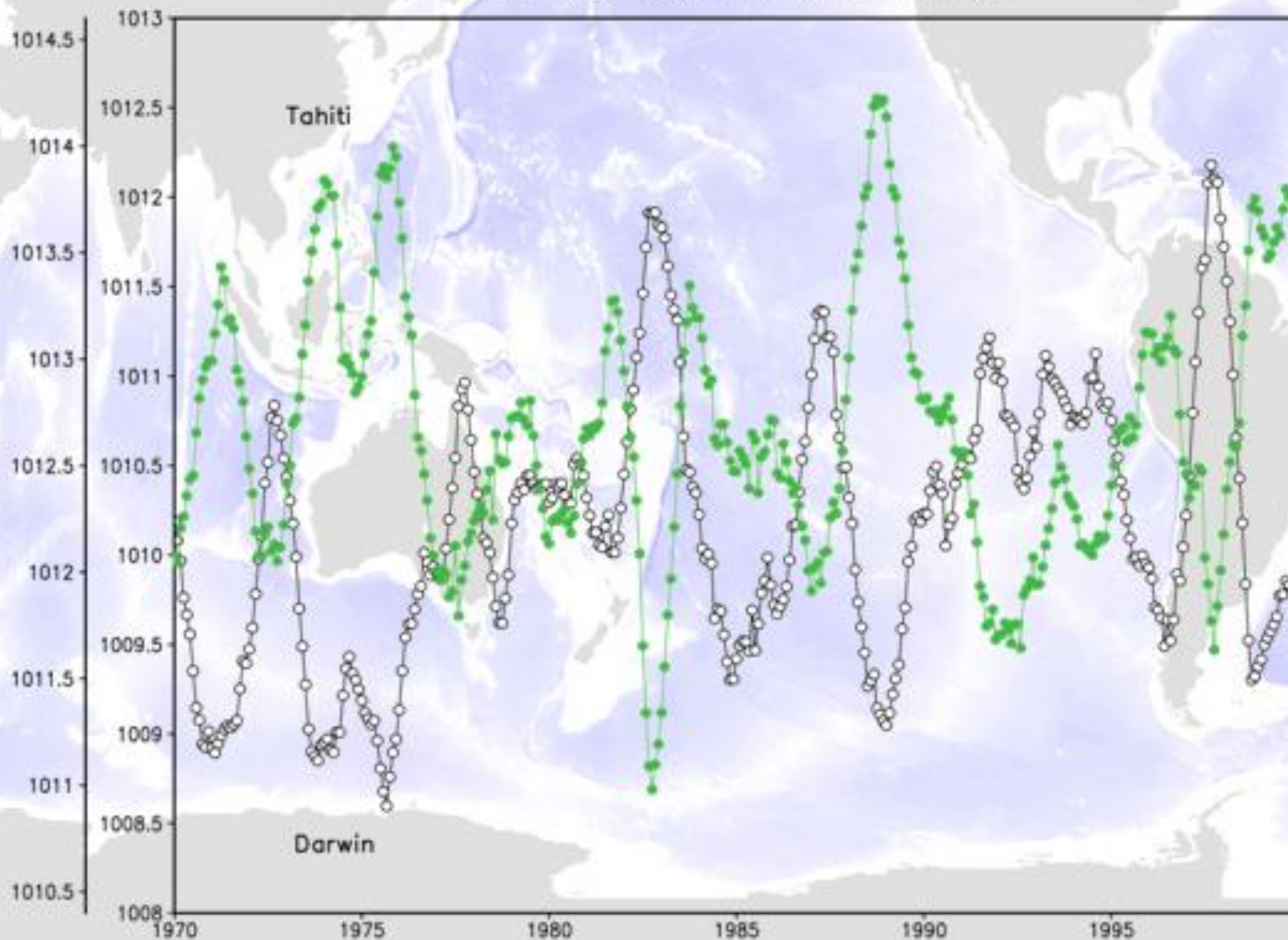


エルニーニョ

気候変動:エルニーニョ

南方振動: 南太平洋東部・西部の海面気圧変動

