

6. 地球温暖化など

海洋に見られる長期変動

様々な長期変動（IPCC AR4 の記述中心に）

ENSOの変調

十年規模変動

温暖化

古気候

モデリング

エルニーニョ予報

温暖化予測

補足

ENSO理論 ほか



全球平均(平年差)の 経年変化(1850~2005年)

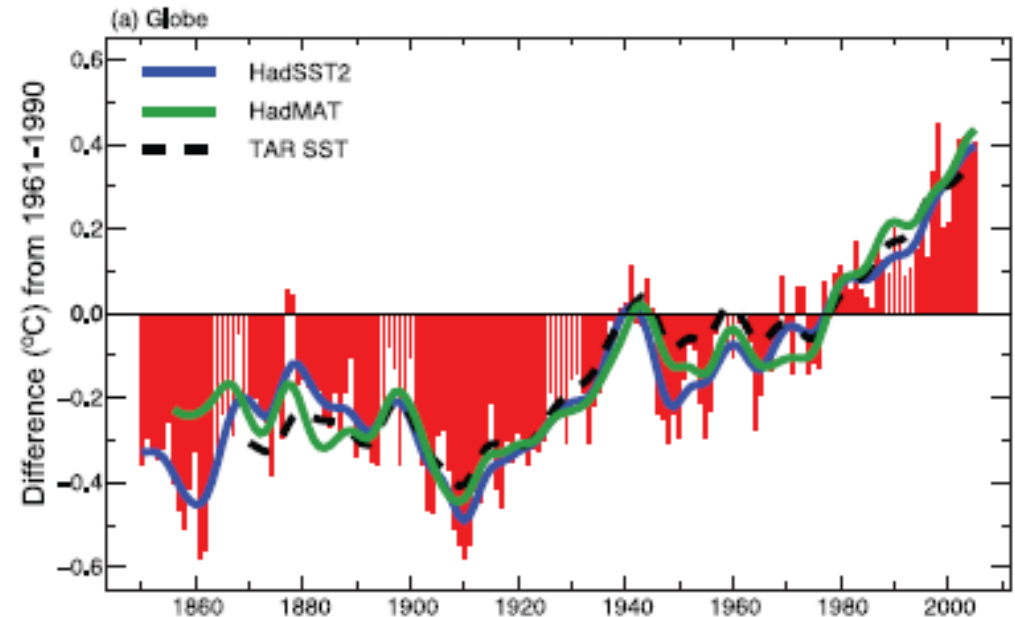
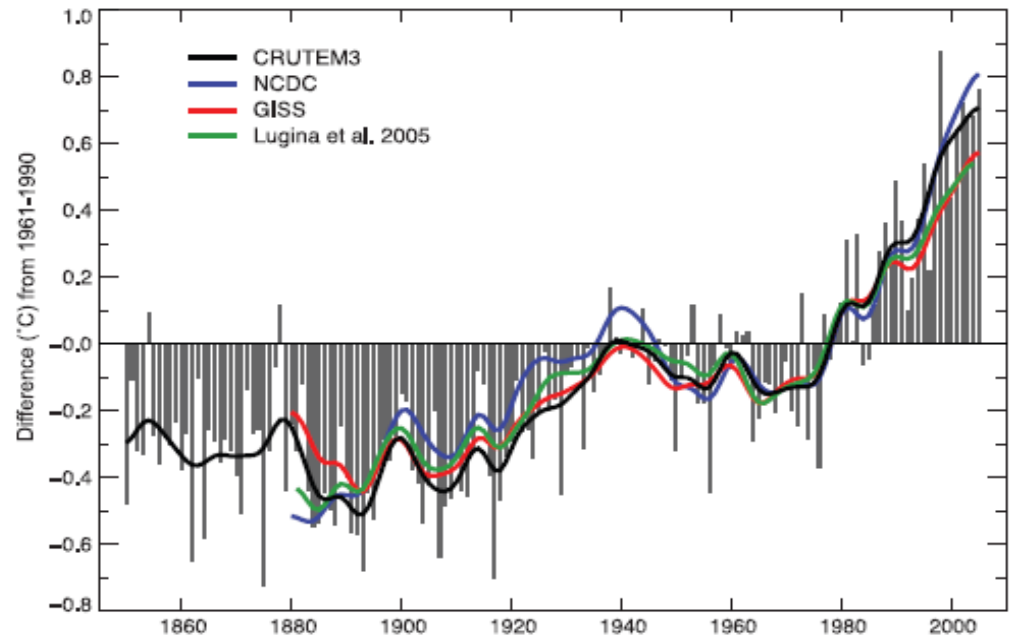
(上)陸上気温、(下)海面水温

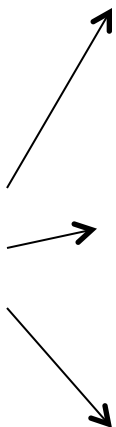
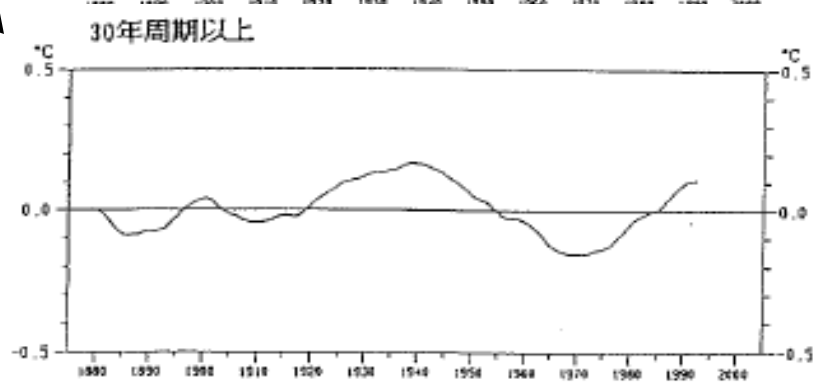
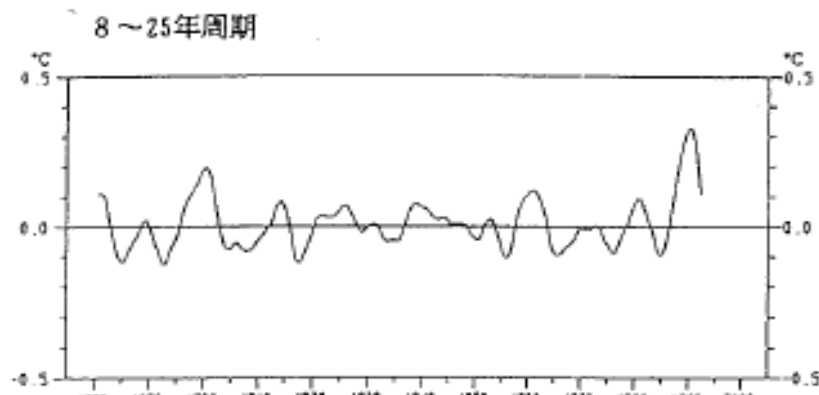
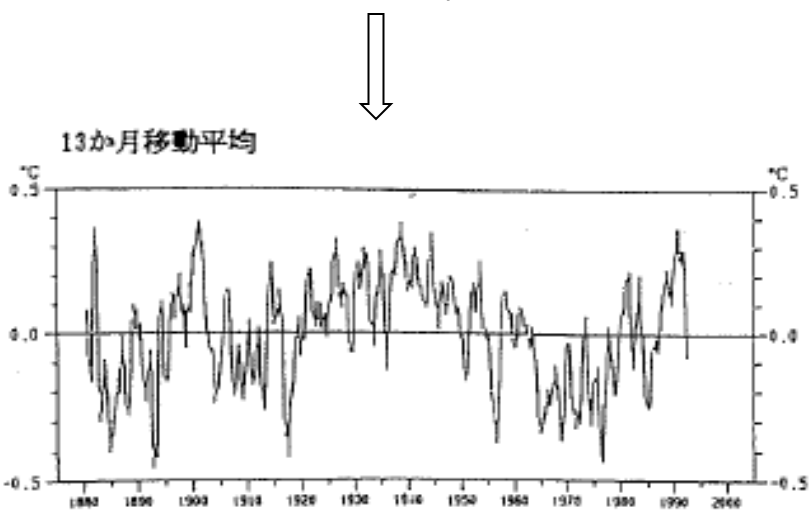
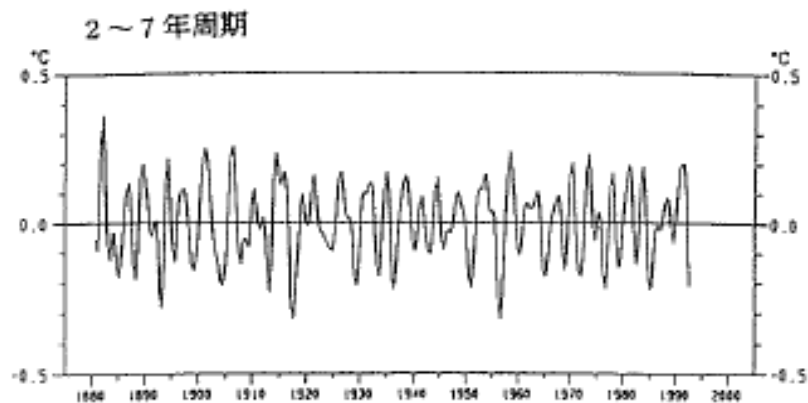
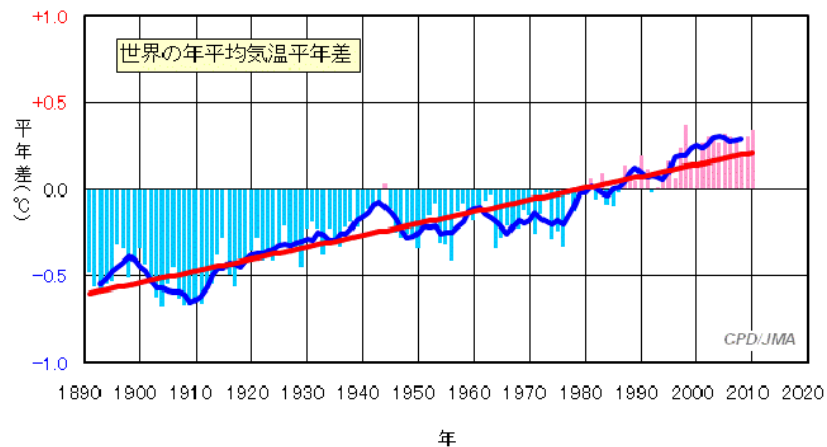
温暖化の検出 detection

→ 自然変動の分離

上昇率 (°C/10年)

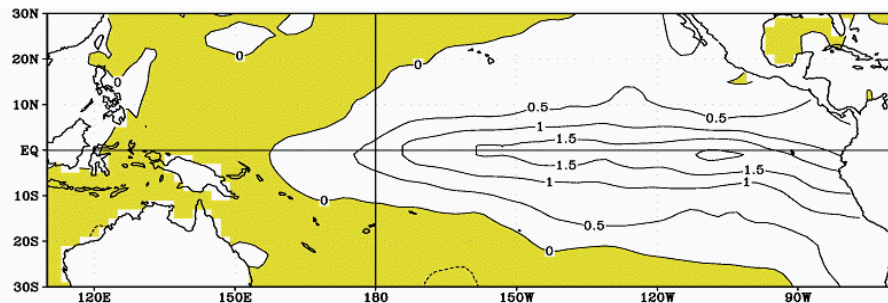
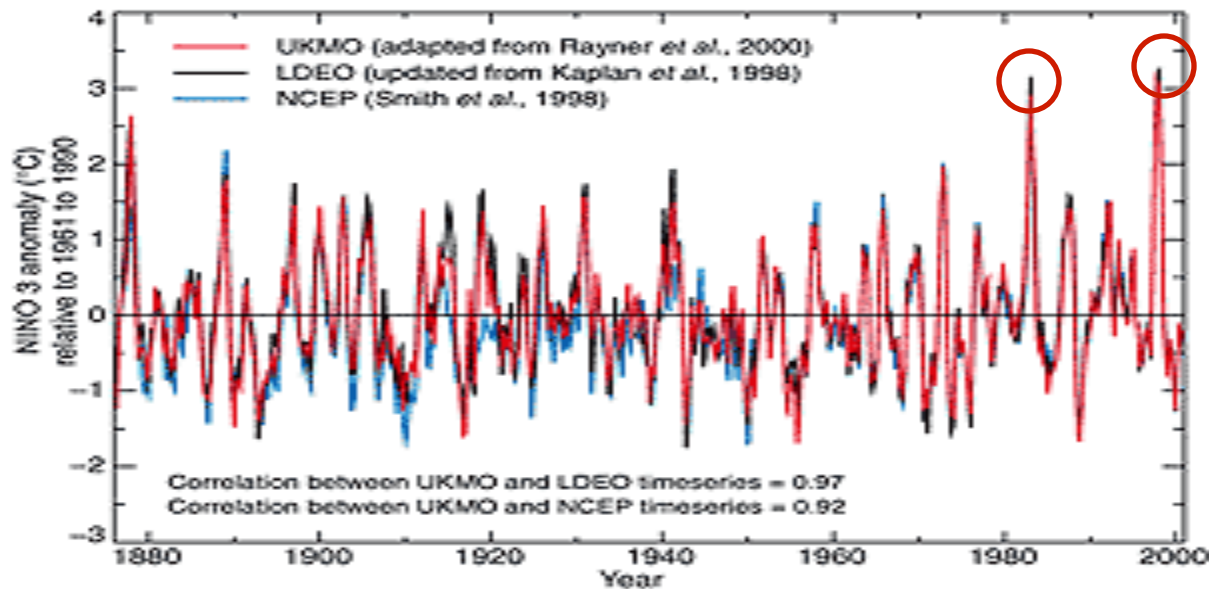
| | 1850- 2005 | 1901- 2005 | 1979- 2005 |
|--------|---------------|---------------|---------------|
| CRU | 0.054 | 0.084 | 0.268 |
| HadSST | 0.038 | 0.067 | 0.133 |



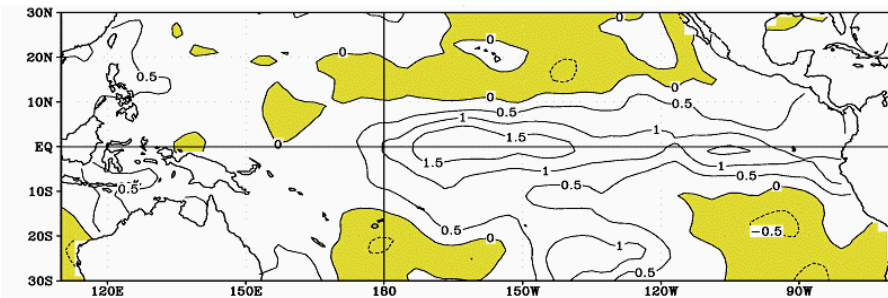


NINO3のSST偏差

ENSO の
変調 Modulation
→ 気候シフト



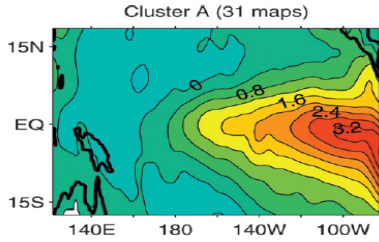
10~12月の3か月平均のSST偏差の比較
(上)1976年以降のエルニーニョ現象発生年
(1976、82、86、87、91、97年)の平均で
作成した合成図。



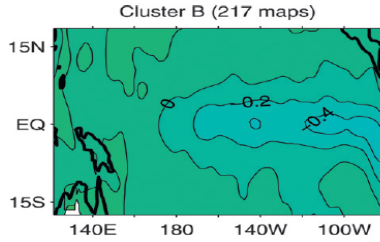
(下)2002年

Eastern Pacific and Central Pacific ENSO (Kao and Yu, 2009)

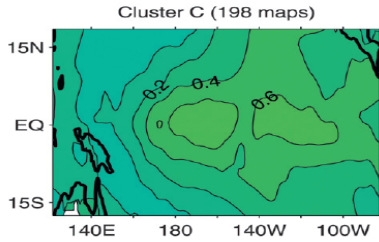
Warm EP



Cold EP

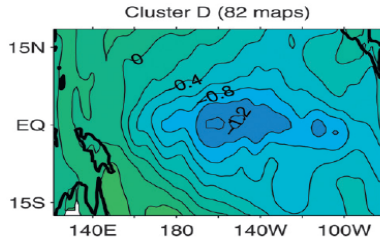


Warm CP

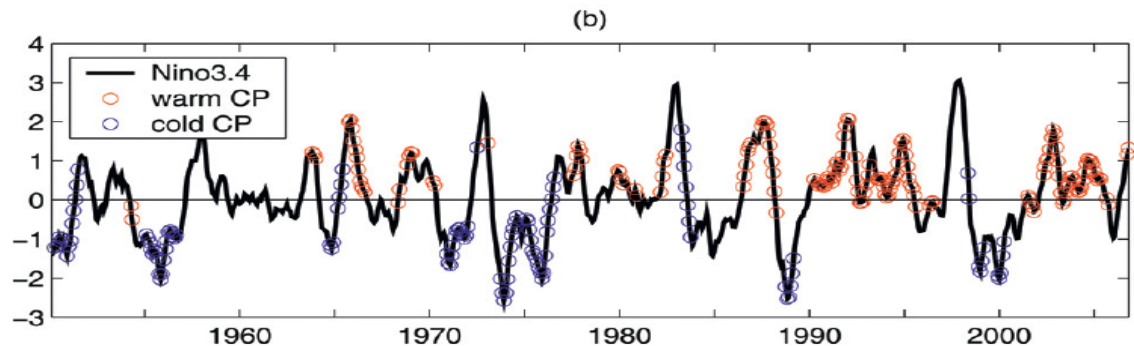
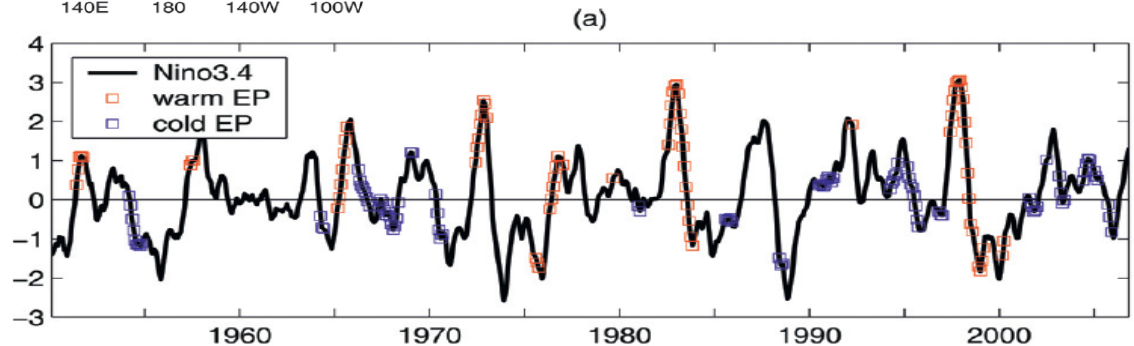
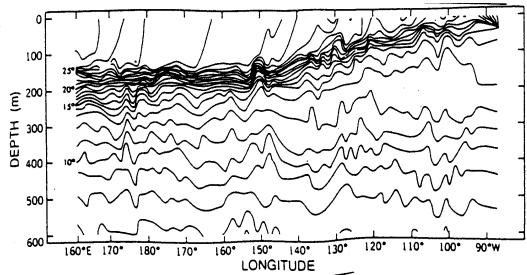


Cf
 ‘エルニーニョ’もどき
 Dateline El Nino

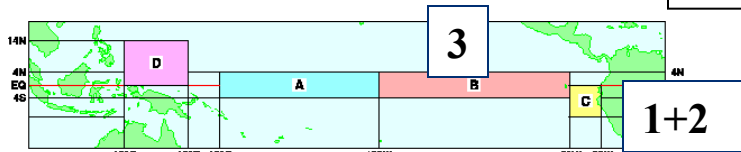
Cold CP



相互作用の窓

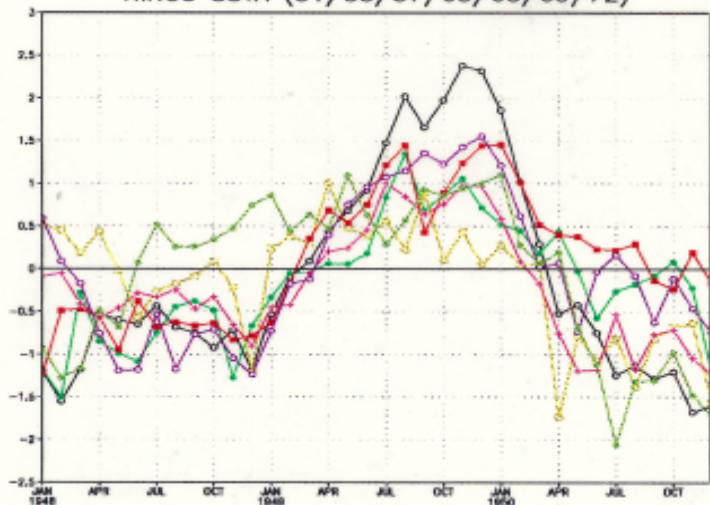


エルニーニョとその前後、3年のSST偏差の推移の比較

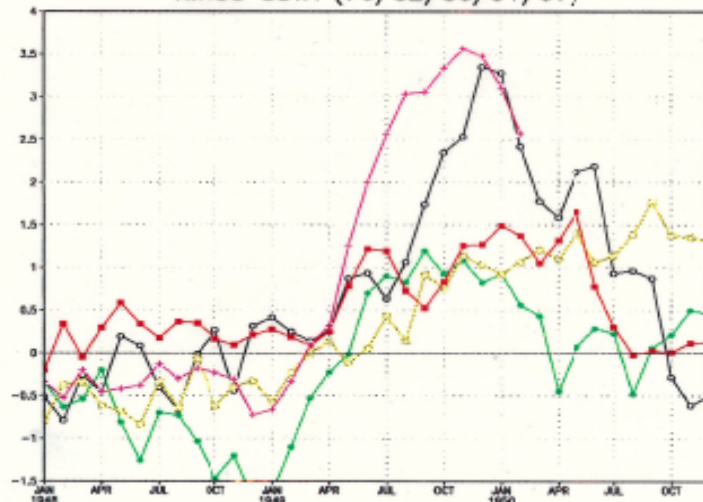


76以前 2→3、季節性も明瞭

NINO3 SSTA (51/53/57/63/65/69/72)