SLP at Darwin and Tahiti



気候変動:エルニーニョ

南方振動: Darwin の気圧変動との相関

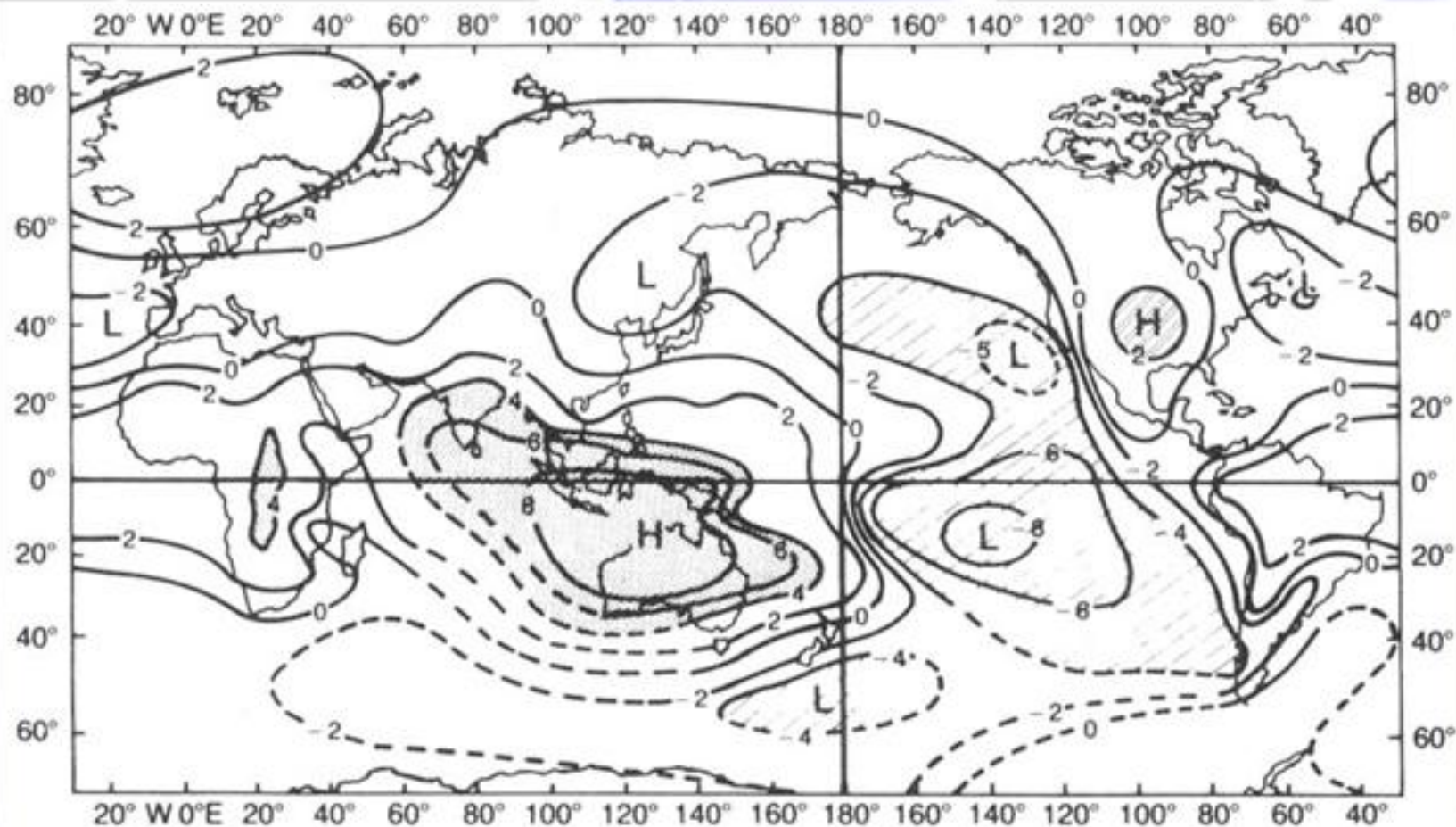
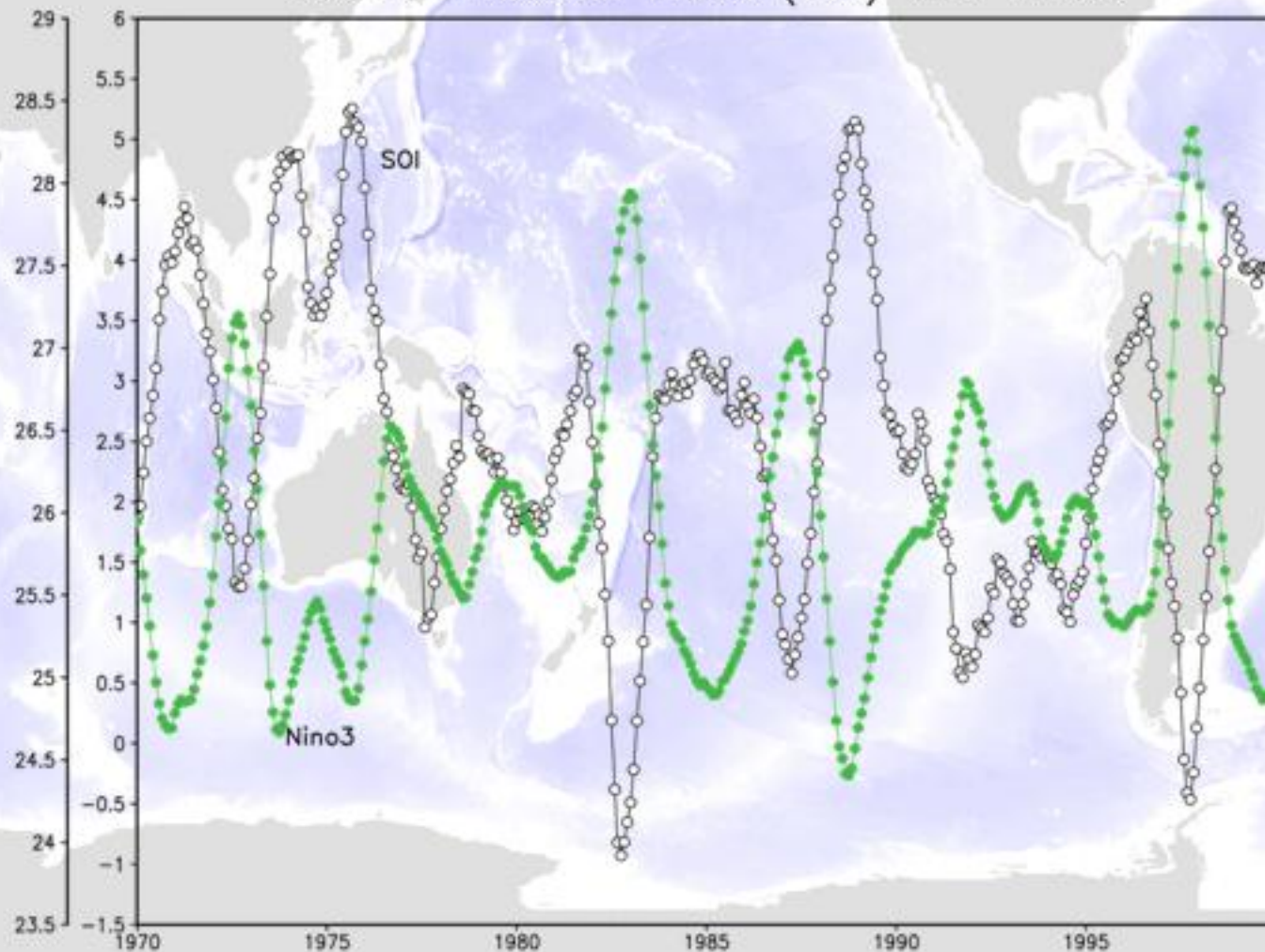