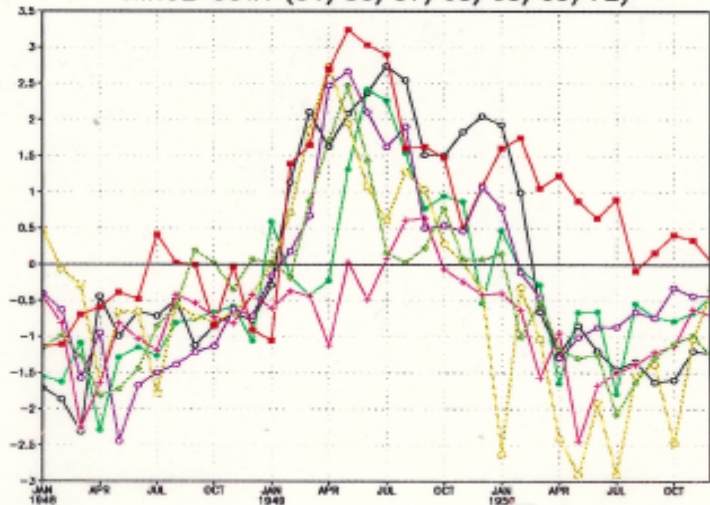


NINO3 SSTA (76/82/86/91/97)

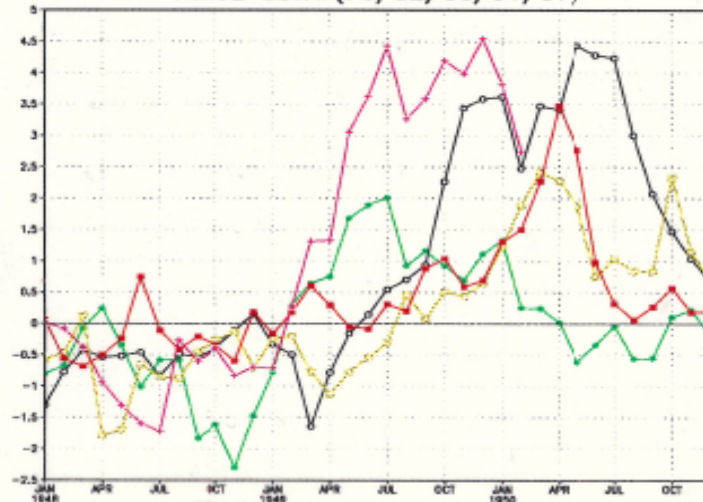


GHRS: COLA/NOES

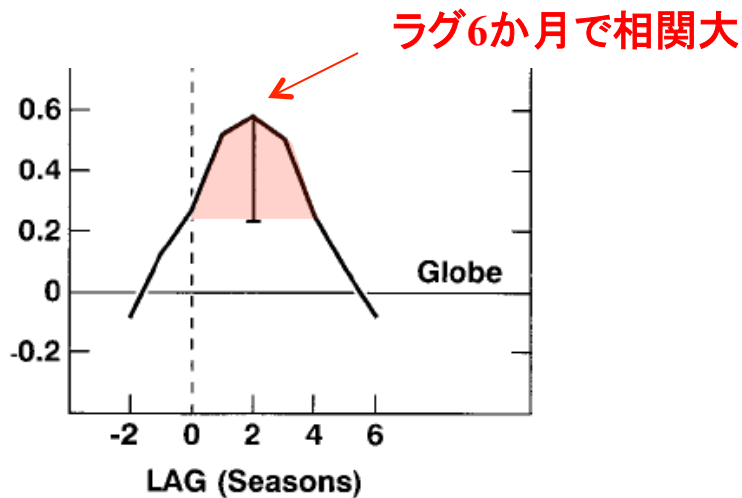
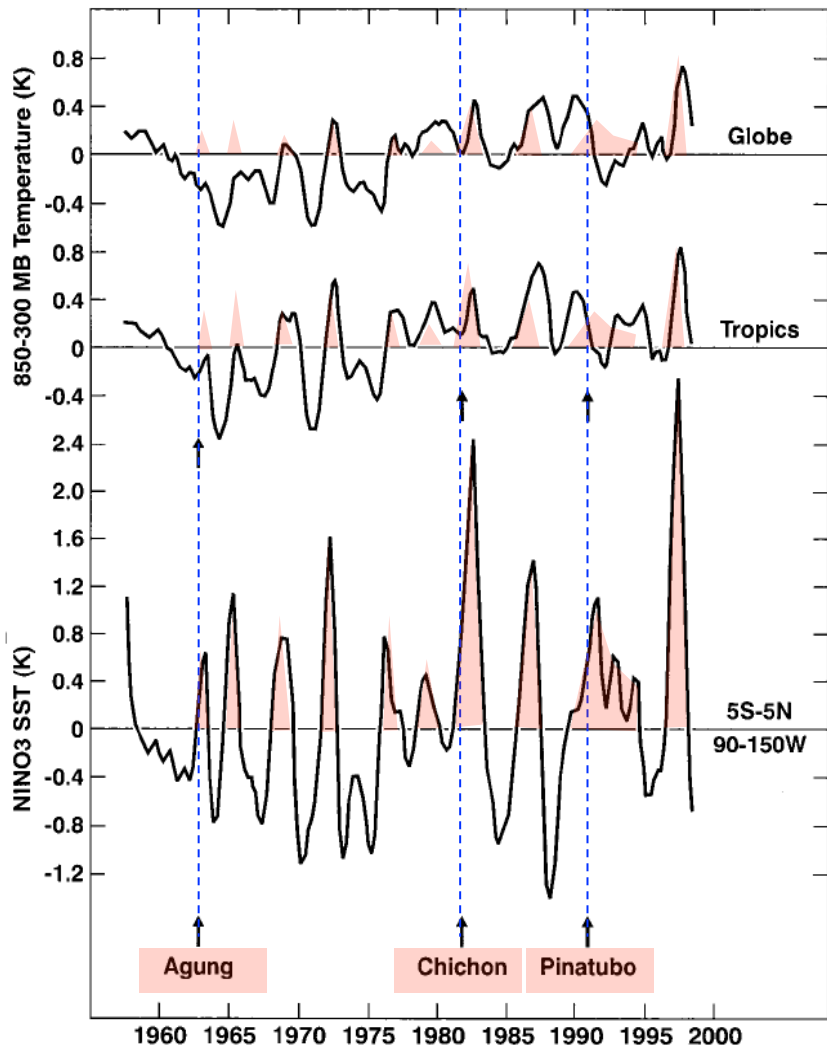
NINO2 SSTA (51/53/57/63/65/69/72)



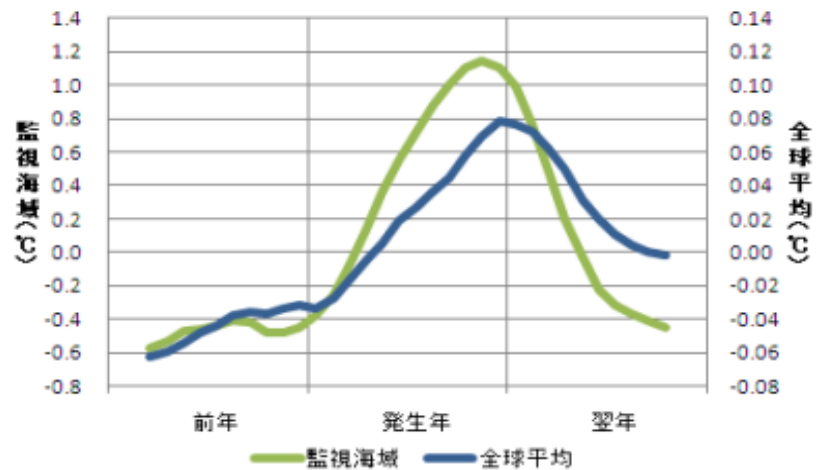
NINO2 SSTA (76/82/86/91/97)



エルニーニョと対流圏大気温度 Angell(2000)



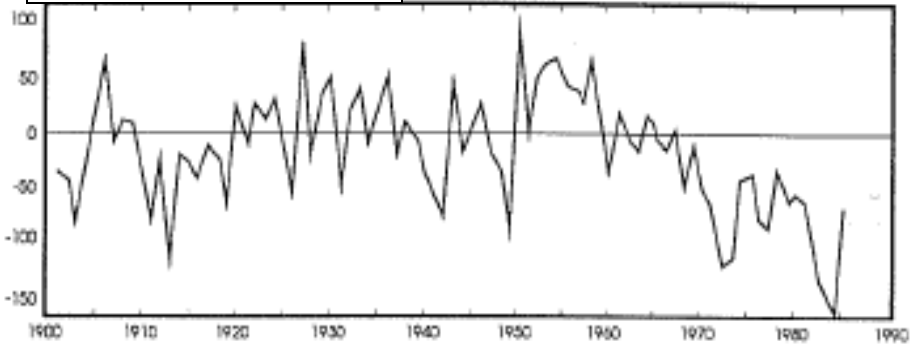
ラグ6か月で相関大



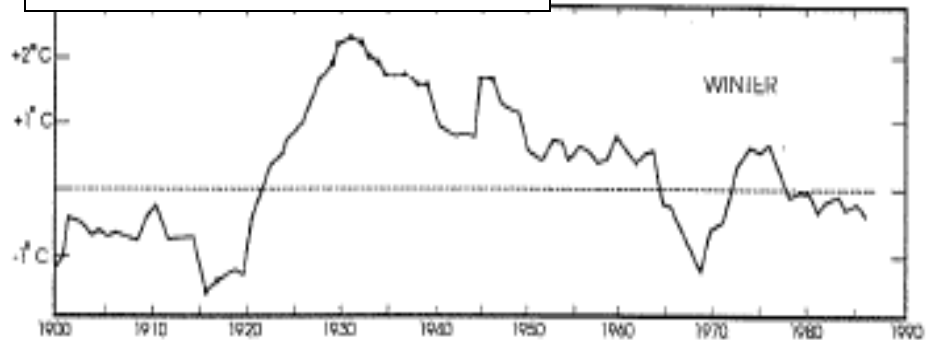
エルニーニョとその前後の3年のコンポジット (気象庁)

十年規模の長期変動

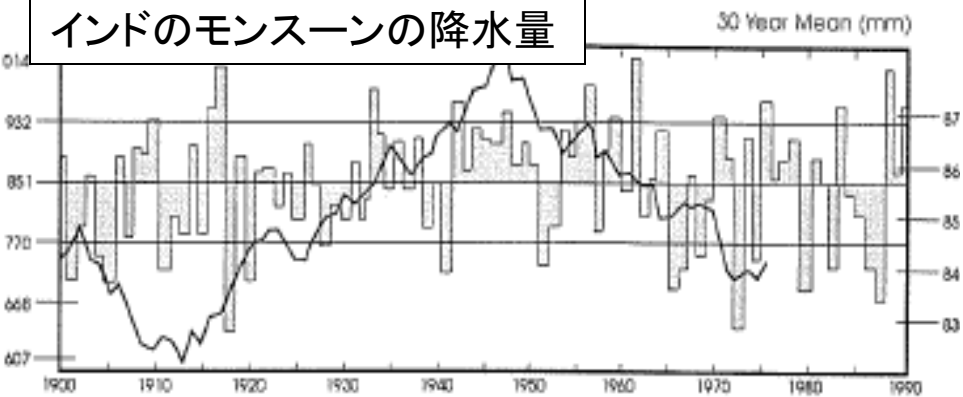
サハラの降水量



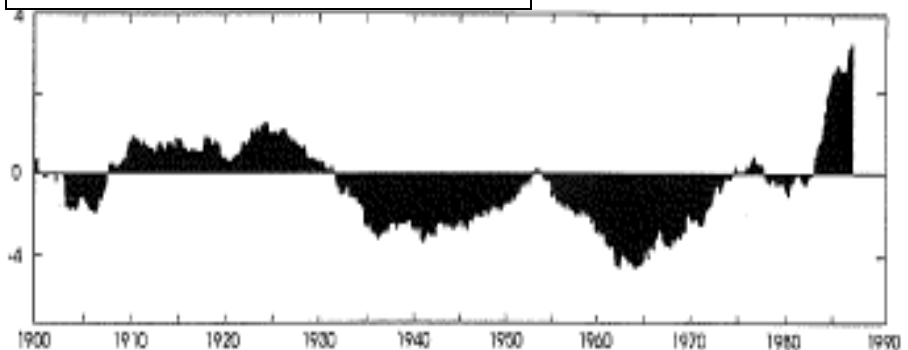
大西洋北極圏の海水温



インドのモンスーンの降水量



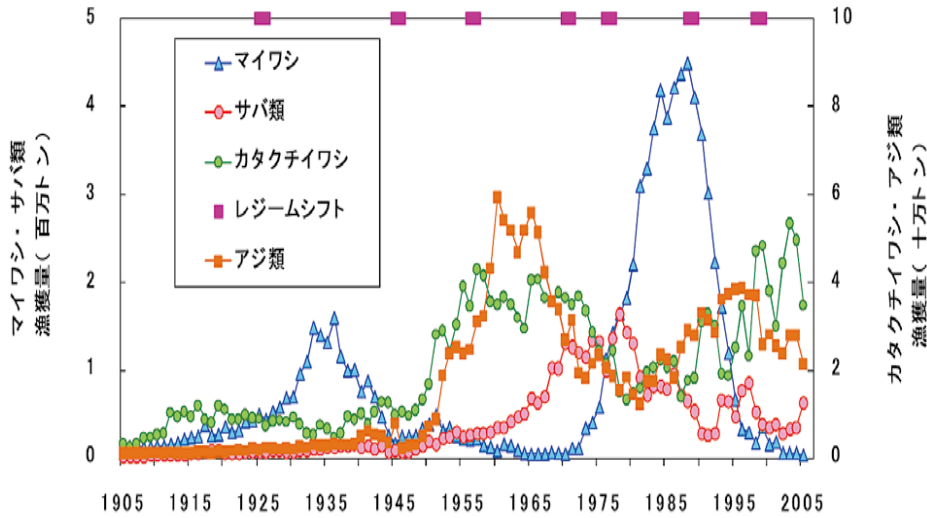
Great Salt Lake の水位



「レジームシフト」(気候ジャンプ)



気候・水産・生態系
川崎 健 博士(1983)

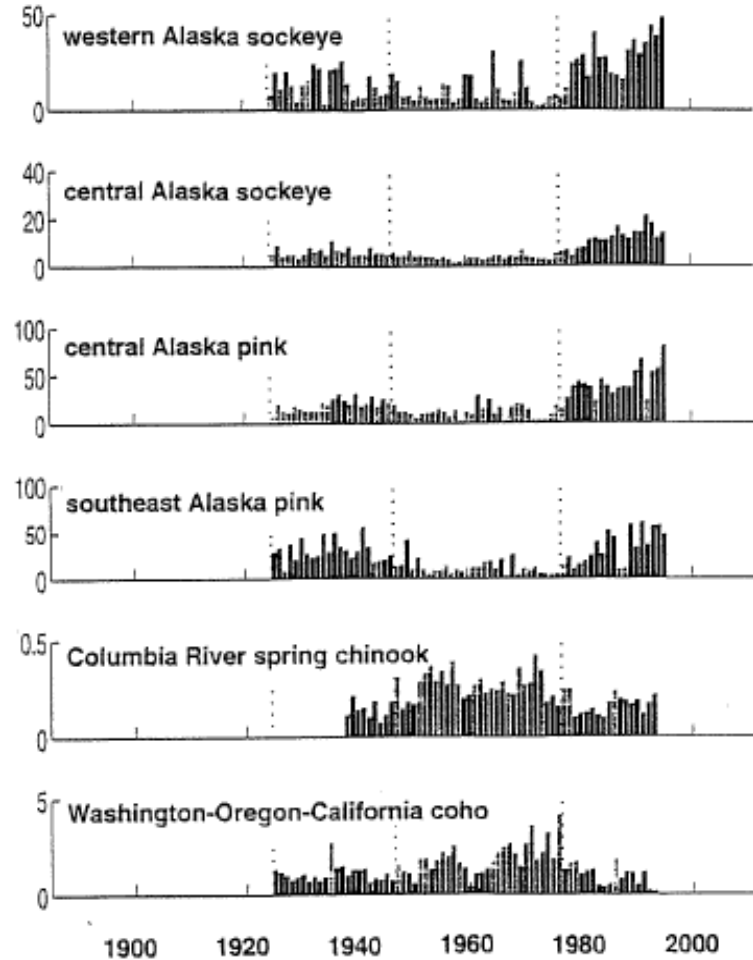


過去100年における主な浮魚類の日本の漁獲量変遷(魚種交替)
(2009、谷津)



北
↑
annual catch in millions

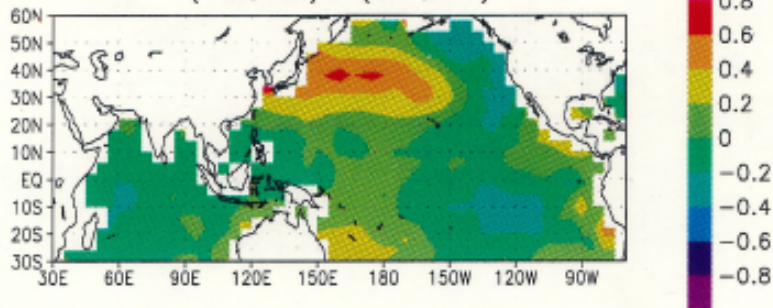
北米太平洋沿岸の鮭の漁獲量の推移



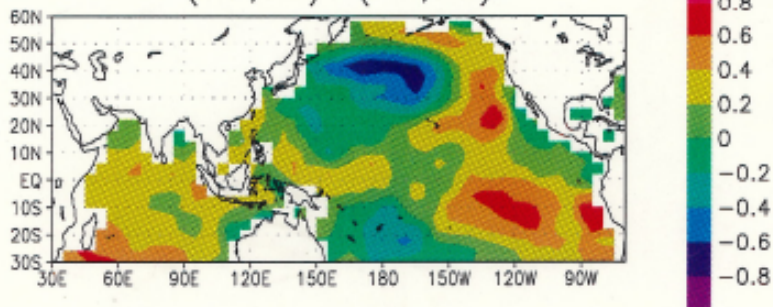
北太平洋

海面水温

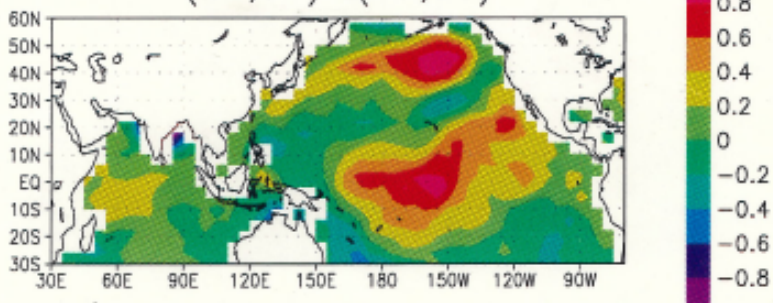
(48,76) - (25,47)



(77,90) - (48,76)



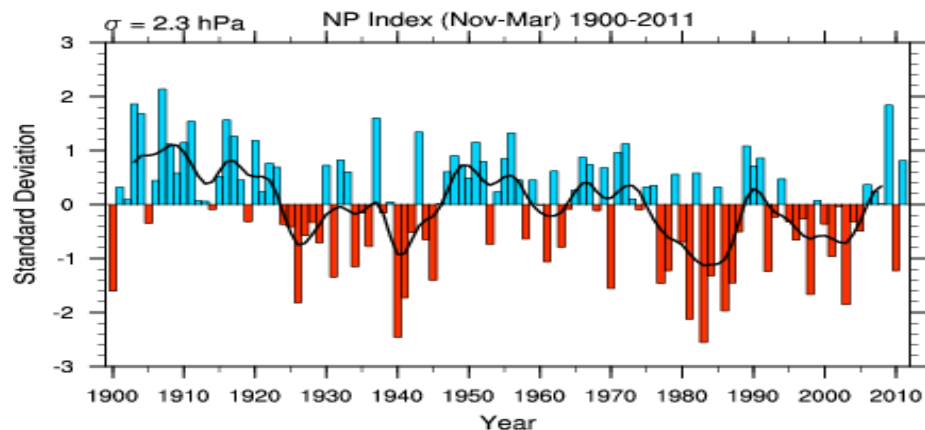
(91,94) - (77,90)



・アリューシャン低気圧の強弱

NPI: North Pacific Index

30°N ~ 65°N、160°E ~ 140°Wの海面気圧(規格化)
(Trenberth and Hurrell, 1994)

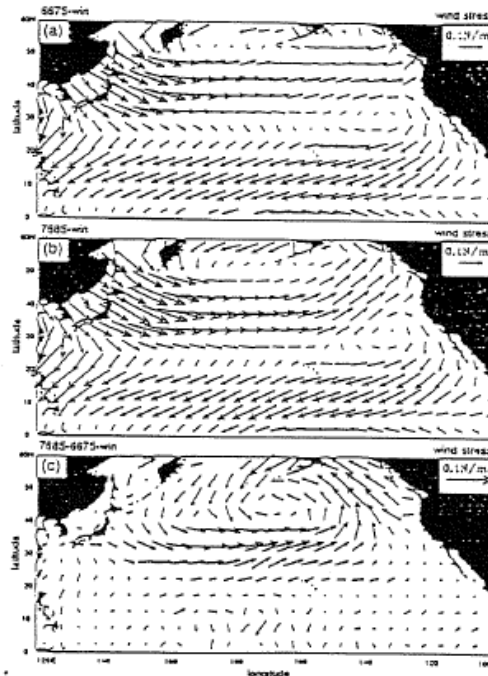


DJF 風応力

1966-75平均

1976-85平均

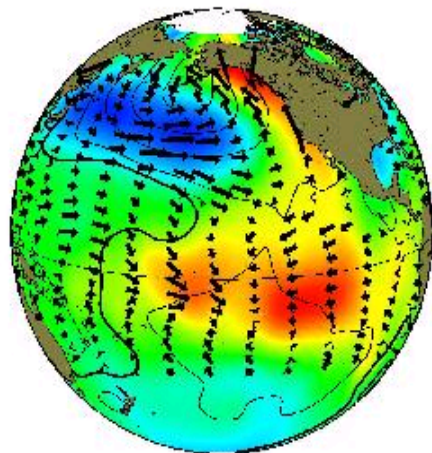
(76-85) - (66-75)