Figure 1.1. Correlations ($\times 10$) of annual mean sea level pressure with the pressure at Darwin. Correlations exceed 0.4 in the shaded regions and are less than -0.4 in the regions with dashed lines. [From Trenberth and Shea (1987).]

気候変動:エルニーニョ

エルニーニョと南方振動

Southern Ocean Index (SOI) and Nino3

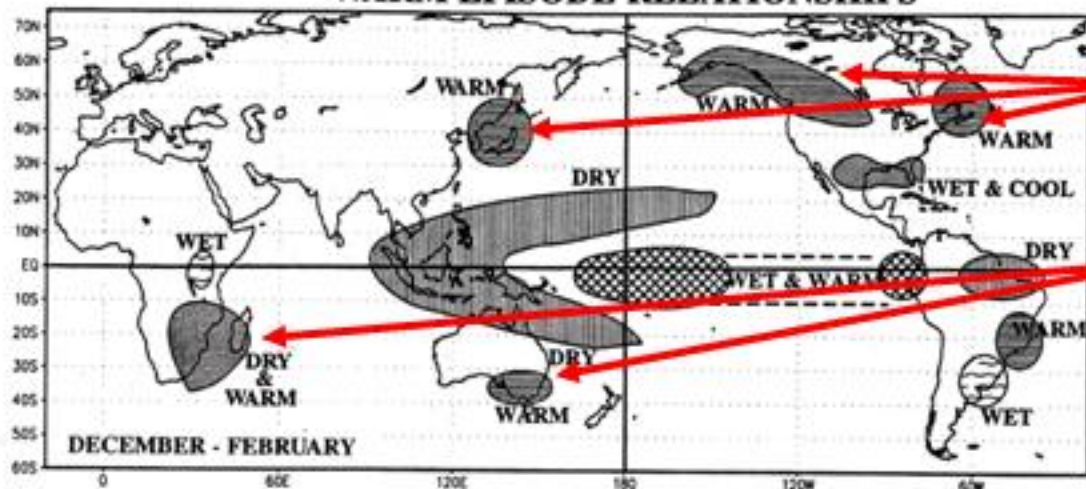


気候変動:エルニーニョ

熱帯以外の気候変動とENSO

エルニーニョ時

WARM EPISODE RELATIONSHIPS

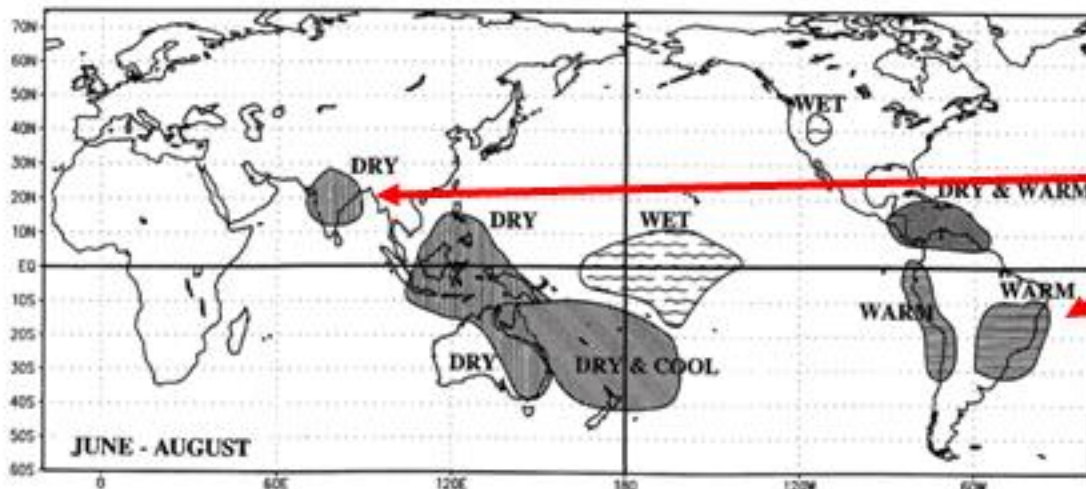


北半球冬季

-日本・アラスカ沿岸
など暖冬

-南アフリカなど酷暑

- ...



北半球夏季

-インド旱魃

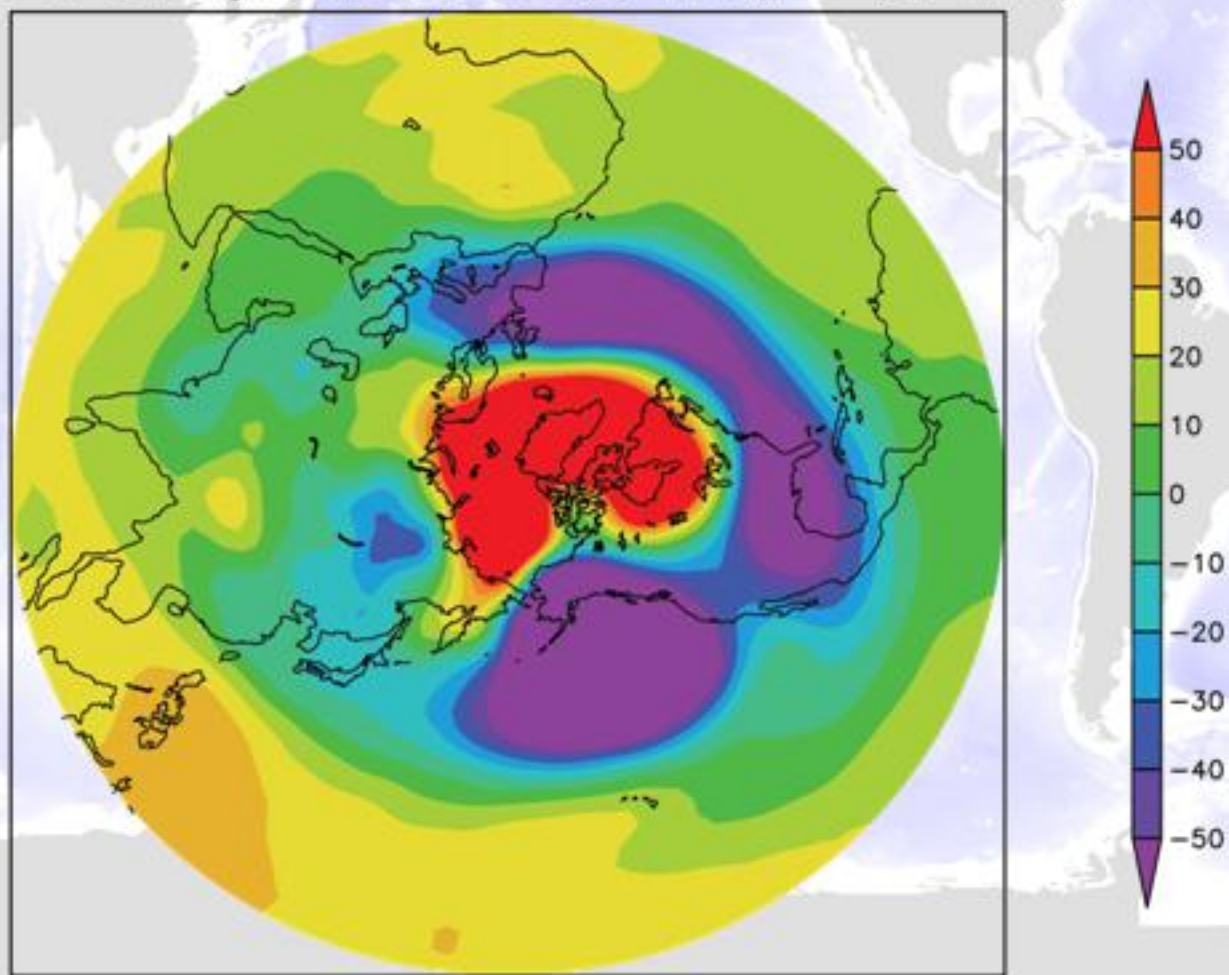
-南アメリカ暖冬

- ...

気候変動:エルニーニョ

エルニーニョ/ラニーニャ間の気圧偏差

700 hPa height difference: (El Nino) - (La Nina)



気候変動:エルニーニョ

エルニーニョ時に出やすい気圧偏差 (理論)



気候変動:地球温暖化

温室効果

- 地球(気候)の放射収支
太陽光(短波放射)の吸収 = 地球からの熱放射

放射の吸収体が地表面のみの場合:

$$(1-\alpha)I/4 = \sigma T_s^4$$

(α : 惑星アルベド, I : 入射太陽光強度, σ : ステファアン-ボルツマン定数, T_s : 平均地表面温度)

$\alpha = 0.3$, $I = 1350 \text{ W/m}^2$, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
として $T_s = 254 \text{ K} = -19 \text{ }^\circ\text{C}$

気候変動:地球温暖化

温室効果

“大気中”に地球からの熱放射を完全に吸収する吸収層が一枚ある場合:

$$(1-\alpha)I/4 + \sigma T_a^4 = \sigma T_s^4$$

$$\sigma T_s^4 = 2\sigma T_a^4$$

(T_a : 吸収層の平均温度)

$$T_a = 254 \text{ K} = -19 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_s = 2^{1/4}T_a = 302 \text{ K} = 29 \text{ }^\circ\text{C}$$

気候変動:地球温暖化

温室効果

“大気中”に地球からの熱放射を完全に吸収する吸収層が二枚ある場合:

$$(1-\alpha)I/4 + \sigma T_{a1}^4 = \sigma T_s^4$$

$$\sigma T_s^4 + \sigma T_{a2}^4 = 2\sigma T_{a1}^4$$

$$\sigma T_{a1}^4 = 2\sigma T_{a2}^4$$

(T_{a1} : 下層吸収層の平均温度, T_{a2} : 上層吸収層の平均温度)

$$T_{a2} = 254 \text{ K} = -19 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{a1} = 2^{1/4} T_{a2} = 302 \text{ K} = 29 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_s = 3^{1/4} T_{a2} = 334 \text{ K} = 61 \text{ }^\circ\text{C}$$