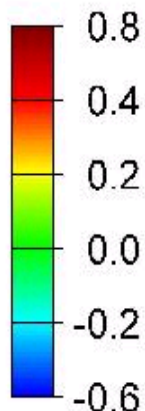
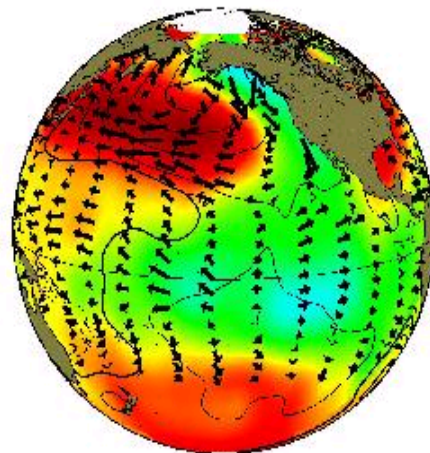
PDO: 太平洋十年変動 (Pacific Decadal Oscillation)

北太平洋の20°N以北における海面水温偏差の経験的直交関数(EOF) 第一モード

Cold phase

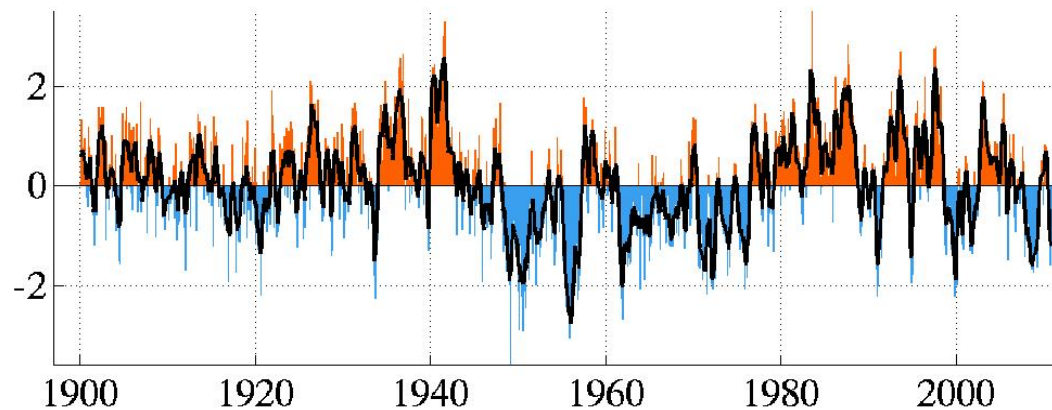


Warm phase



正(左)、負(右)のPDOの冬季における海面水温(色)、海面気圧(等値線)、海面の風応力(矢印)の典型的な偏差パターン

monthly values for the PDO index: 1900-2010

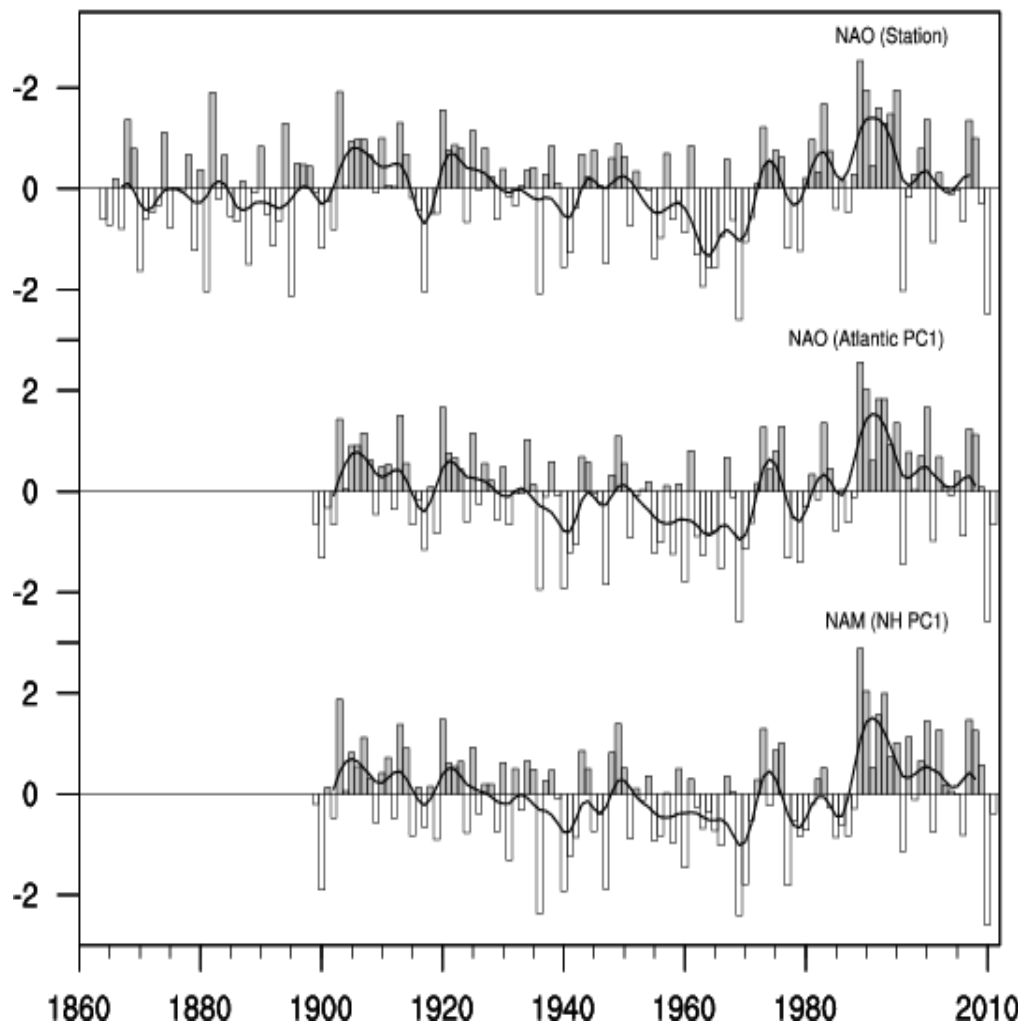


北大西洋

NAO: 北大西洋振動 (North Atlantic Oscillation)

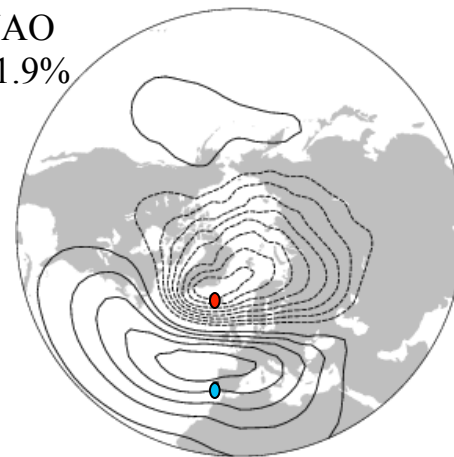
NAM: 北半球環状モード (Northern Annular Mode) / AO: 北極振動 (Arctic Oscillation)

海上気圧 (SLP) に基づく指数 (DJFM)

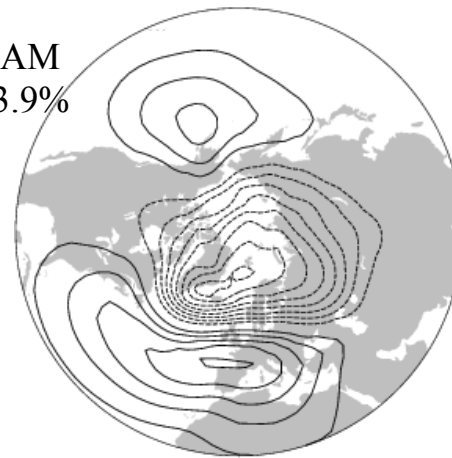


- レイキャビク
- リスボン

NAO
41.9%



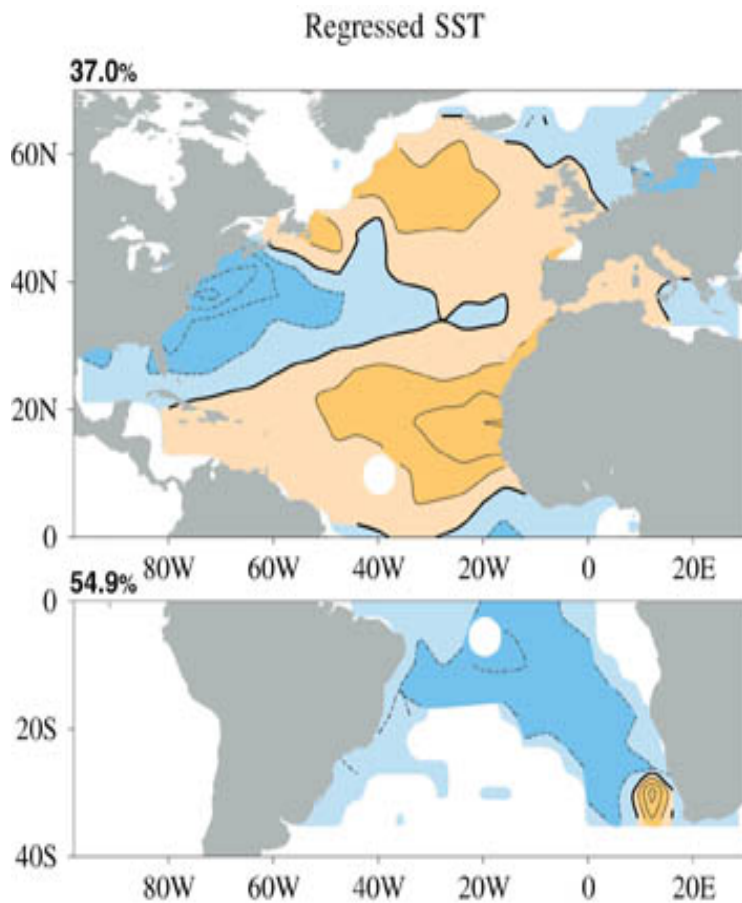
NAM
23.9%



(NCAR/CGD Analysis section)

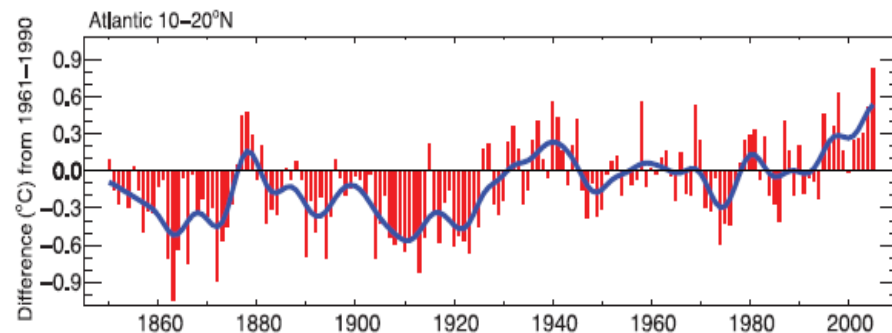
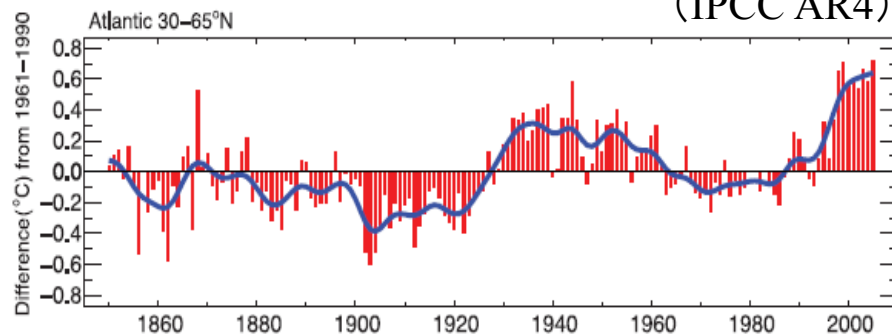
NAOの十年変動成分と関連した大西洋のSST変化

Tanimoto and Xie (2002)

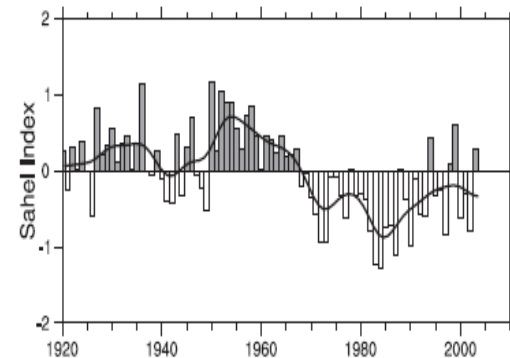


AMO: 大西洋十年規模変動 (Atlantic Multidecadal Oscillation) (Kerr, 2000)

(IPCC AR4)



- ・深層循環の強弱？
- ・ハリケーンの発生数
- ・サハラの降水(右)と関係？

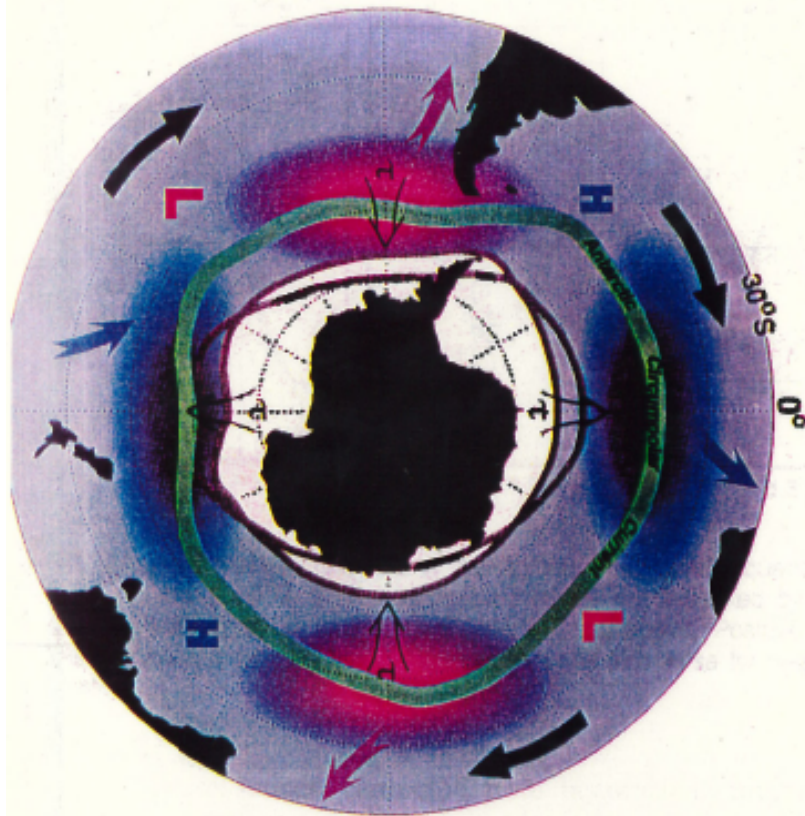


南極周極波動

W. B. and Peterson, R. G.: An Antarctic **circumpolar** wave in surface pressure, wind, temperature and sea-ice extent, *Nature*, 380, 699–702, 1996

controversial

LETTERS TO NATURE



510, relative to a pressure level of 1,000 dbar ($\sim 1,000$ m depth) where the mean currents are presumed to be weak. These data do not resolve the narrow frontal jets where surface speeds often exceed 40 cm s^{-1} , and where, in Drake Passage the jets comprise only $\sim 20\%$ of the width of the current¹⁶. Elsewhere they probably account for even less. The gridded data provide information about speeds averaged over several degrees latitude,

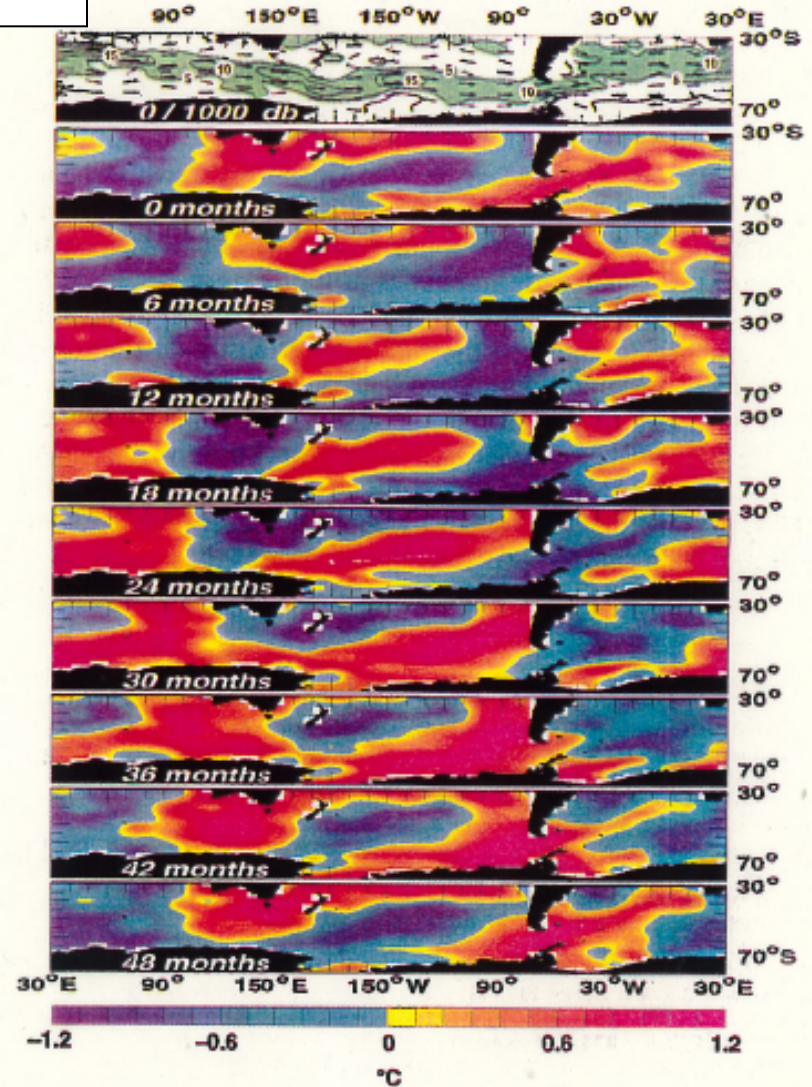
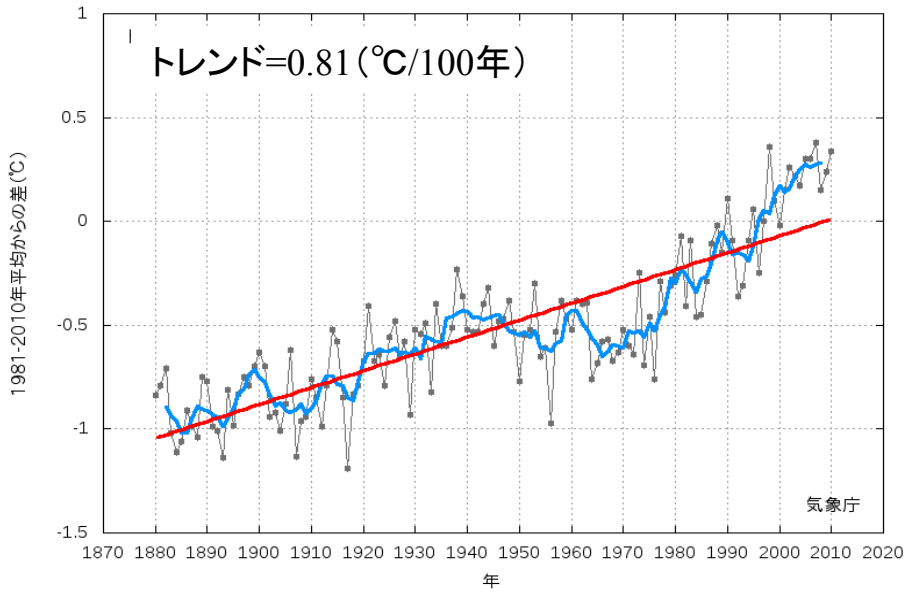
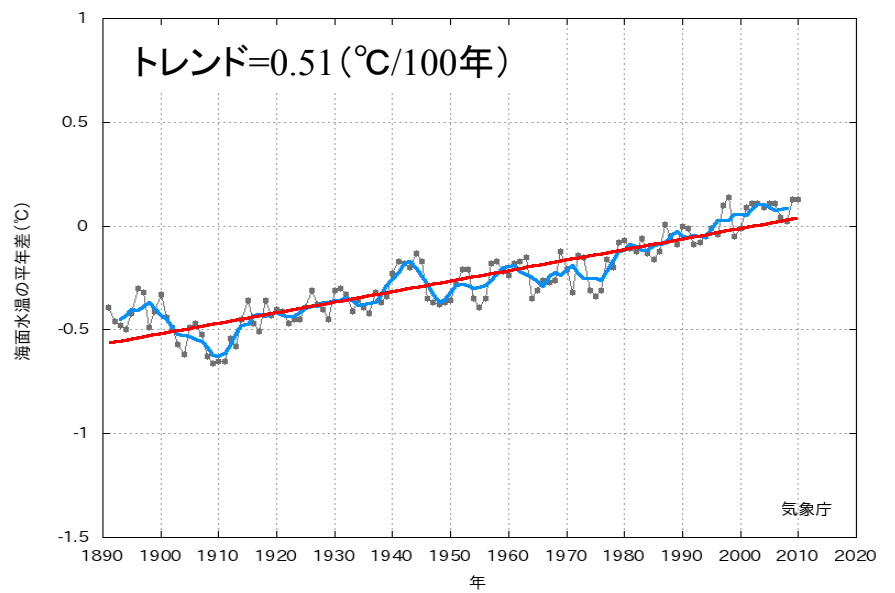