気候変動:地球温暖化

20世紀再現実験・温暖化予測実験

-20世紀再現実験

自然強制力: 太陽放射変動, 火山噴火

人為起源強制力: 温室効果気体(二酸化炭素など)排出, エアロゾル排出

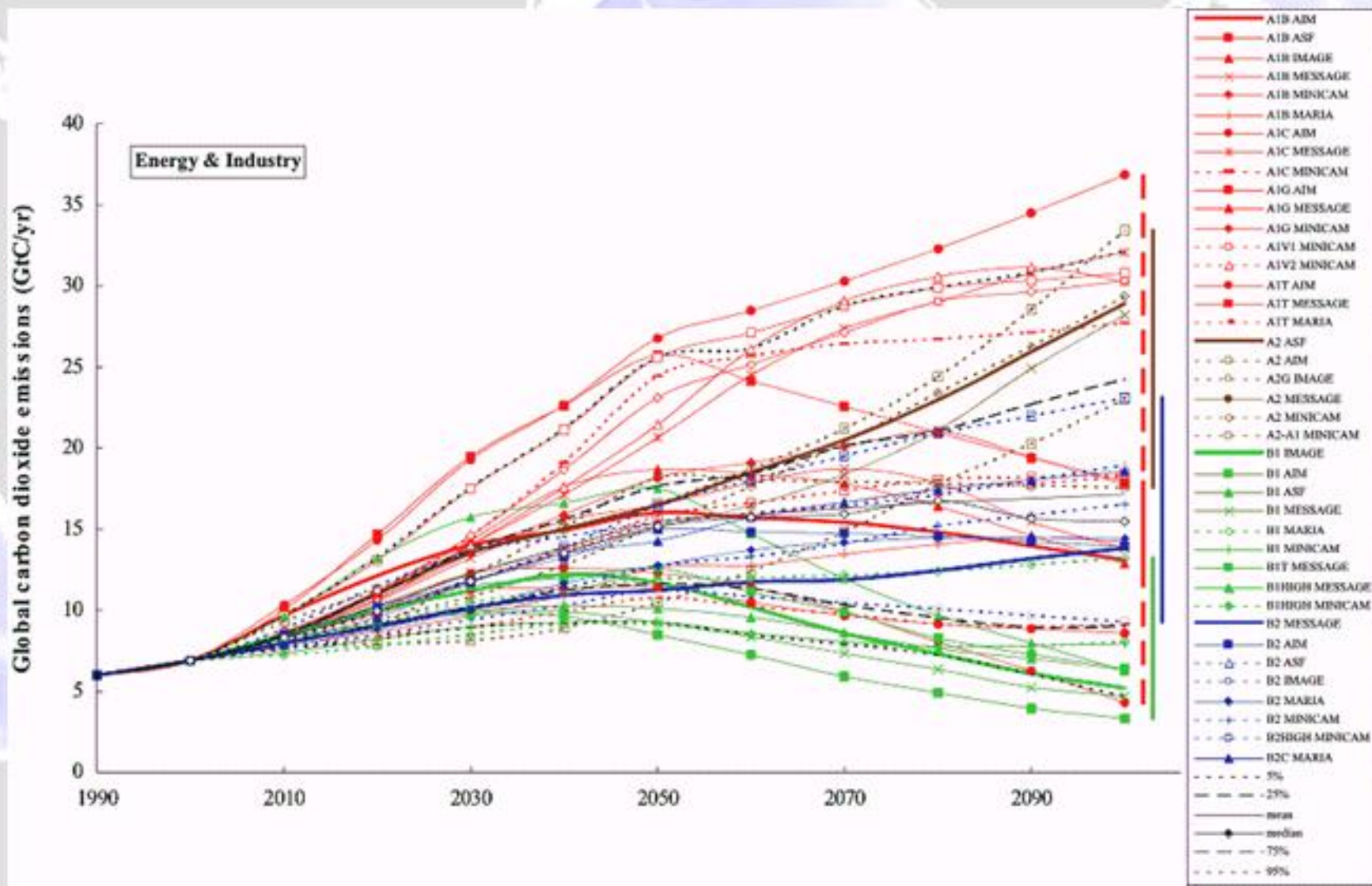
...産業革命以前の状態を初期値とし、観測等に基づくこれらの強制力を与えて過去の気候変動を再現

-温暖化予測実験

20世紀再現実験に続けて、将来の人間活動に関する“シナリオ”に基づく人為起源強制力を与えて将来の気候変動を予測

気候変動:地球温暖化

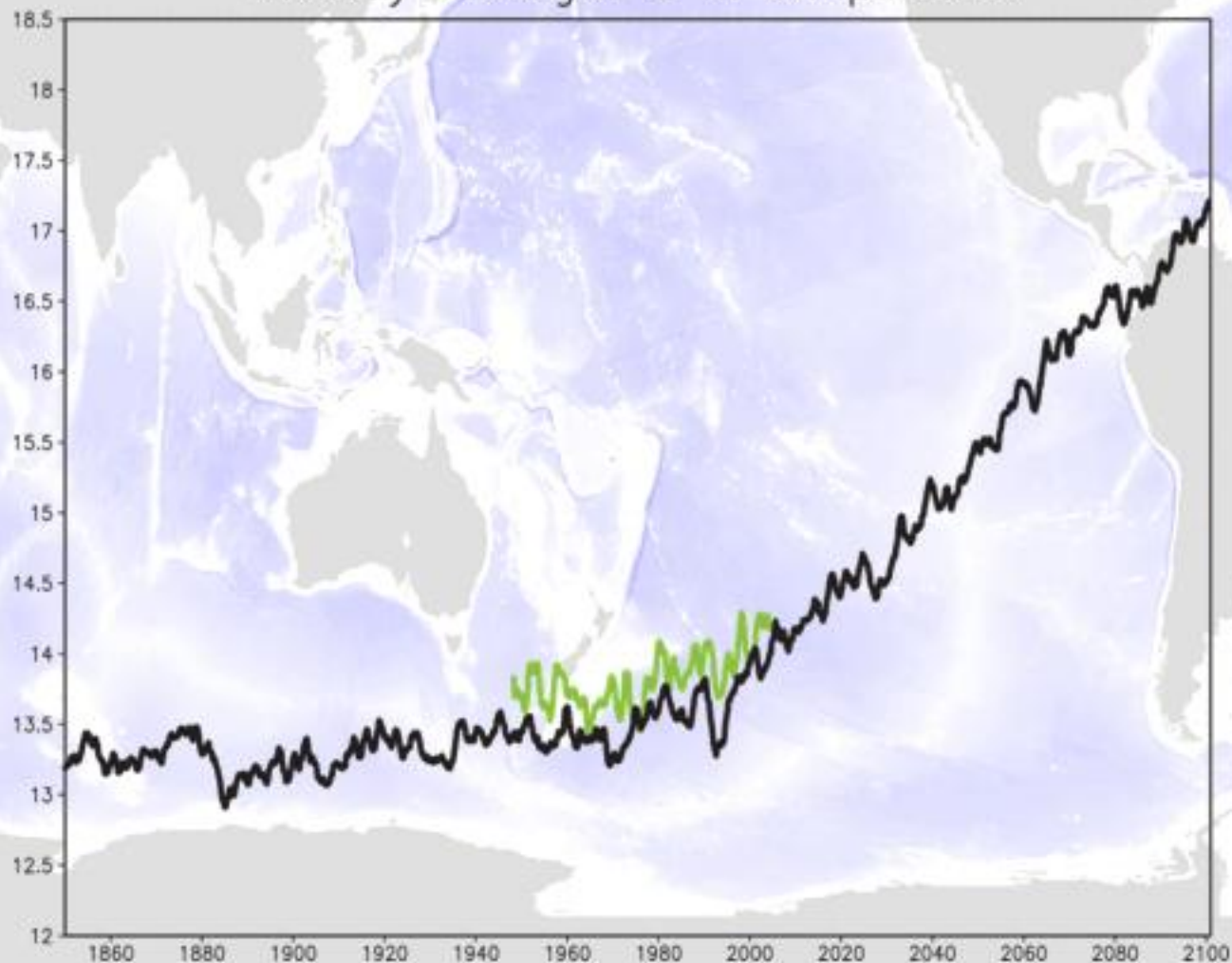
二酸化炭素排出シナリオ



気候変動:地球温暖化

全球平均気温変動: 観測データとモデル