FIG. 4. Top panel: surface geostrophic velocity vectors relative to

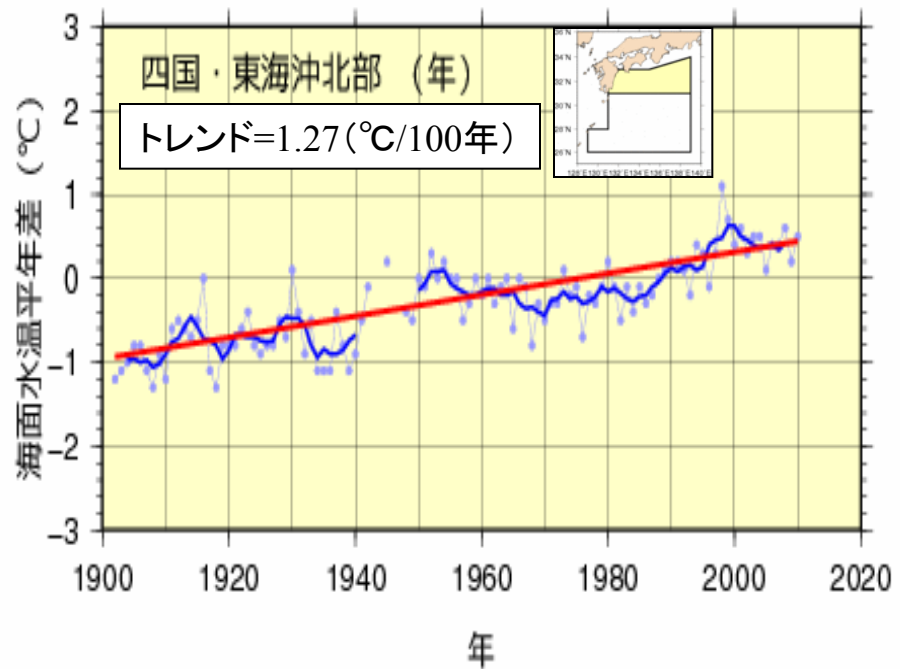
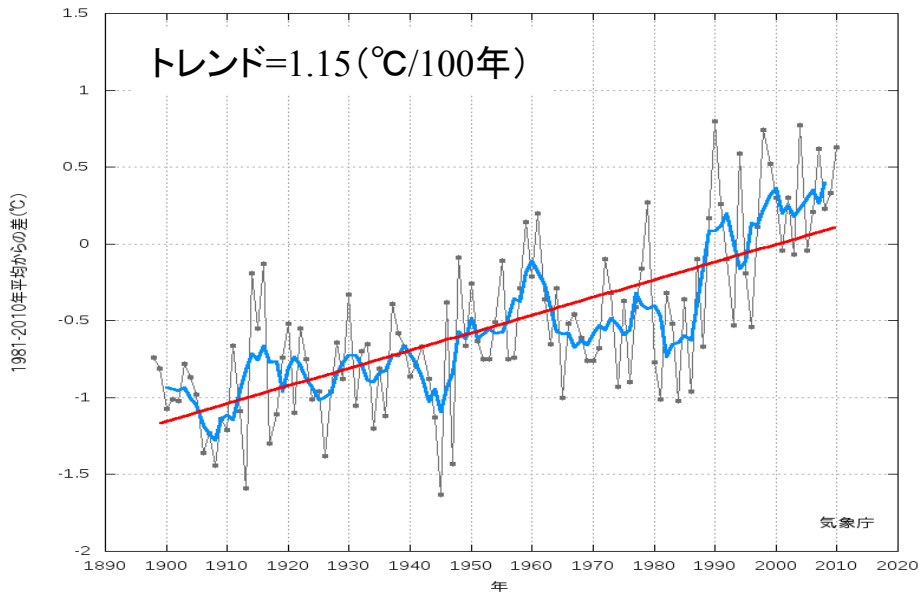
全球の年平均陸上気温

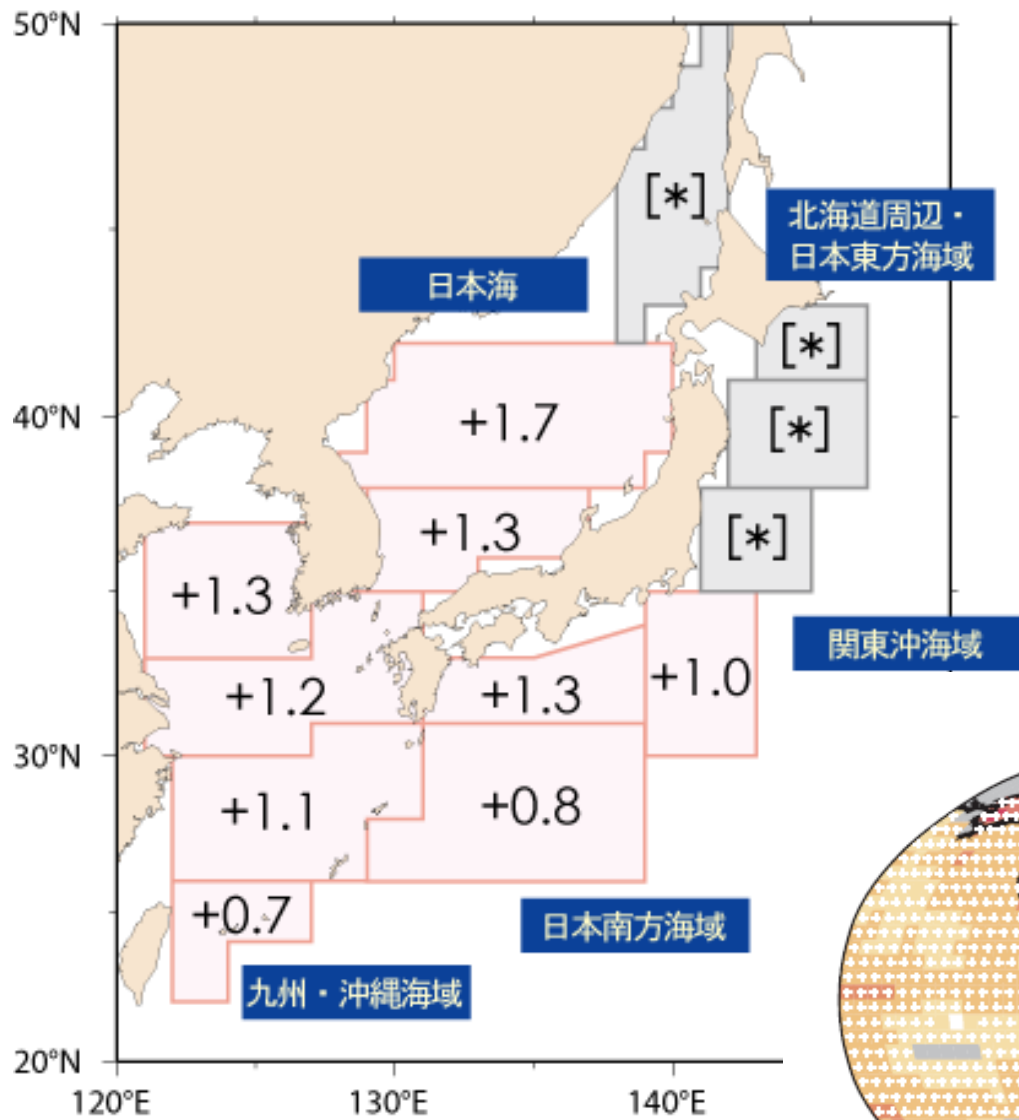


全球の年平均海面水温



日本の年平均陸上気温



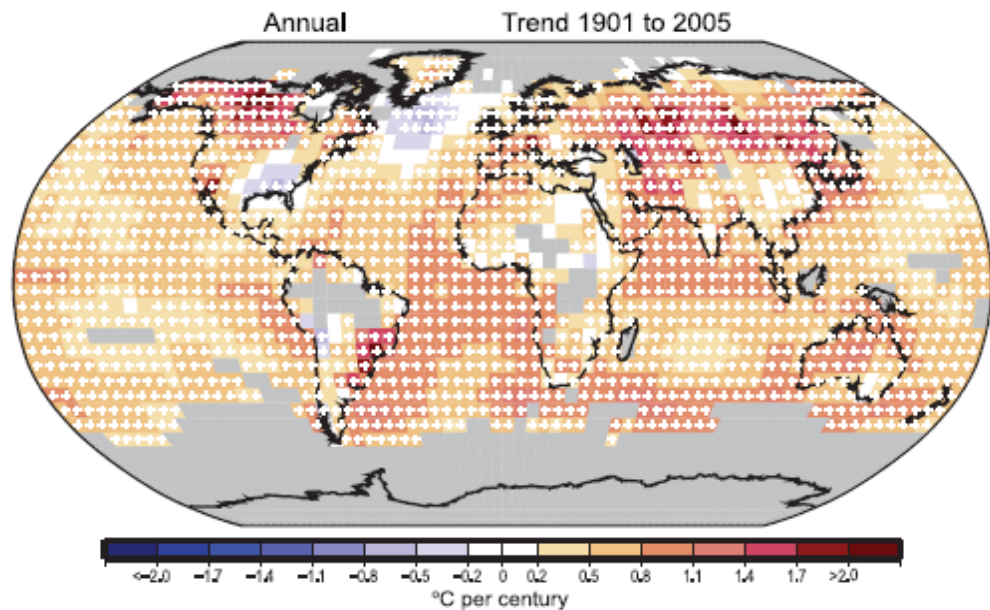


日本近海の海面水温のトレンドの分布

(気象庁 海洋の健康診断表より)

全球の陸上気温・海面水温のトレンド

(IPCC AR4)



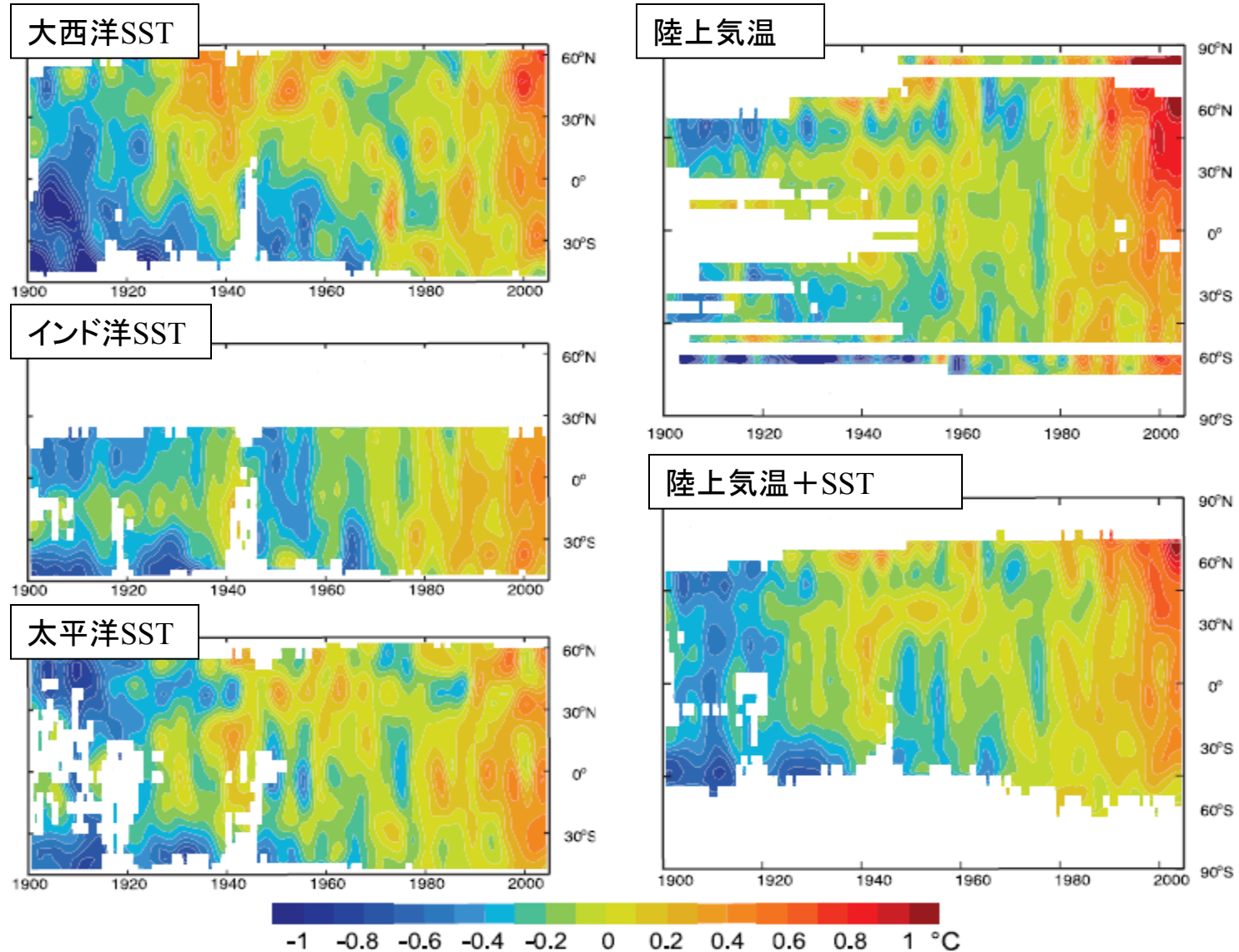
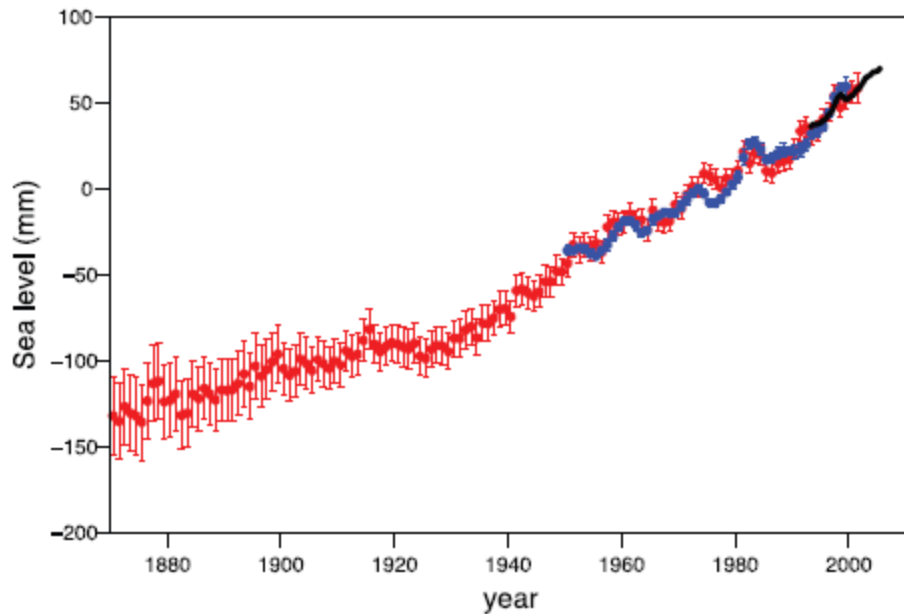


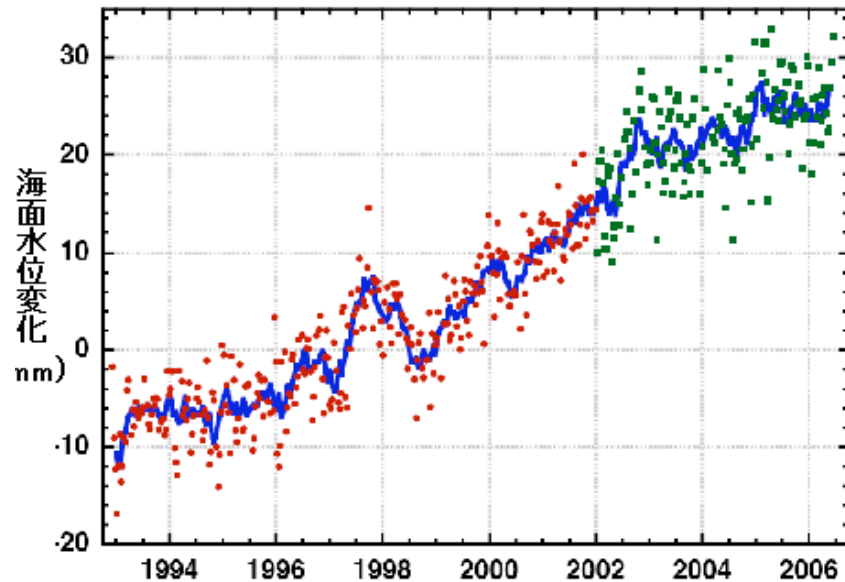
Figure 3.5. Latitude-time sections of zonal mean temperature anomalies ($^{\circ}\text{C}$) from 1900 to 2005, relative to the 1961 to 1990 mean. Left panels: SST annual anomalies across each ocean from HadSST2 (Rayner et al., 2006). Right panels: Surface temperature annual anomalies for land (top, CRUTEM3) and land plus ocean (bottom, HadCRUT3). Values are smoothed with the 5-point filter to remove fluctuations of less than about six years (see Appendix 3.A); and white areas indicate missing data.

全球平均海面水位変動

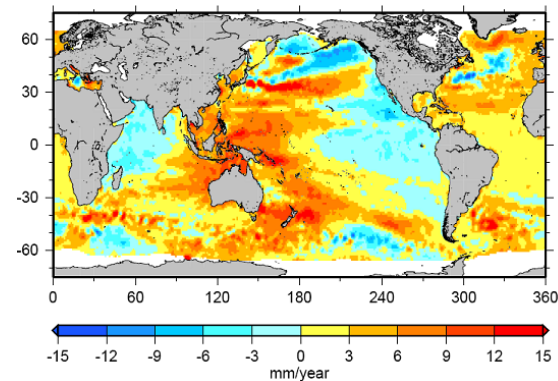
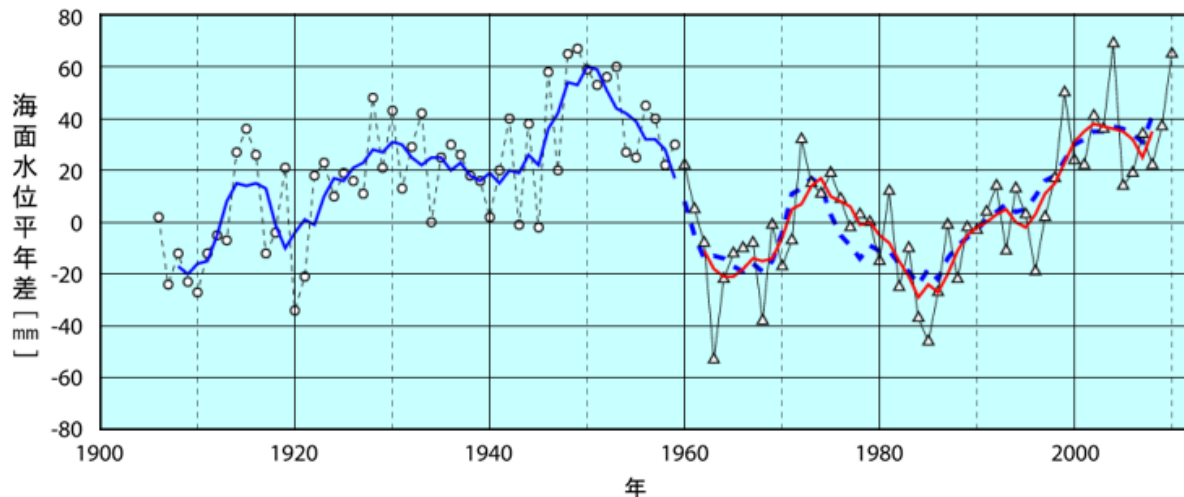


赤 解析
青 潮位計
黒 高度計

衛星高度計による評価



日本沿岸の平均水位変動

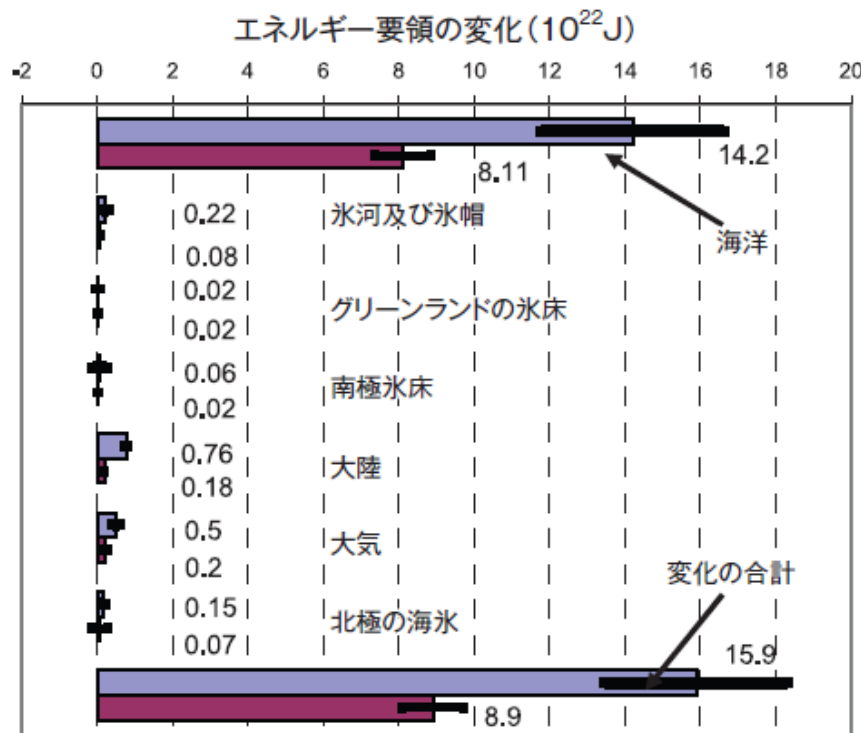


変動は空間的に不均一で
海洋循環の変化との関連
があると解釈される。

海洋への熱の蓄積

(IPCC AR4より)