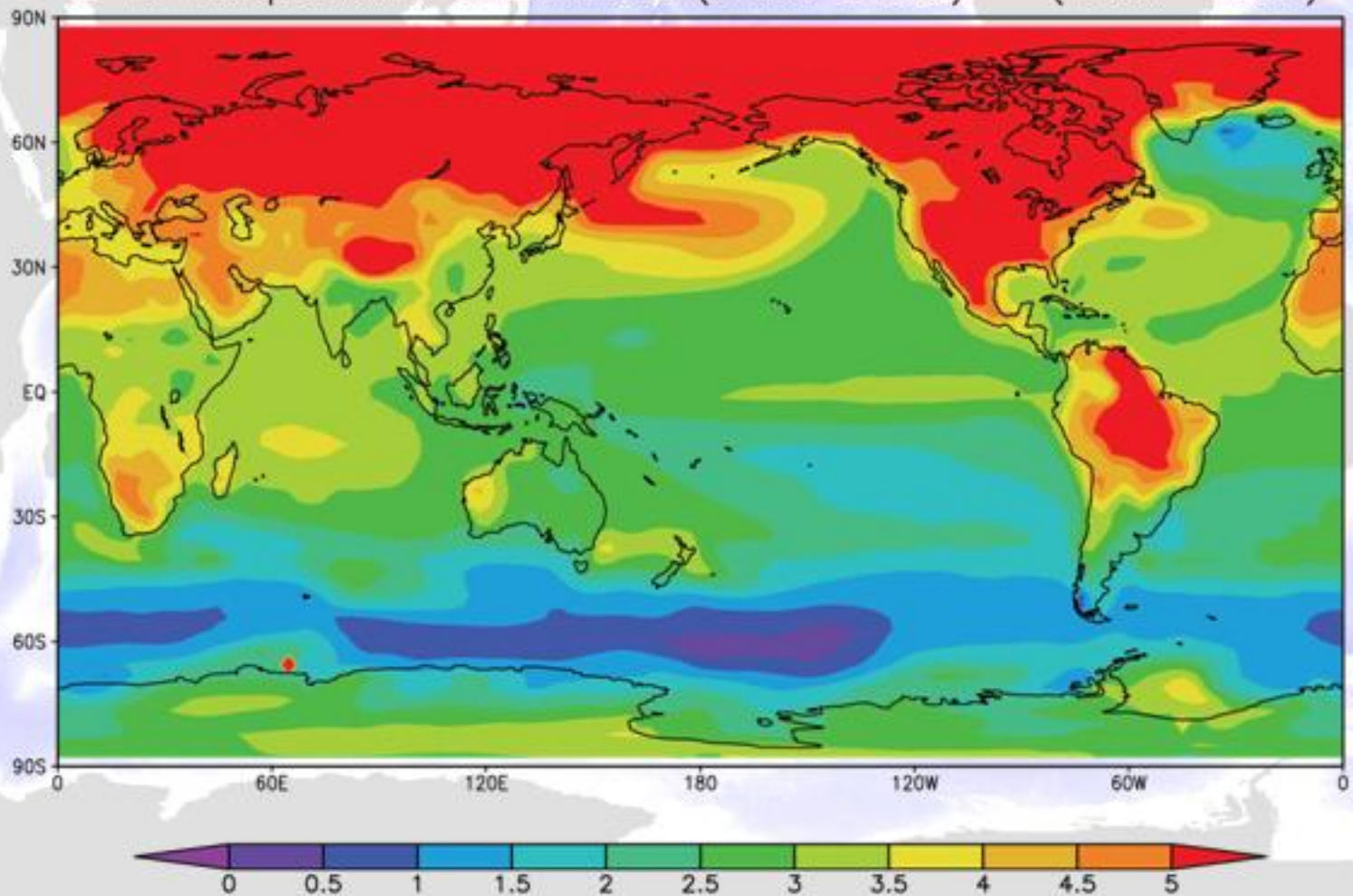
Globally averaged 2 m temperature



気候変動:地球温暖化

100年間の地上気温変化

2 m temperature difference: (2090-2099) - (1990-1999)



気候変動:地球温暖化

水位上昇

- 大陸氷床・山岳氷河の融解
- 海水の熱膨張