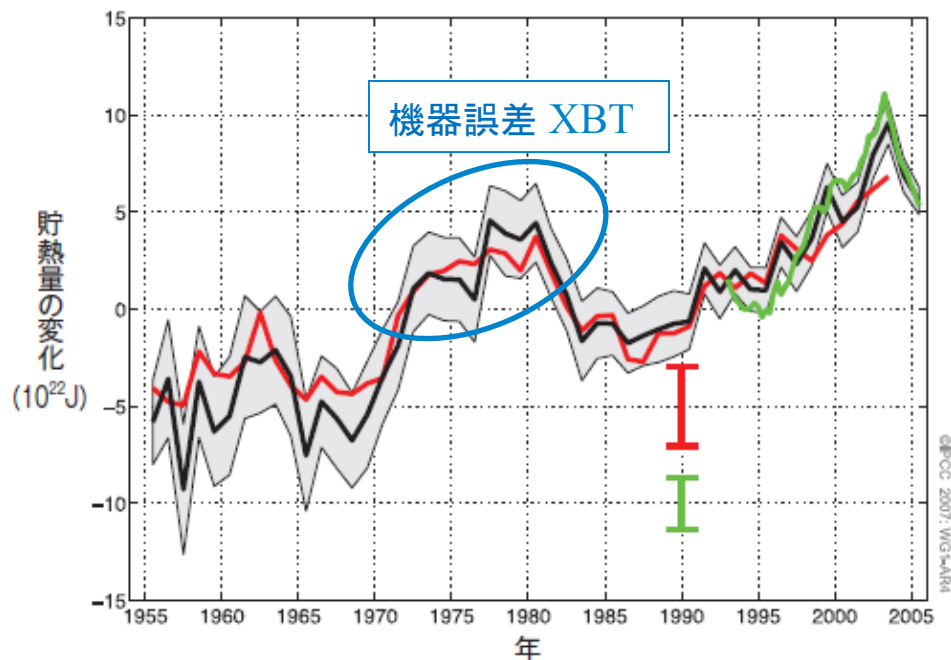
気候システムのエネルギー容量



薄青 1961-2003

紫 1993-2003

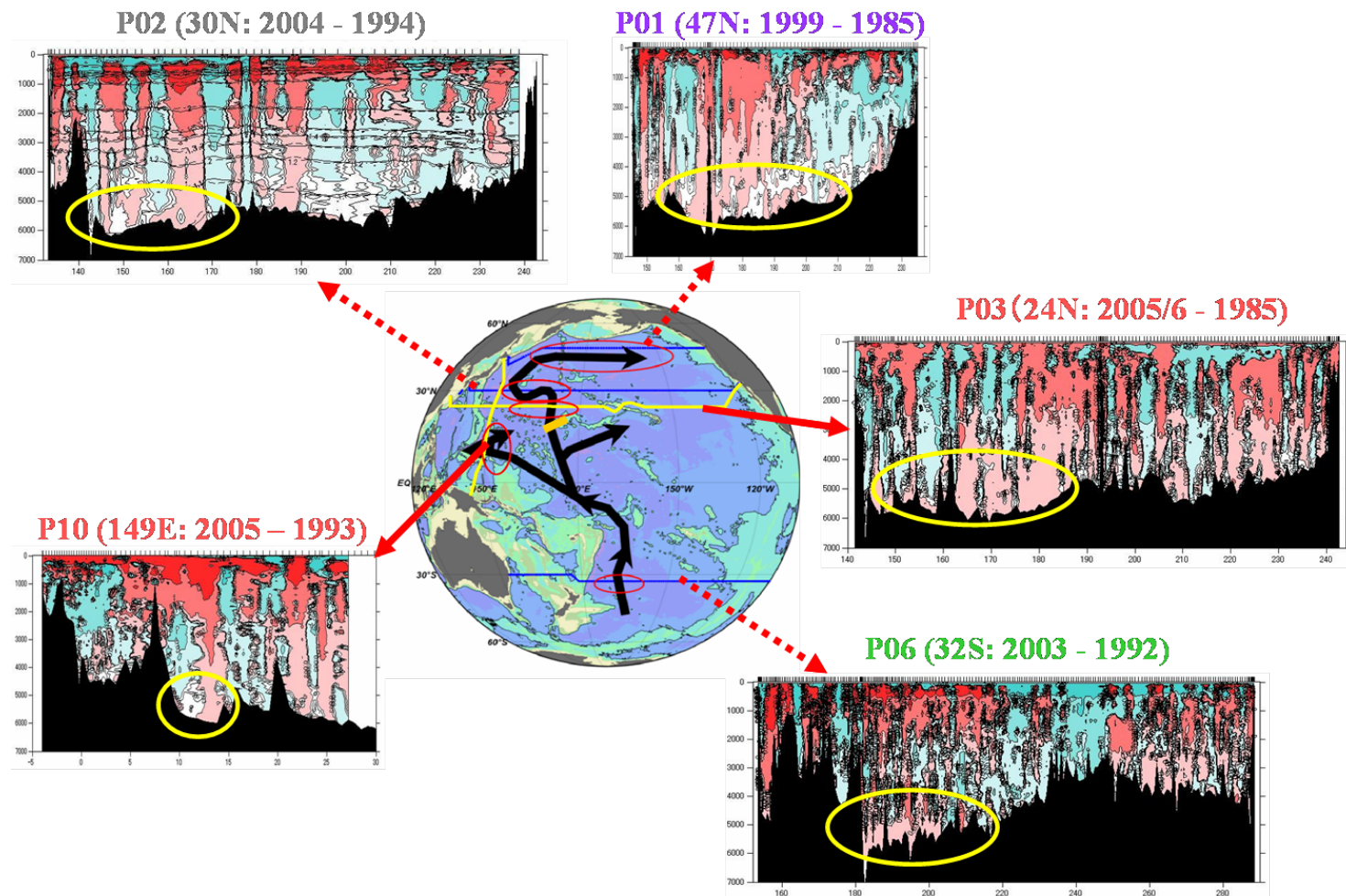
世界の海洋貯熱量 (0~700m)



図TS.16. 0~700 m深までの地球全体の海洋の貯熱量 (10^{22} J) の時系列。3本の色付きの線は、独立した海洋学的データの解析結果である。黒と赤の曲線はそれぞれの1961~1990年の平均値からの偏差を示し、短い緑の曲線は黒い曲線の1993~2003年の平均値からの偏差を示す。黒い曲線の90%不確実性範囲が灰色の陰影で示され、他の二本の曲線のものはエラーバーで示されている。[図5.1]

深層の昇温の検出

太平洋の各WHPラインで検出された水温差。CDWの流路に沿って海底付近に昇温が見られる(Fukasawa et al., 2004, Nature; Kawano et al., 2006, GRL) 南太平洋を経て北太平洋に流入する南極周極深層水(CDW)の流路に沿って、底層水温が1990年代の観測と比べて $0.005\sim 0.01^{\circ}\text{C}$ 上昇していることがわかった。(JAMSTEC)



酸素極小層の発達・拡大

熱塩循環の弱まりを示唆？

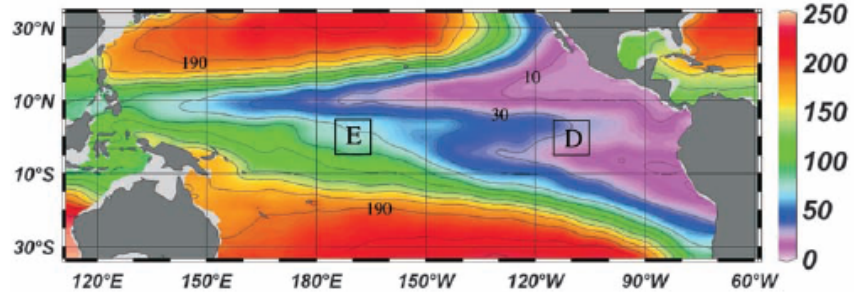
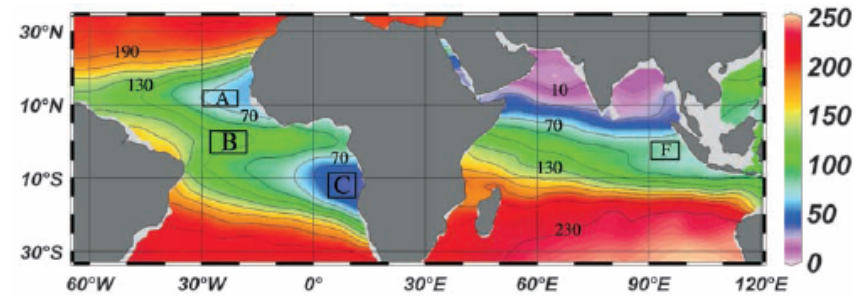
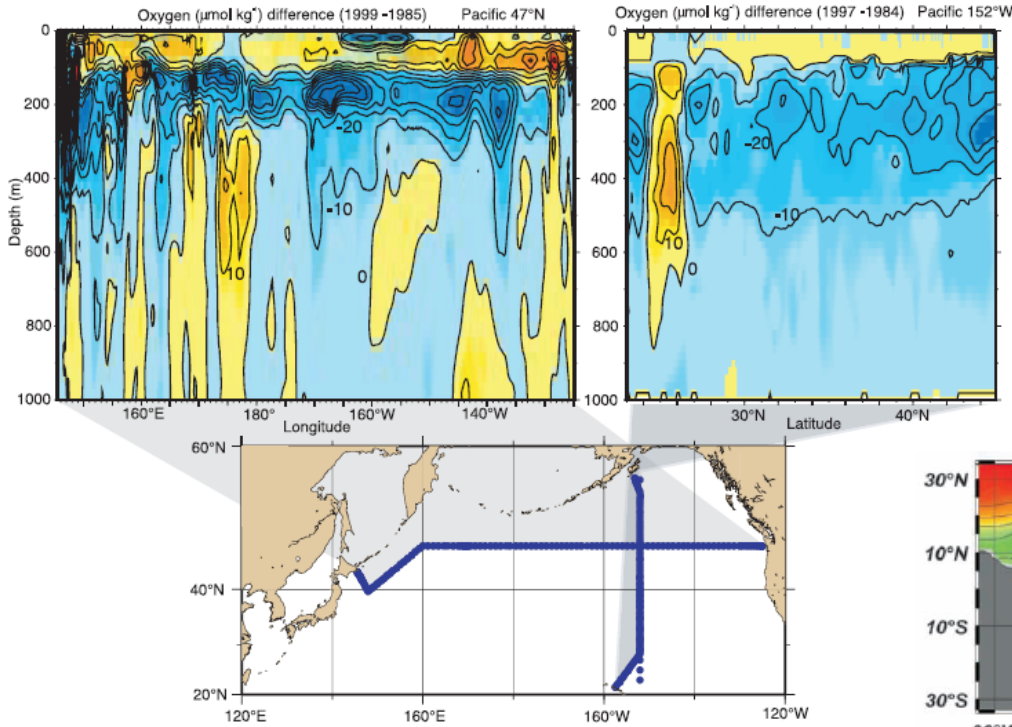


Fig. 1. Climatological mean (18) dissolved oxygen concentrations ($\mu\text{mol kg}^{-1}$ shown in color) at 400 m depth contoured at 20- $\mu\text{mol kg}^{-1}$ intervals from 10 to 230 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ (black lines) using Ocean Data View (19) software. Analyzed areas (A to F, Table 1, and Fig. 2) are enclosed by black boxes.

Expanding Oxygen-Minimum Zones in the Tropical Oceans

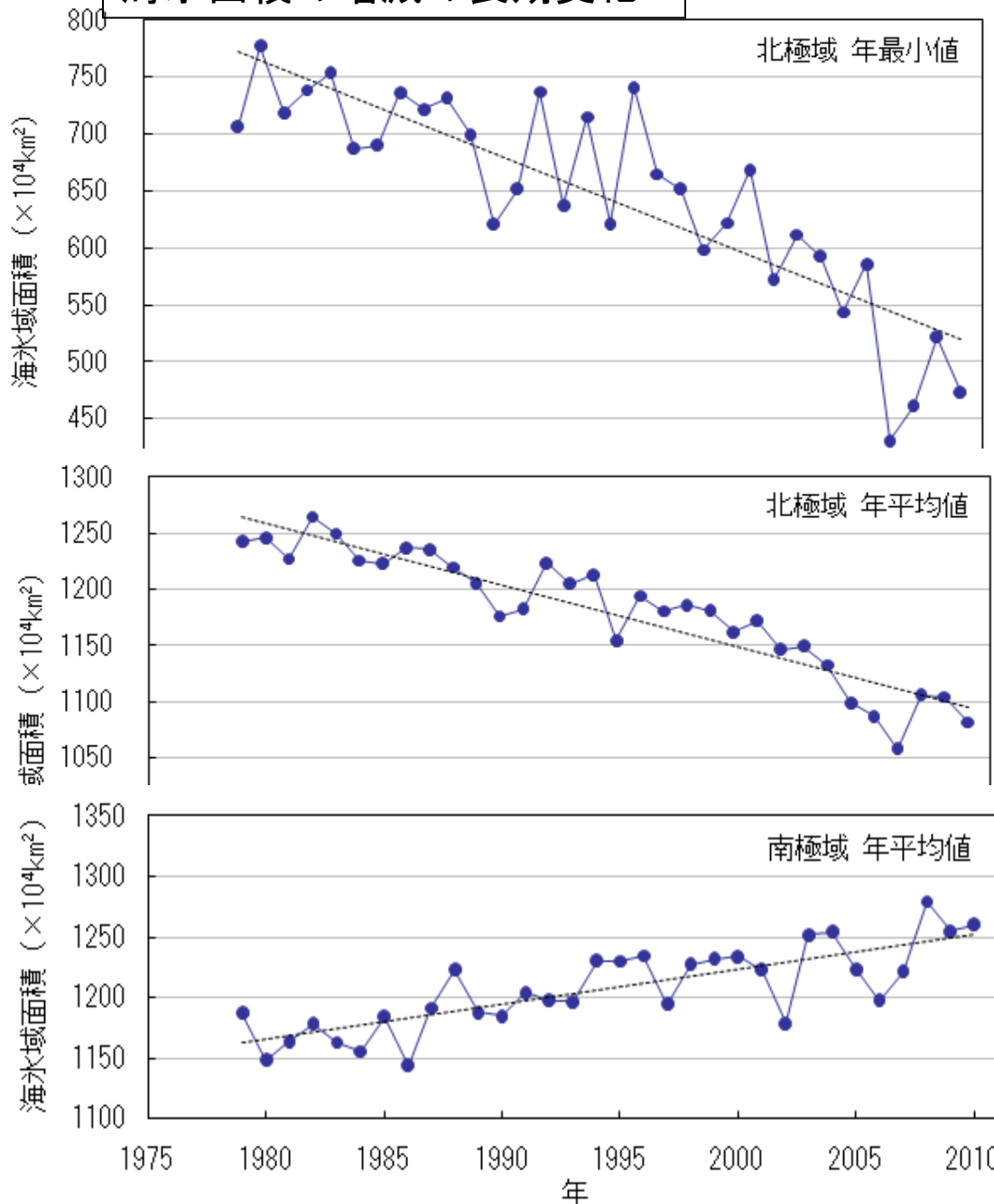
Lothar Stramma,^{1*} Gregory C. Johnson,² Janet Sprintall,³ Volker Mohrholz⁴

Oxygen-poor waters occupy large volumes of the intermediate-depth eastern tropical oceans. Oxygen-poor conditions have far-reaching impacts on ecosystems because important mobile macroorganisms avoid or cannot survive in hypoxic zones. Climate models predict declines in oceanic dissolved oxygen produced by global warming. We constructed 50-year time series of dissolved-oxygen concentration for select tropical oceanic regions by augmenting a historical database with recent measurements. These time series reveal vertical expansion of the intermediate-depth low-oxygen zones in the eastern tropical Atlantic and the equatorial Pacific during the past 50 years. The oxygen decrease in the 300- to 700-m layer is 0.09 to 0.34 micromoles per kilogram per year. Reduced oxygen levels may have dramatic consequences for ecosystems and coastal economies.

(Stramma et al, Science, 2008)

海氷面積の増減の長期変化

(気象庁 海洋の健康診断表より)



IPCC AR4

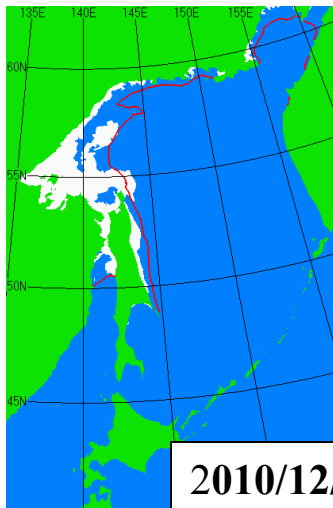
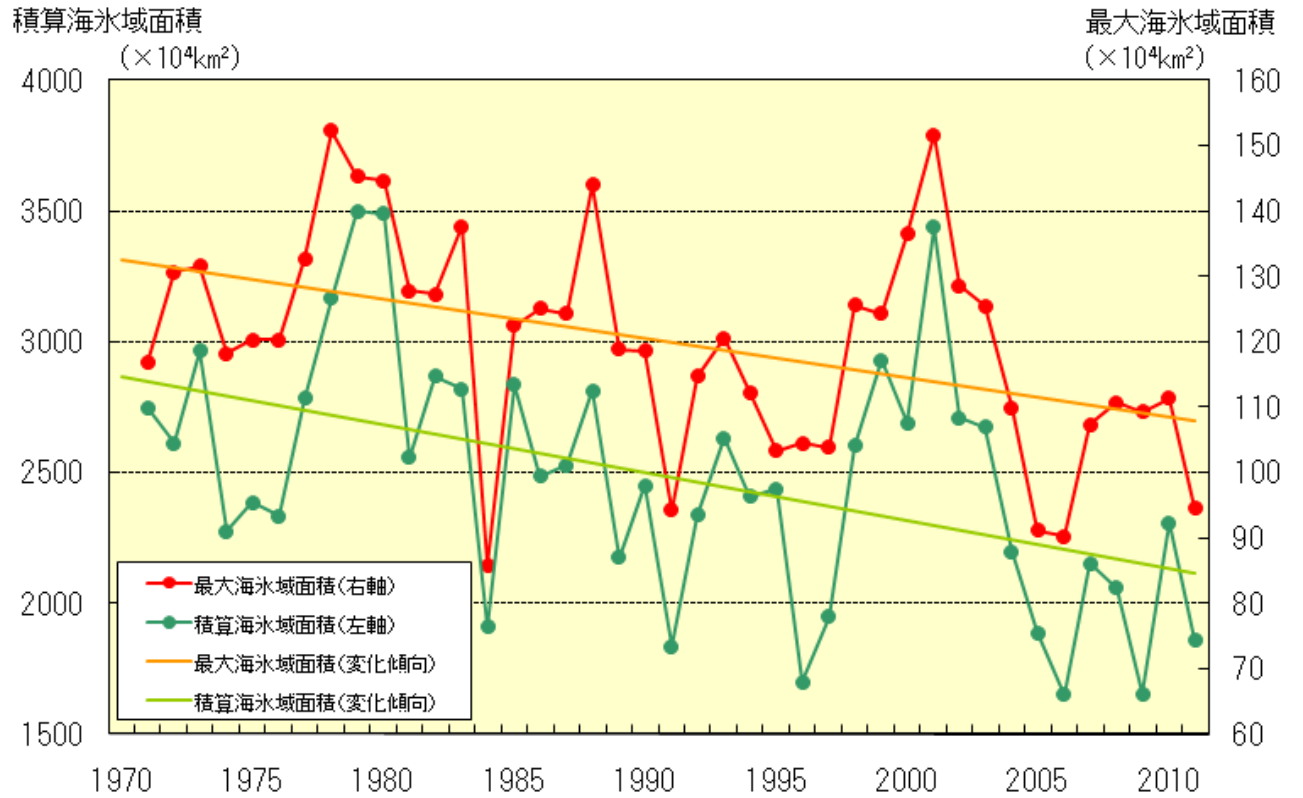
1978年からの衛星観測によれば、北極の年平均海氷域面積は、10年当たり2.7 [2.1~3.3] %縮小した(角括弧中の数字は90%の信頼区間を示す)。特に夏季の縮小は10年当たり7.4 [5.0~9.8] %と大きい。

南極の海氷域面積には、年々変動と局地的な変化が継続して見られるものの、統計学的に有意な変化傾向は見られない。これはこの地域全体で平均すると昇温が認められないことと整合している。

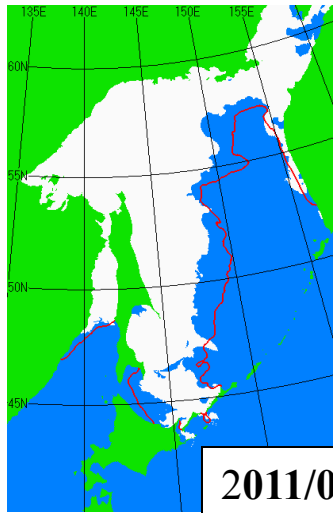
オホーツク海の海氷

最も低緯度での結氷

アムール河河口が形成域



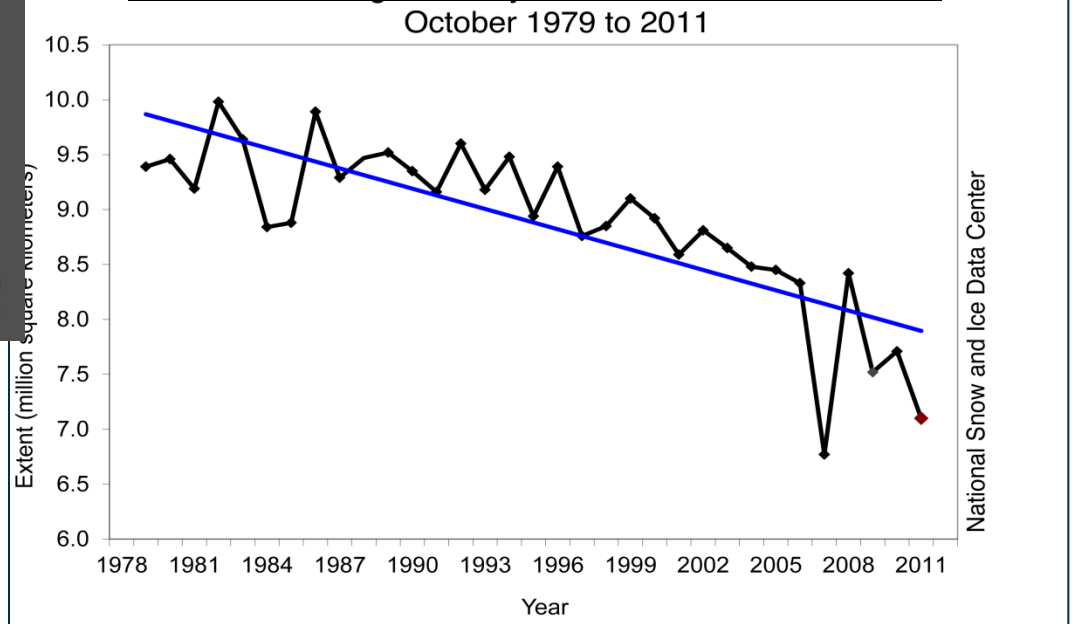
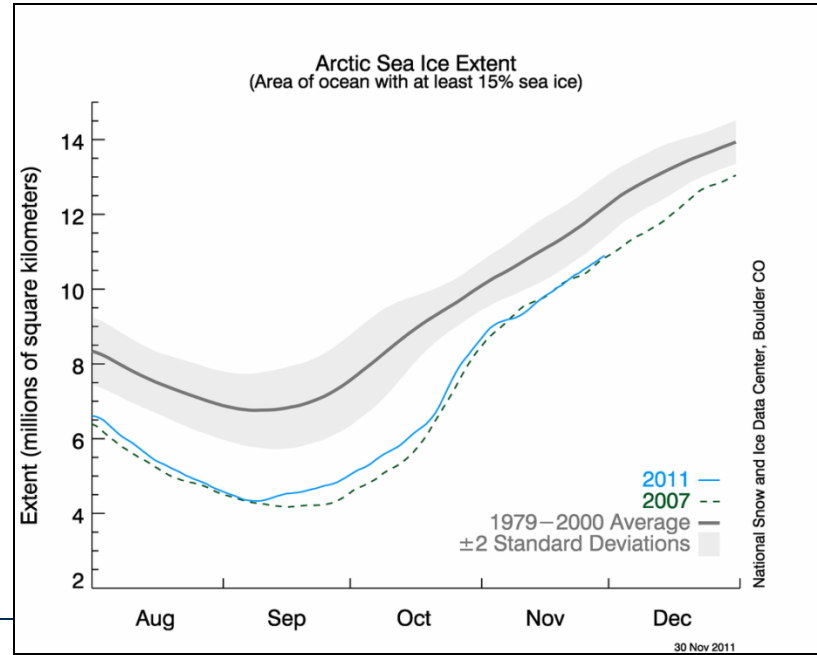
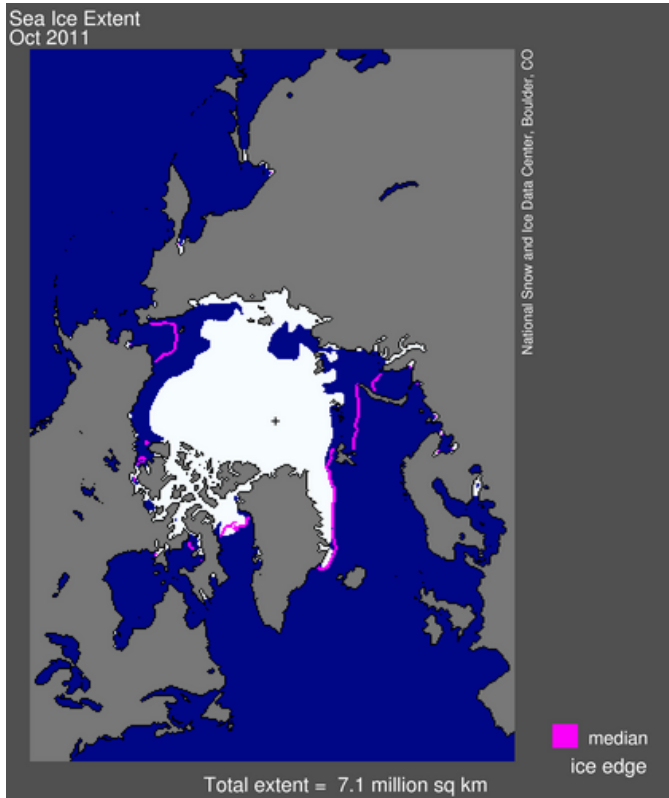
2010/12/15



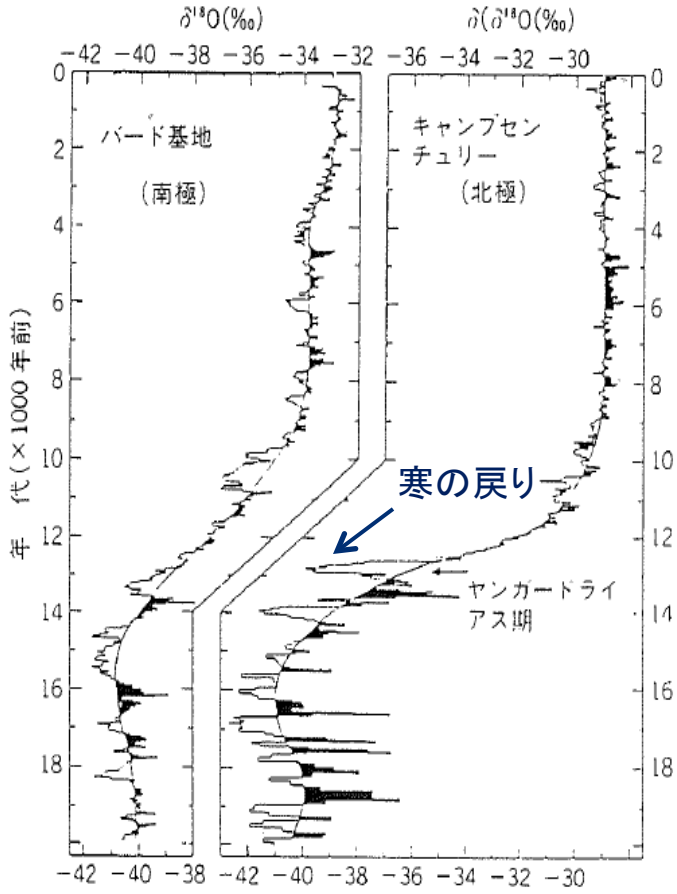
2011/03/10

今年の北極の状況

NSIDC(米国)より



古気候： ヤンガー・ドライアスと海洋循環



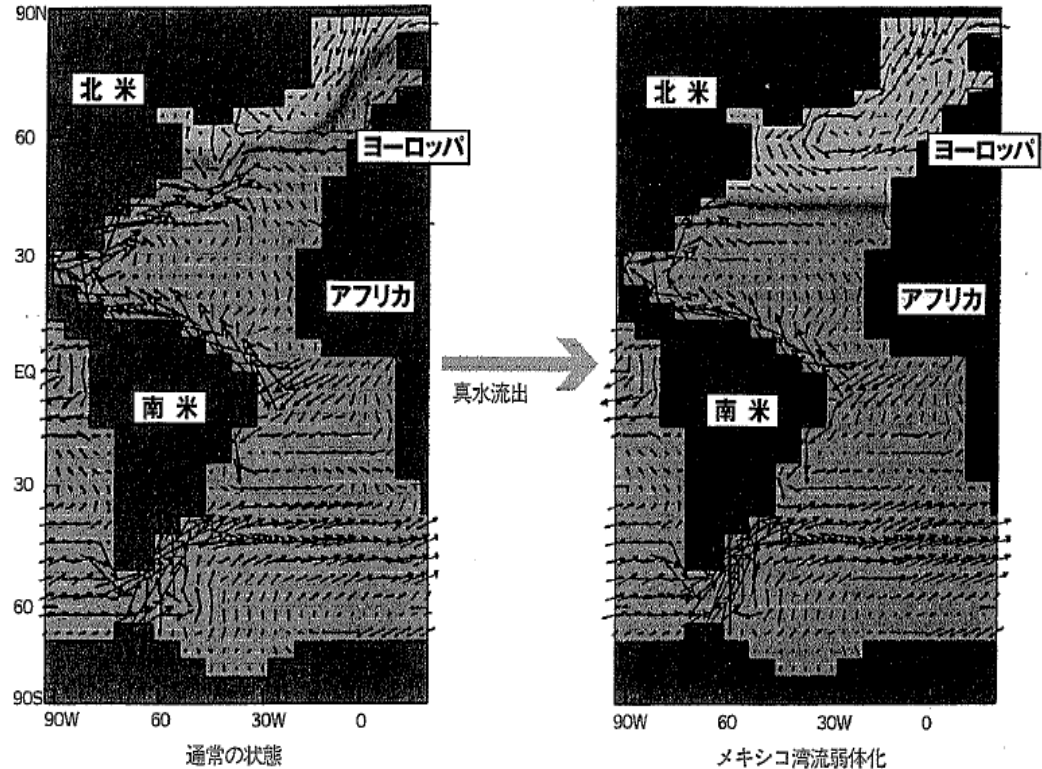
南北両極域の氷床コアにみられる気候変動の比較

ヤンガー・ドライアス
EVENTを海洋の熱
塩循環の弱まりによ
ると考えるシミュレー
ション

(Manabe)



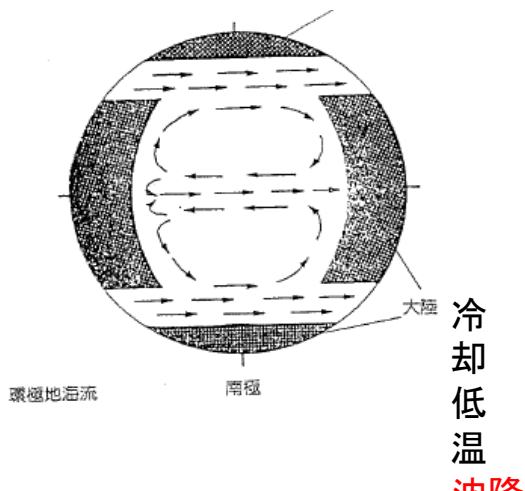
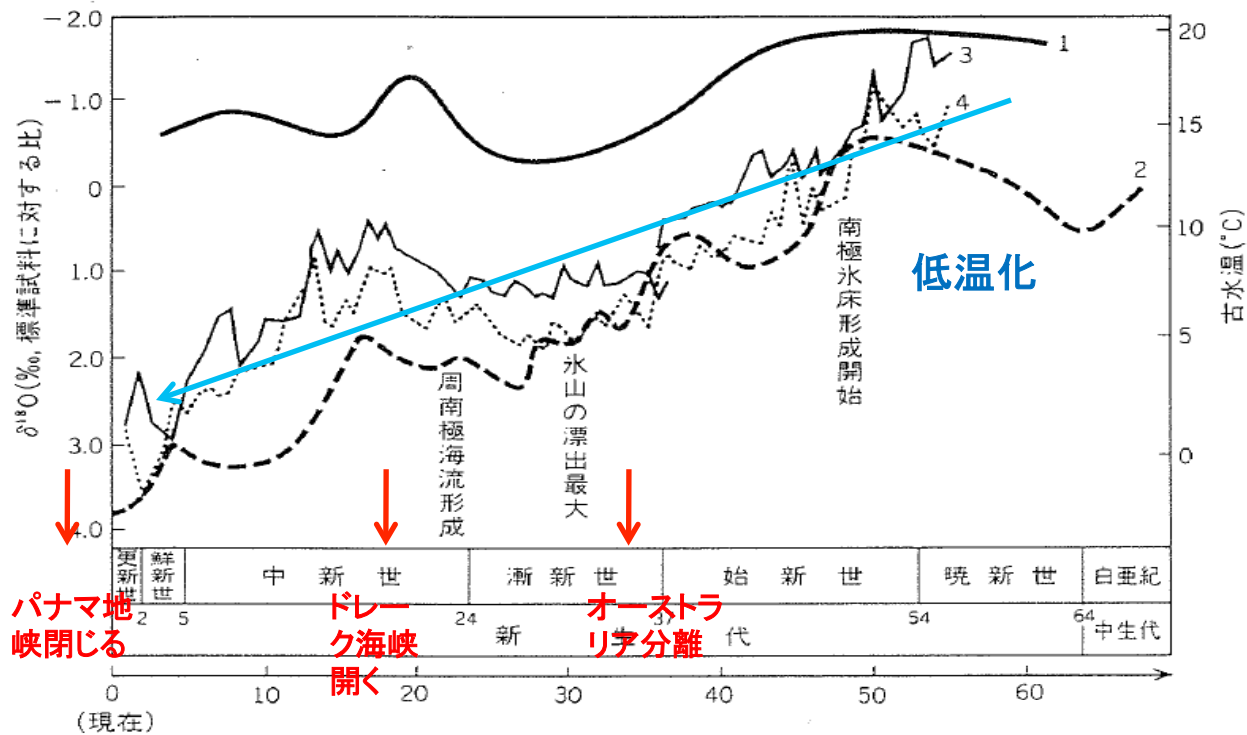
チョウスケソウ



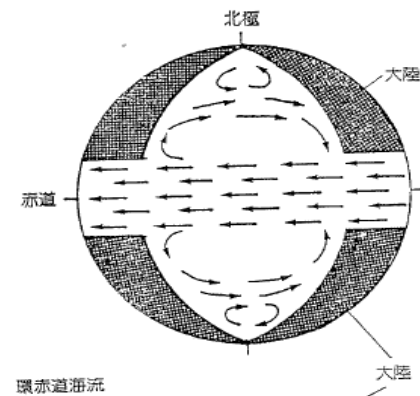
ミシシッピ川 - セントローレンス川

古気候：大陸分布と海洋循環

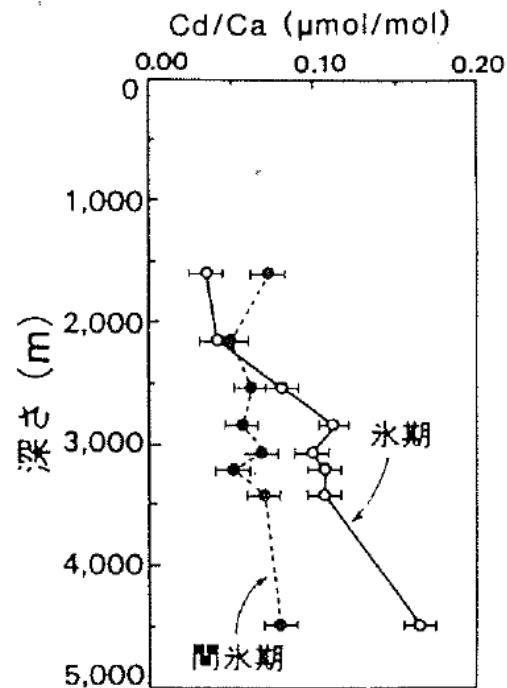
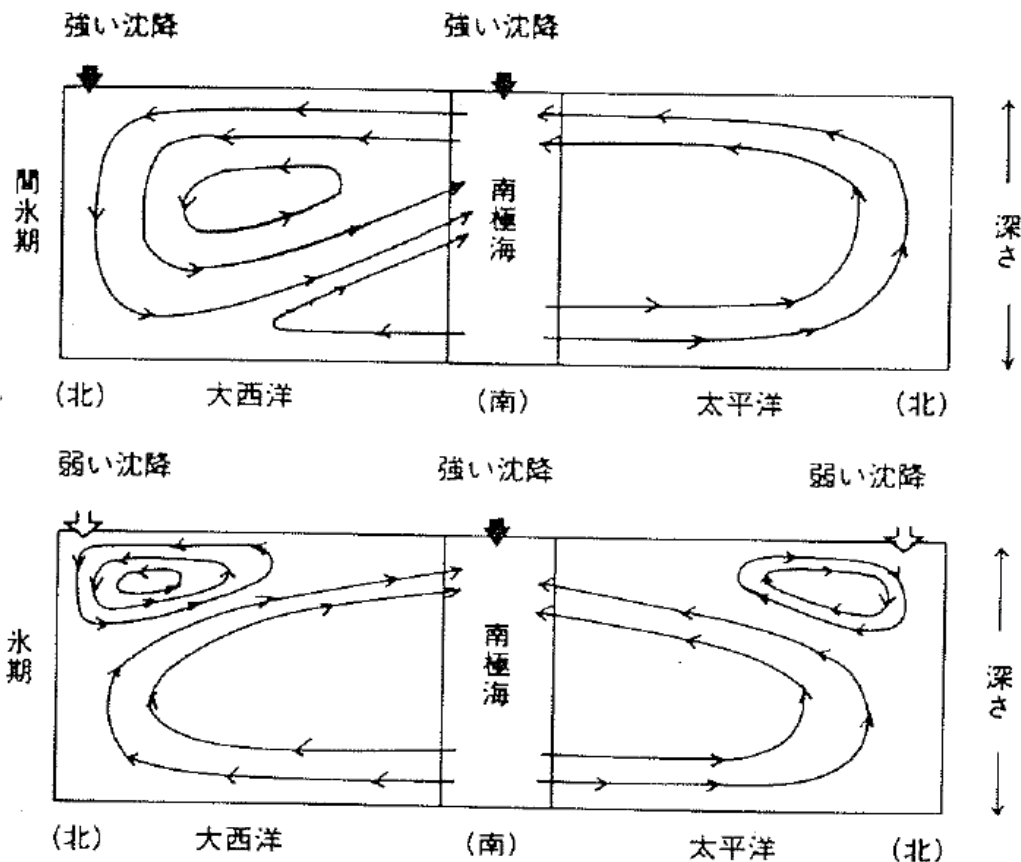
浮遊性・底生有孔虫の殻の酸素同位体比に基づく古水温の変動曲線



蒸発高塩 沈降 (Evaporation high salt sinking)

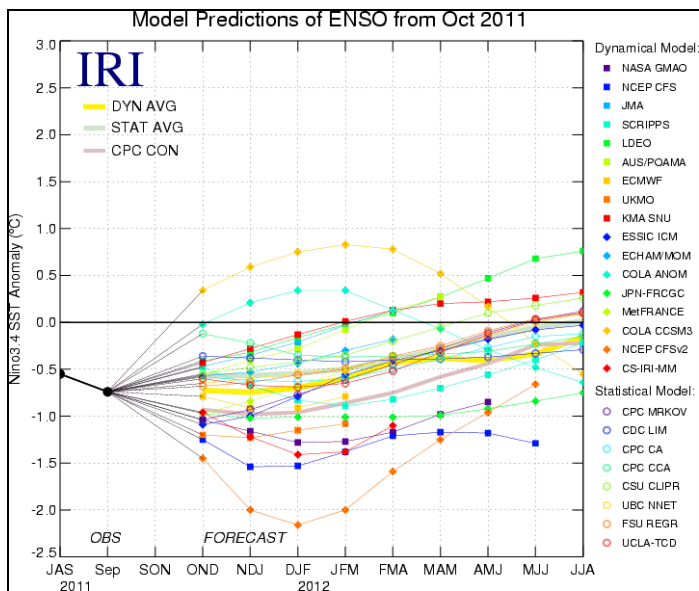


古気候：氷期・間氷期の海洋循環の相違



氷期は深層循環が止まっていたらしい (Broecker, 1993)

モデリングの現状・今後



エルニーニョ・季節予報

初期化 特に海洋データの同化

イニシャルショックの軽減

大気擾乱の表現 MJOなど

現業システム 効率性

1-tiered 季節予報 アンサンブル予報など

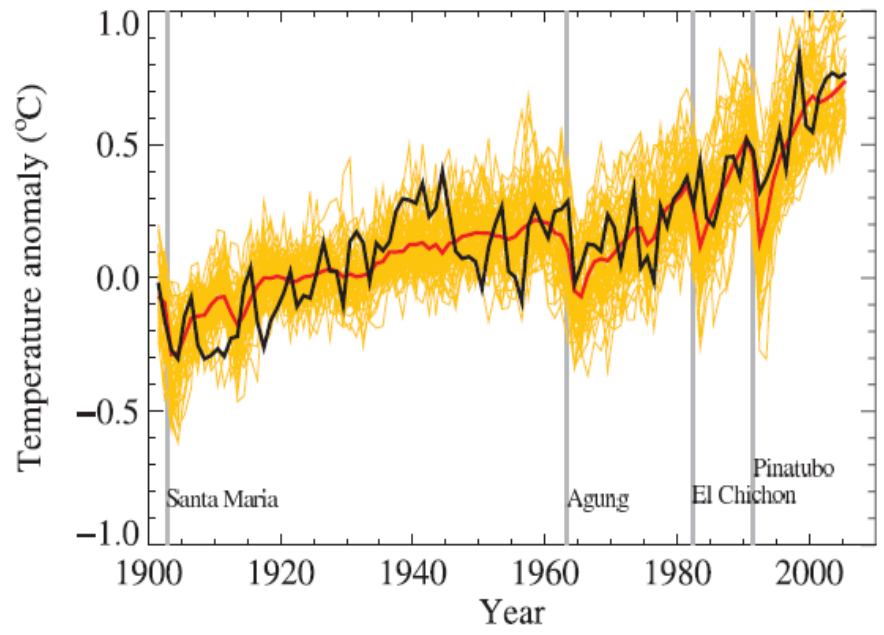
温暖化予測

エネルギー保存

地球システムモデル 炭素循環ほか

フィードバック過程の定量的評価

地域気候の予測 ダウンスケーリング



温暖化予測モデルの推移 (IPCC AR4)

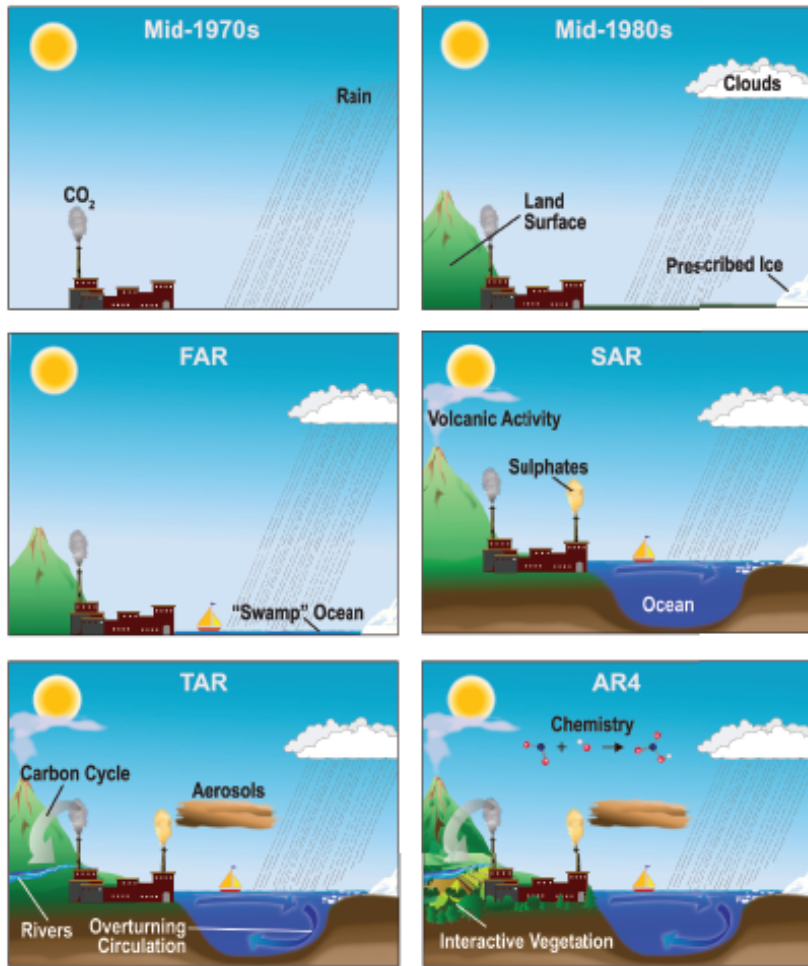


Figure 1.2. The complexity of climate models has increased over the last few decades. The additional physics incorporated in the models are shown pictorially by the different features of the modeler's world.

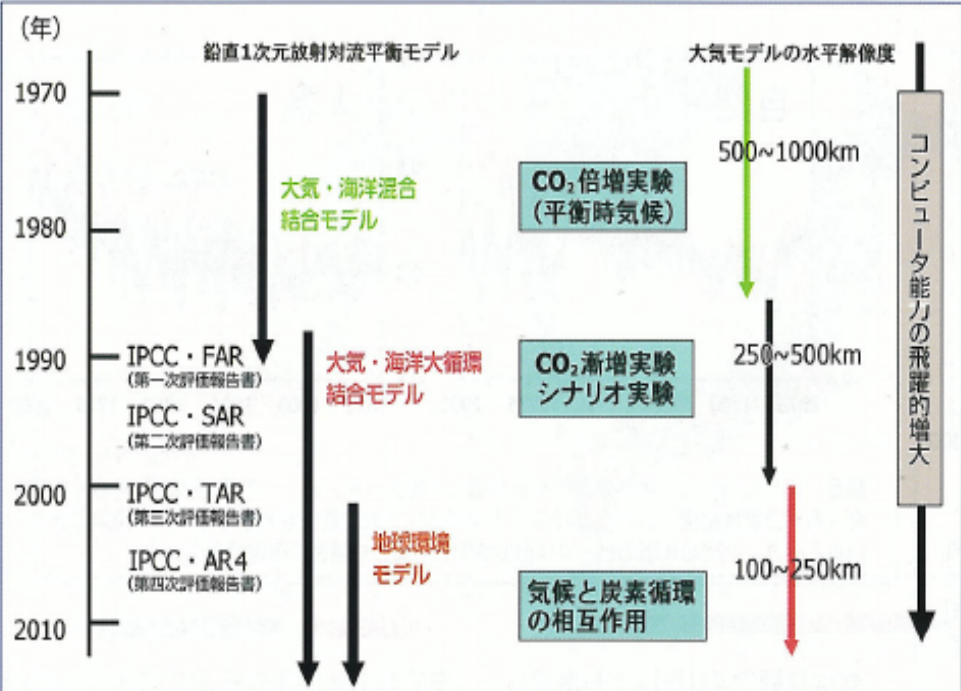
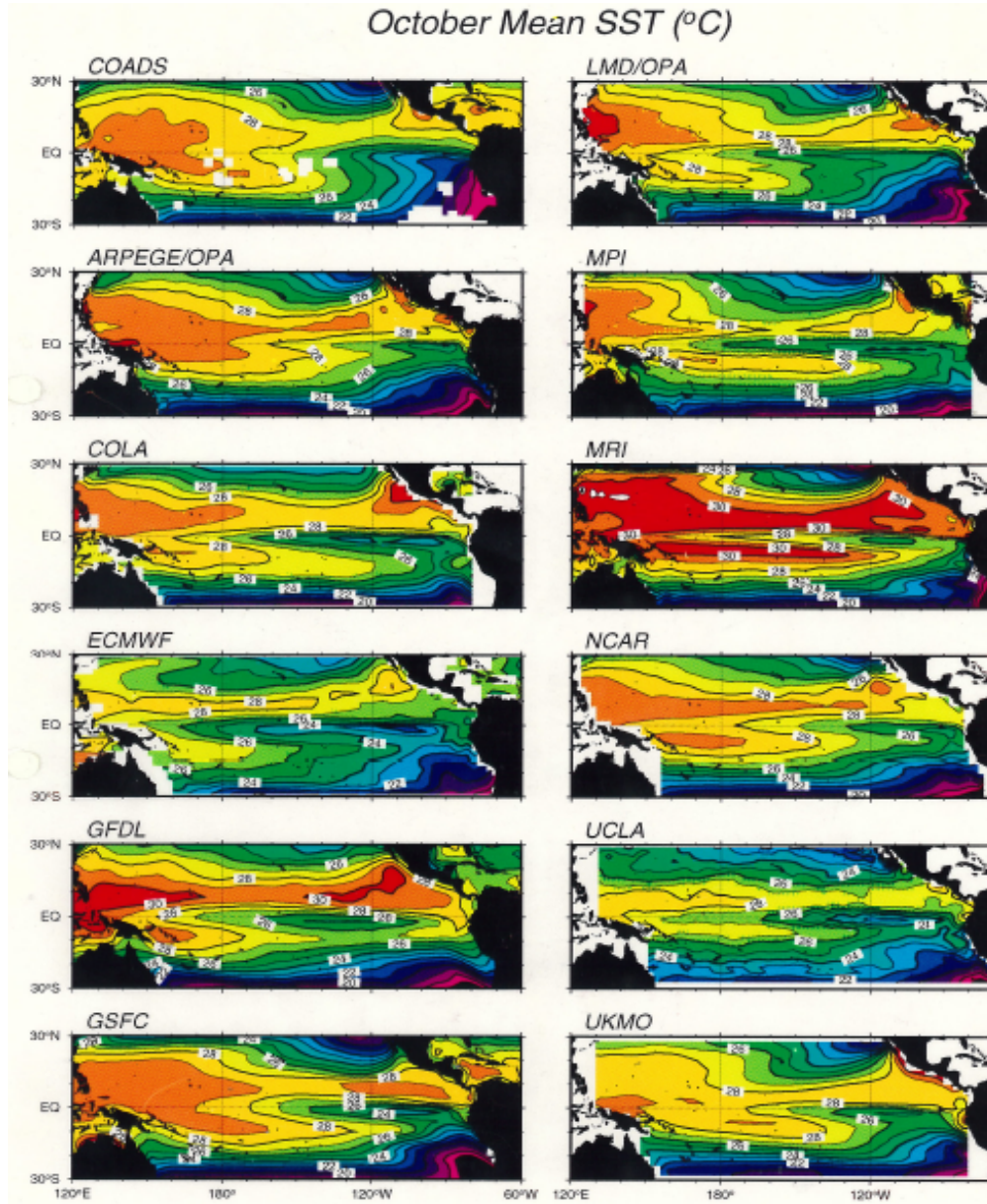


図3 温暖化実験の進展。左上の鉛直1次元放射対流モデルが真鍋氏のもの。モデルの水平解像度（メッシュ）はコンピュータ能力の向上に伴って細かくなっている。温暖化実験も単にCO₂の大気中濃度が倍増した場合の予測から、社会変化や政策を考慮した複数のシナリオに沿った予測、さらに気候と炭素循環の相互作用まで取り入れた予測へ、と進化している

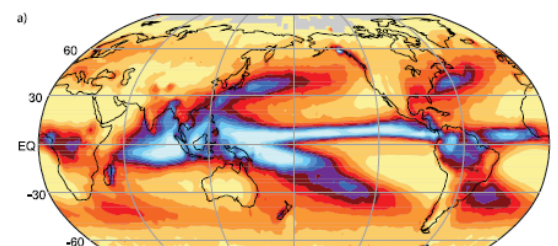
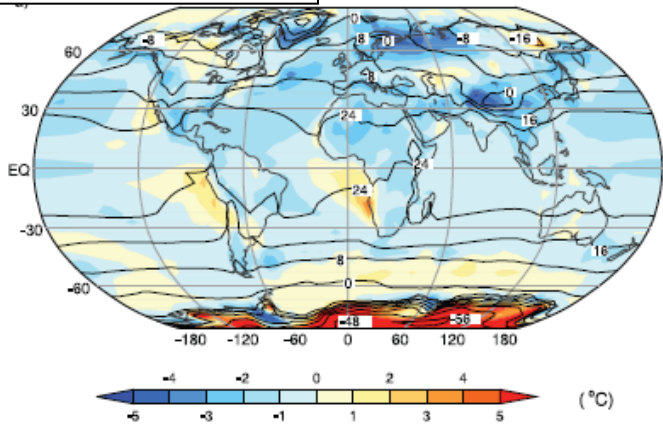
MIP : モデル相互比較 (Model Inter-Comparison)



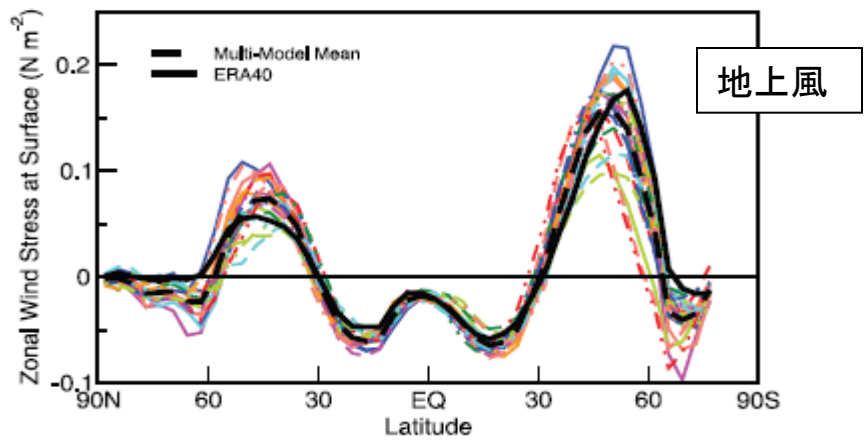
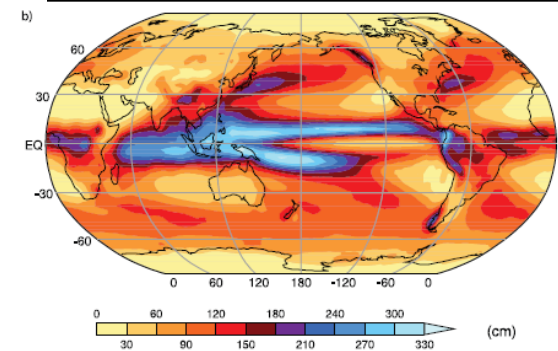
ENSIP (2001) ?

IPCC AR4 のモデル相互比較 (1)

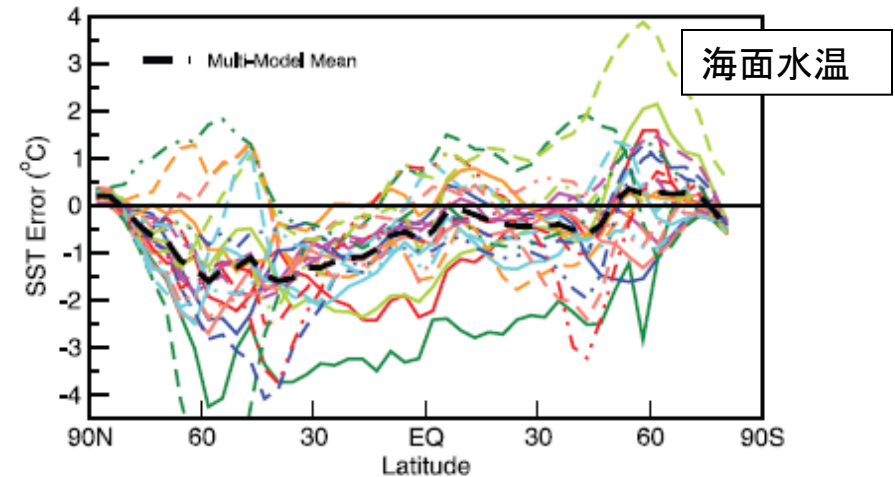
海面水温(平均誤差)



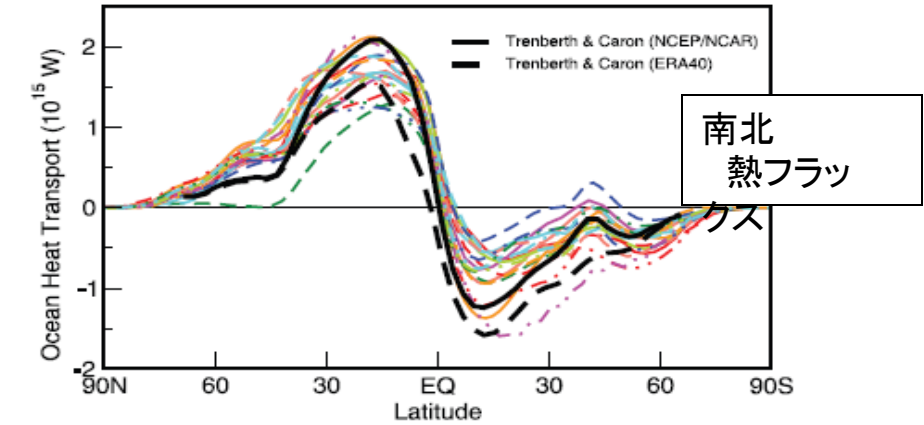
降水(上:観測、下:モデル平均)



地上風



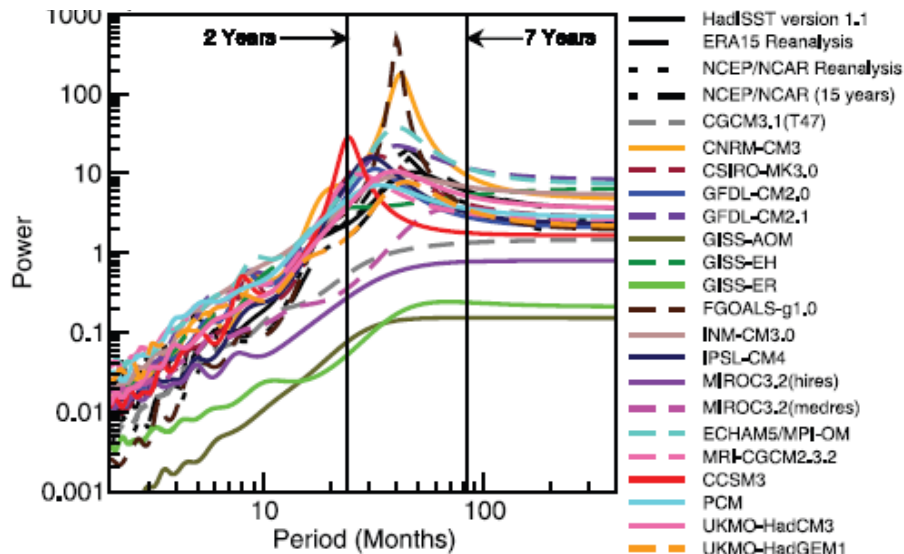
海面水温



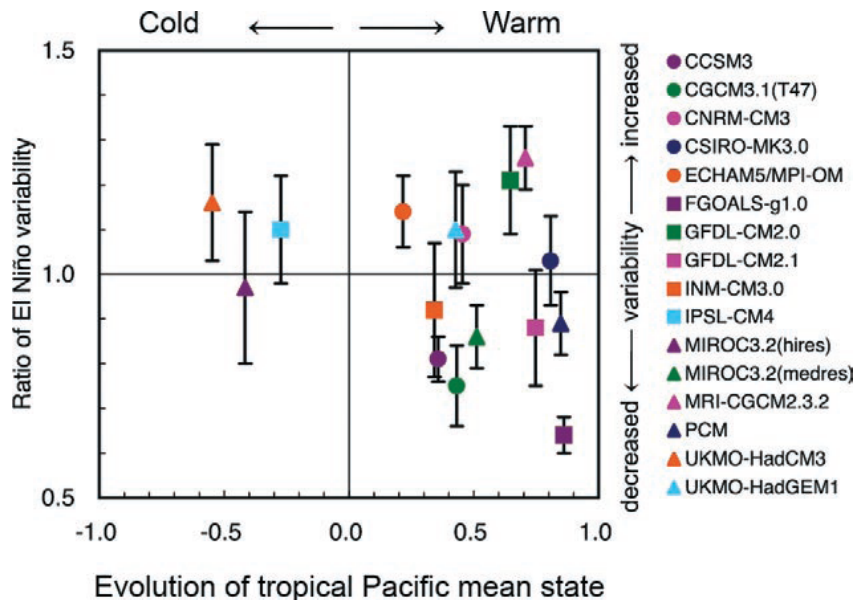
南北熱フラックス

IPCC AR4 のモデル相互比較 (2)

エルニーニョ周期

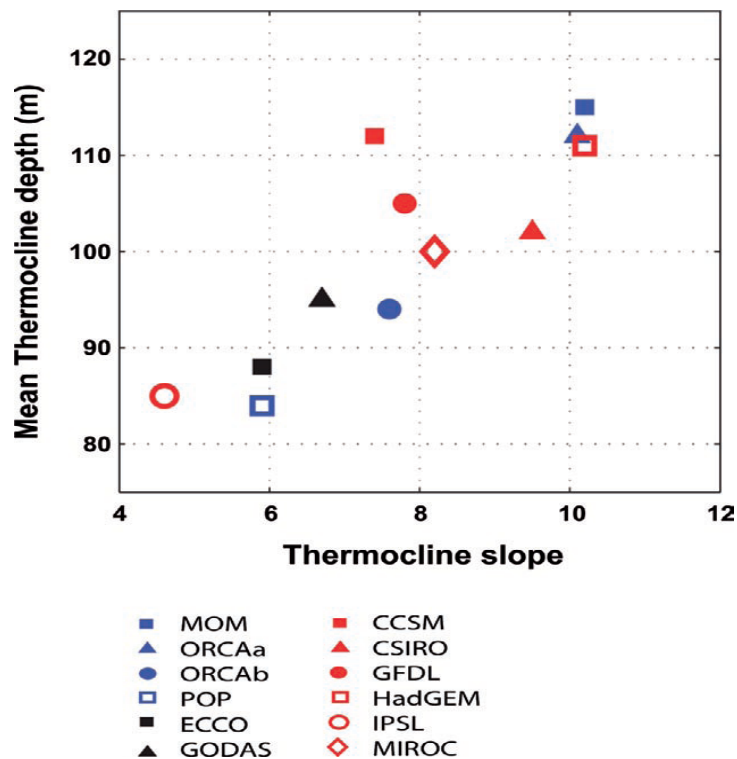


平均場とエルニーニョの変化



Metricsに基づくメカニズムの議論が今後、MIPの標準手法となる

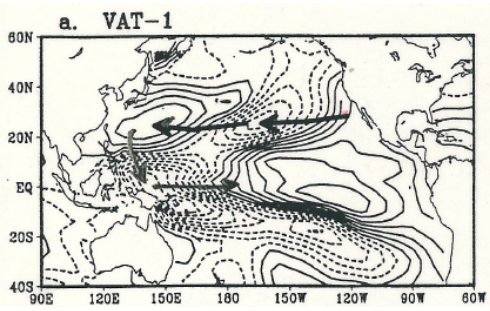
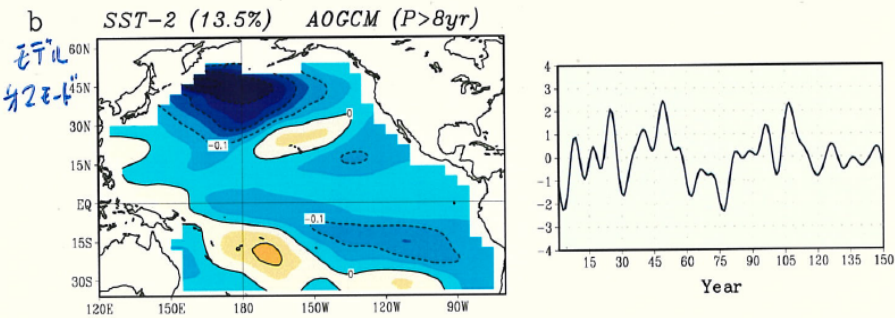
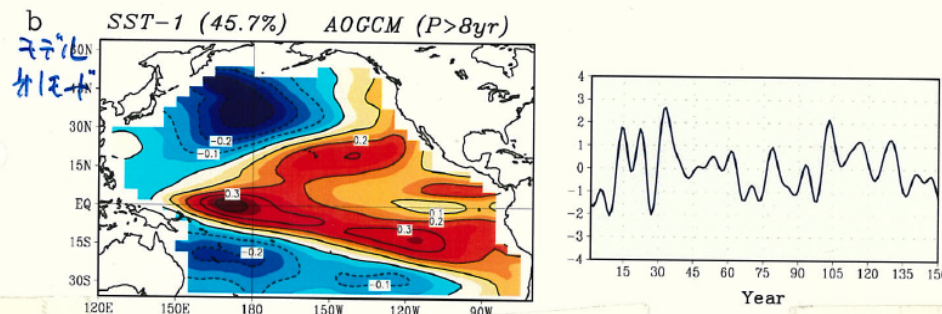
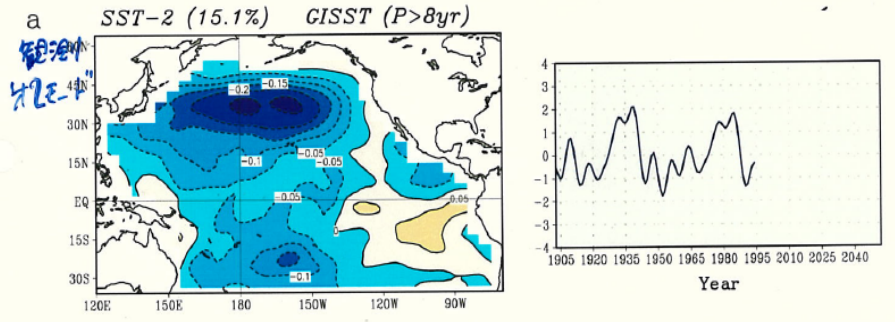
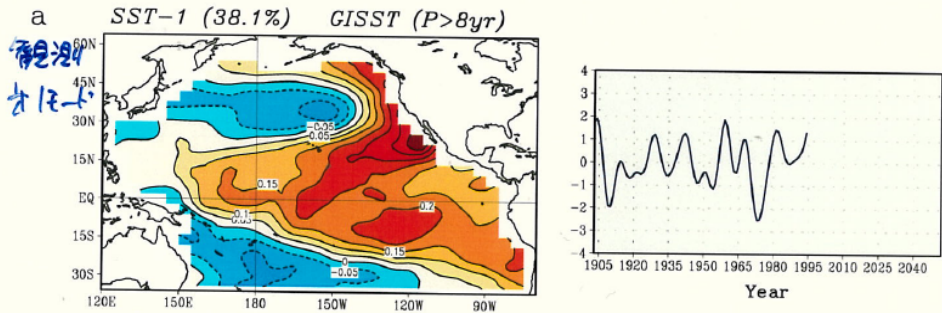
EX. SST発展方程式に基づくBJ指数 (Jin, 2006)



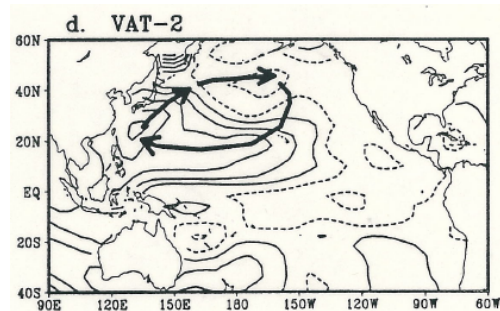
結合モデルの十年変動の例

気象研モデルの150年積分 (Yukimoto et al., 2001)

海面水温 EOF (観測値と関数)

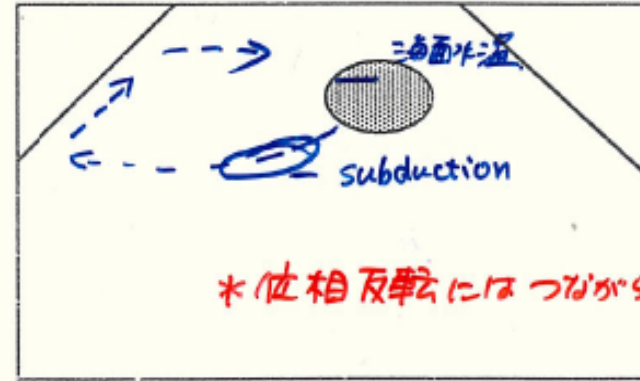
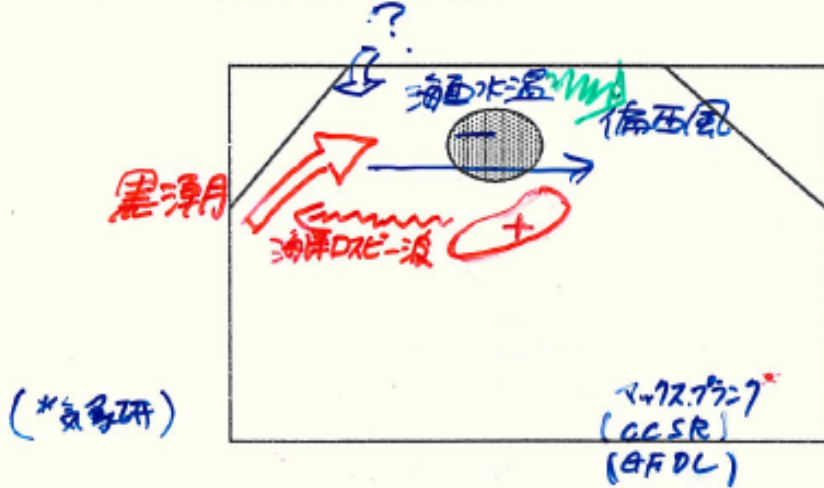


対応する
表層水温の
変化

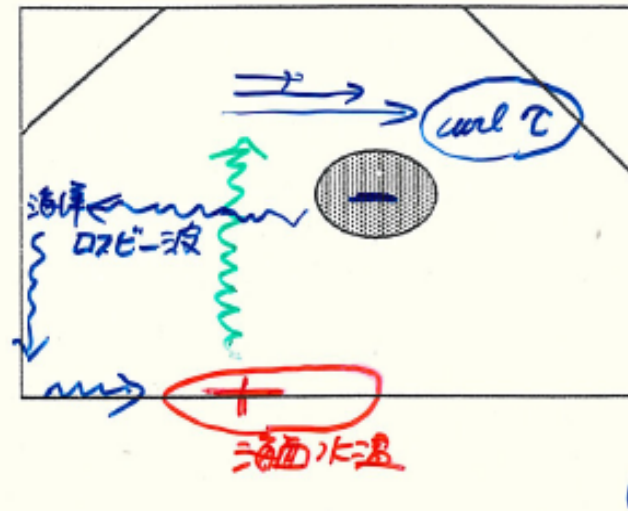
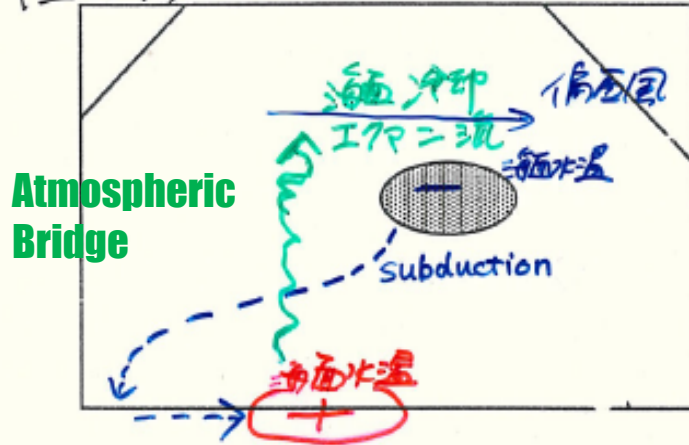


$$\frac{dT}{dt} = \alpha T - \beta(T - T_*) - cT^3$$

時計回りの回転

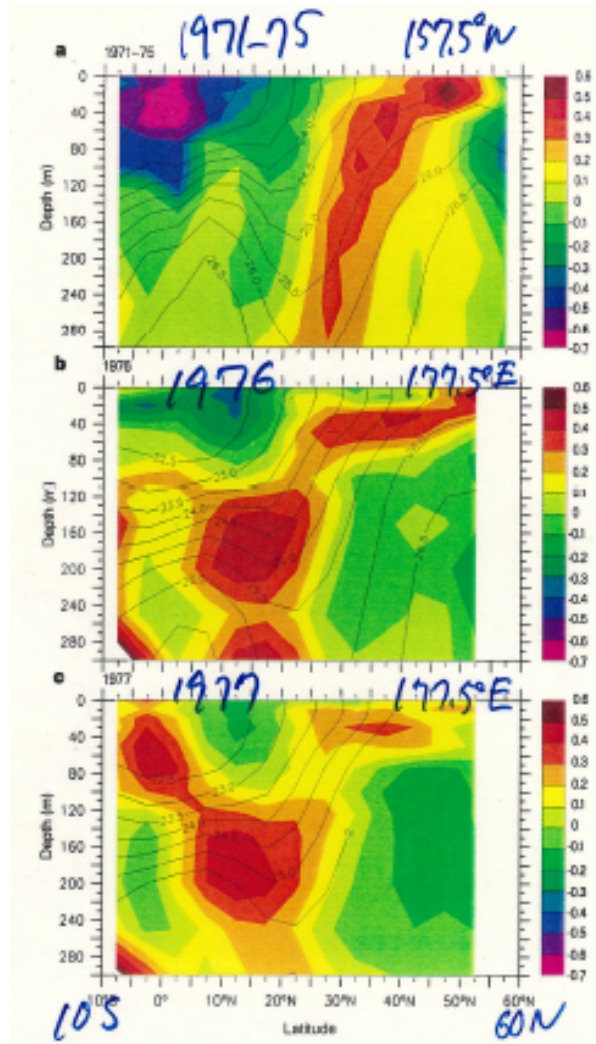
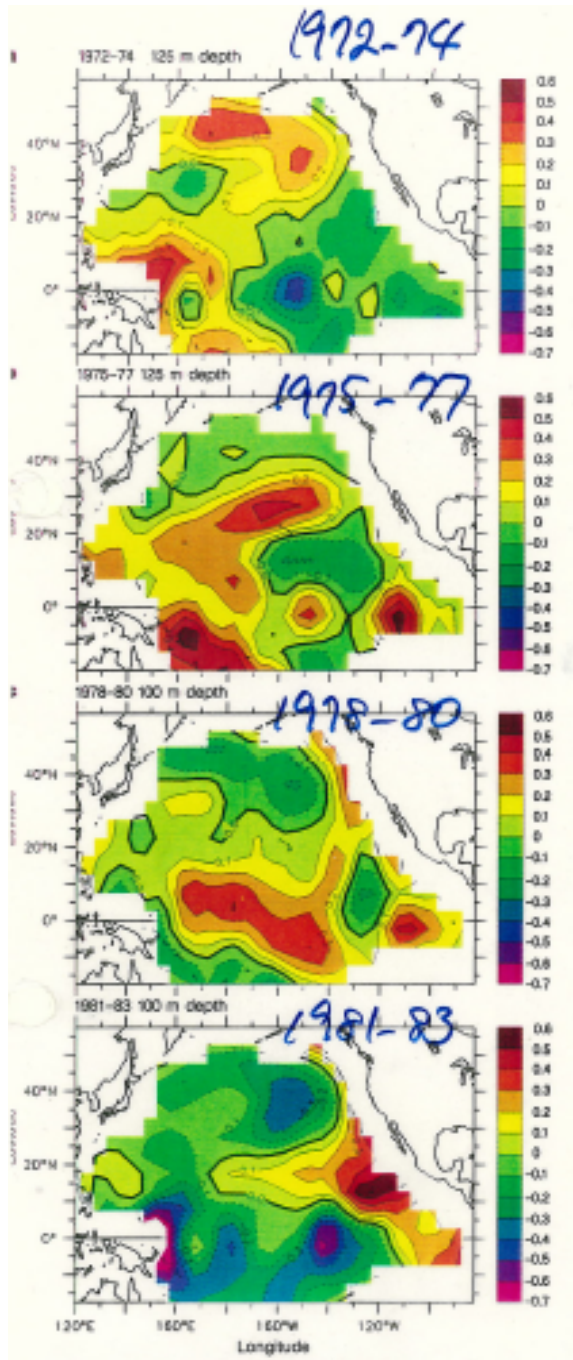


中緯度 (亜熱帯) → 赤道

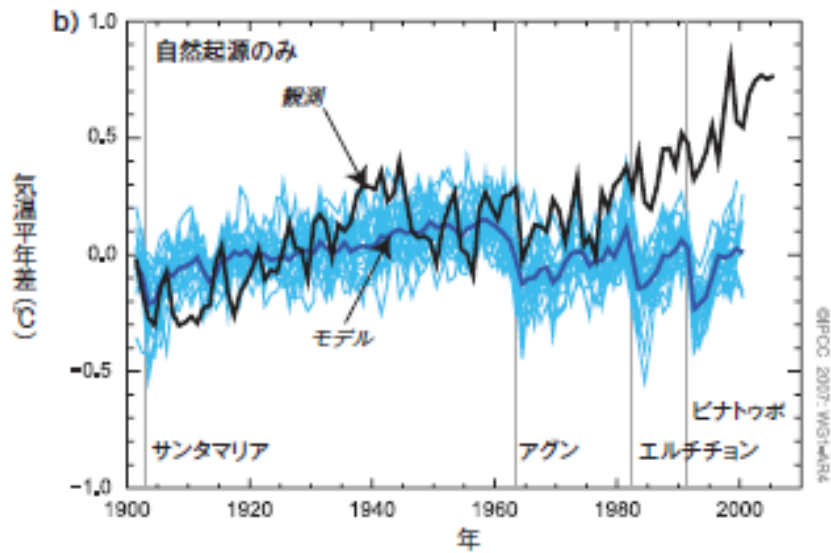
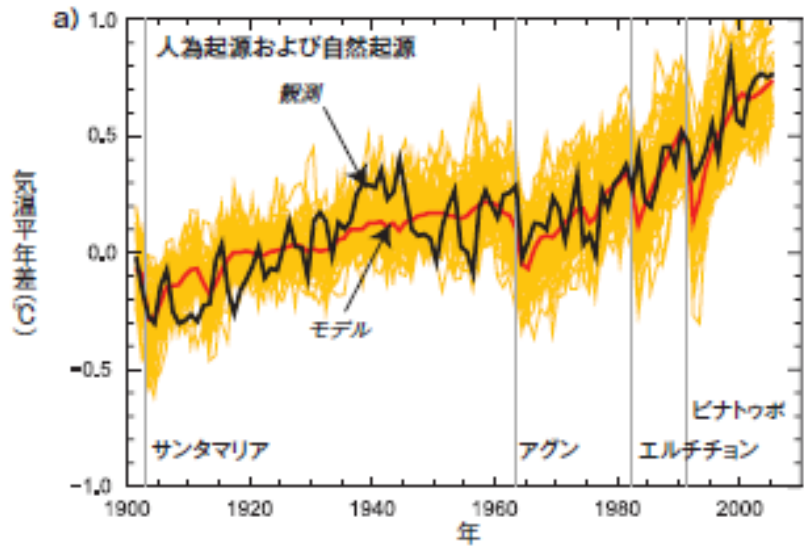


十年変動に関わる海の中の変動

76年の気候シフト前後に表層水温場に時計回りの回転モードや等密度面にそった熱帯域への潜りこみが見られるとの報告 (Zhang and Levitus, 1998, Nature)



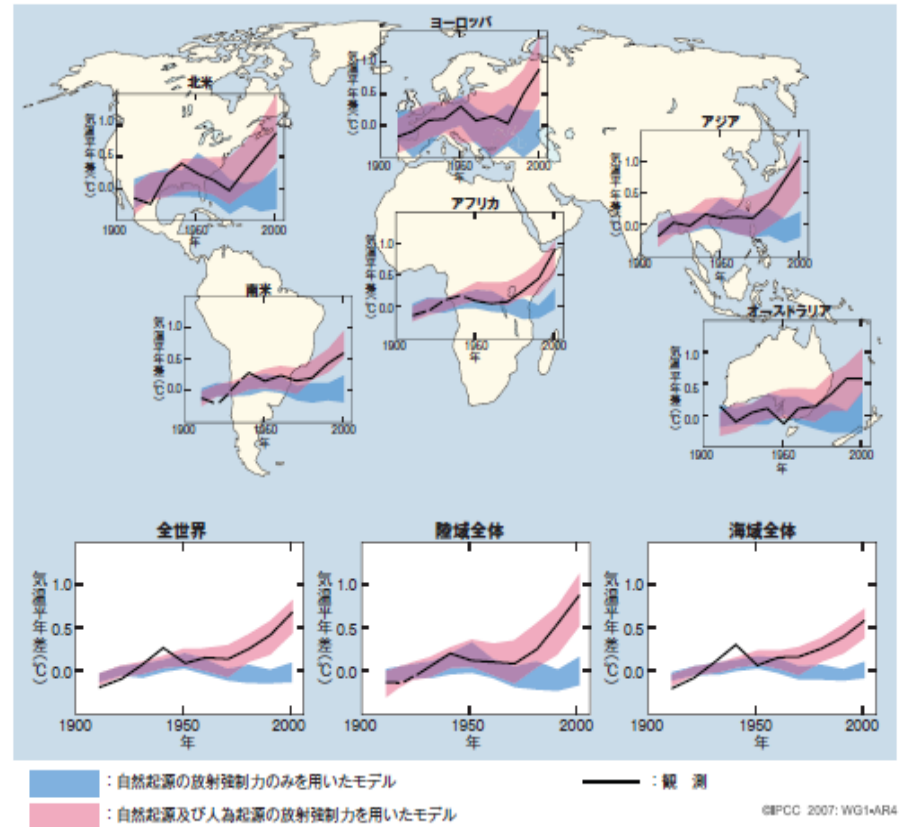
世界平均地上気温の平年差



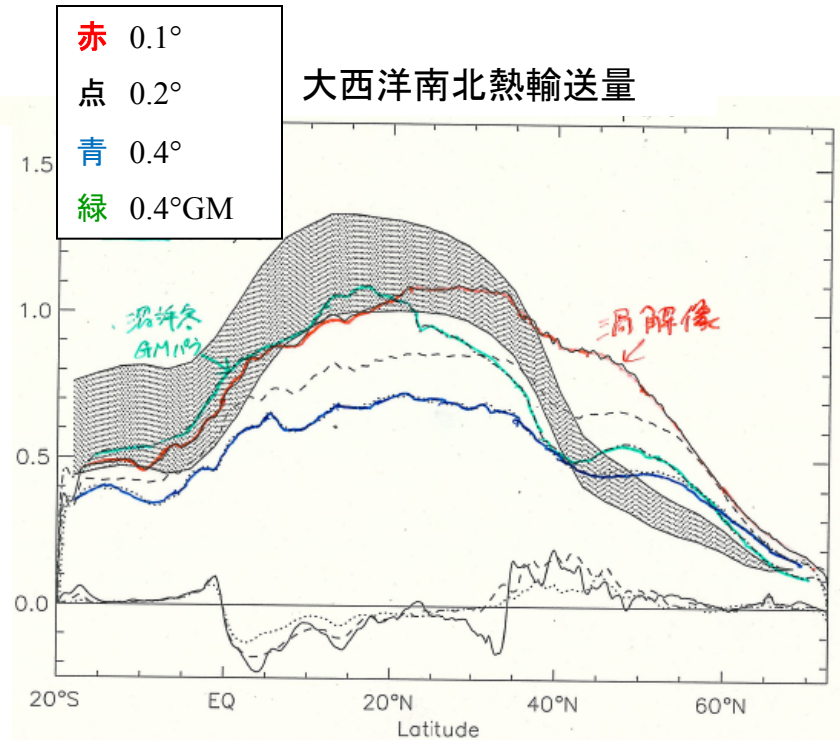
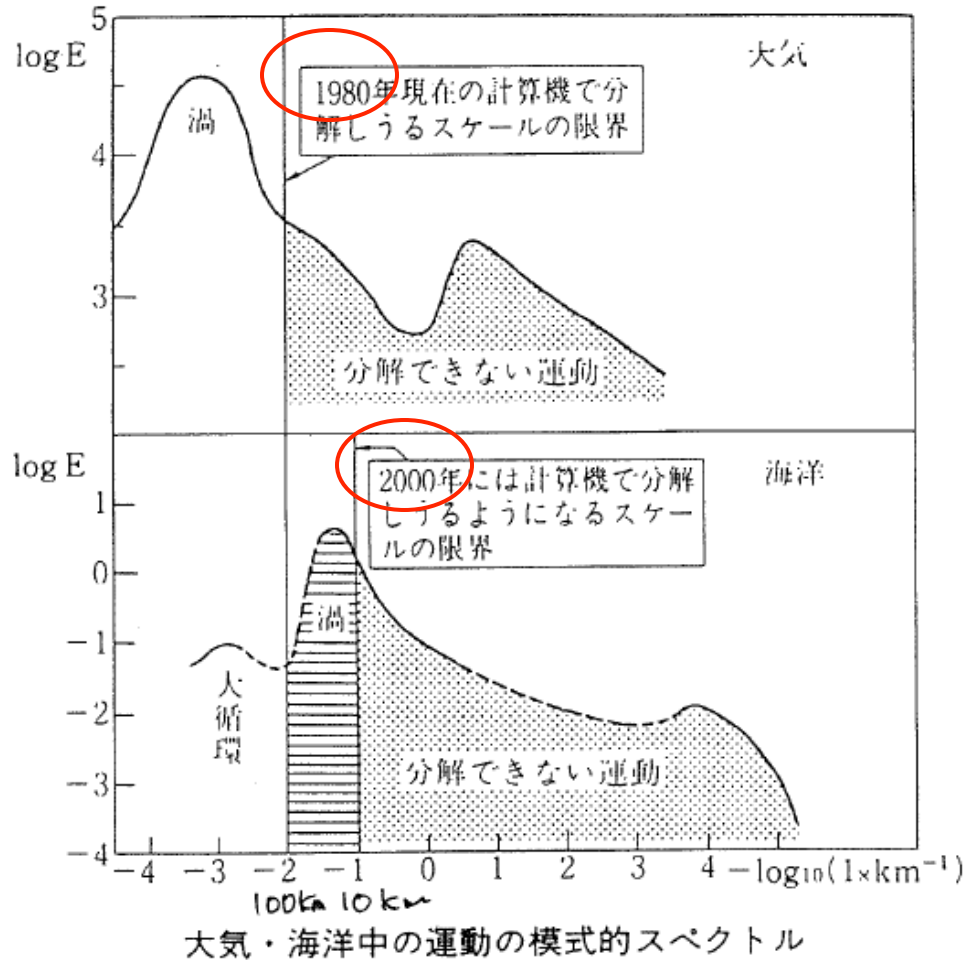
20C再現実験を踏まえた将来予測

(IPCC AR4)

世界全体及び大陸ごとの気温変化



海洋大循環モデルの解像度について



GM : Gent and McWilliams parameterization

等密度面混合のパラメタリゼーション

AR4のOGCMの解像度

南北 0.5-2° 東西1-2°程度

AR5での標準スペックは？ 渦解像モデル

渦許容モデル

補足(1)

Recharge Oscillator (Jin, 1997)

$$h = h'(x, t) + \bar{h}(y, t)$$

赤道導波帯の外側
との南北交換により
躍層のベースが変化

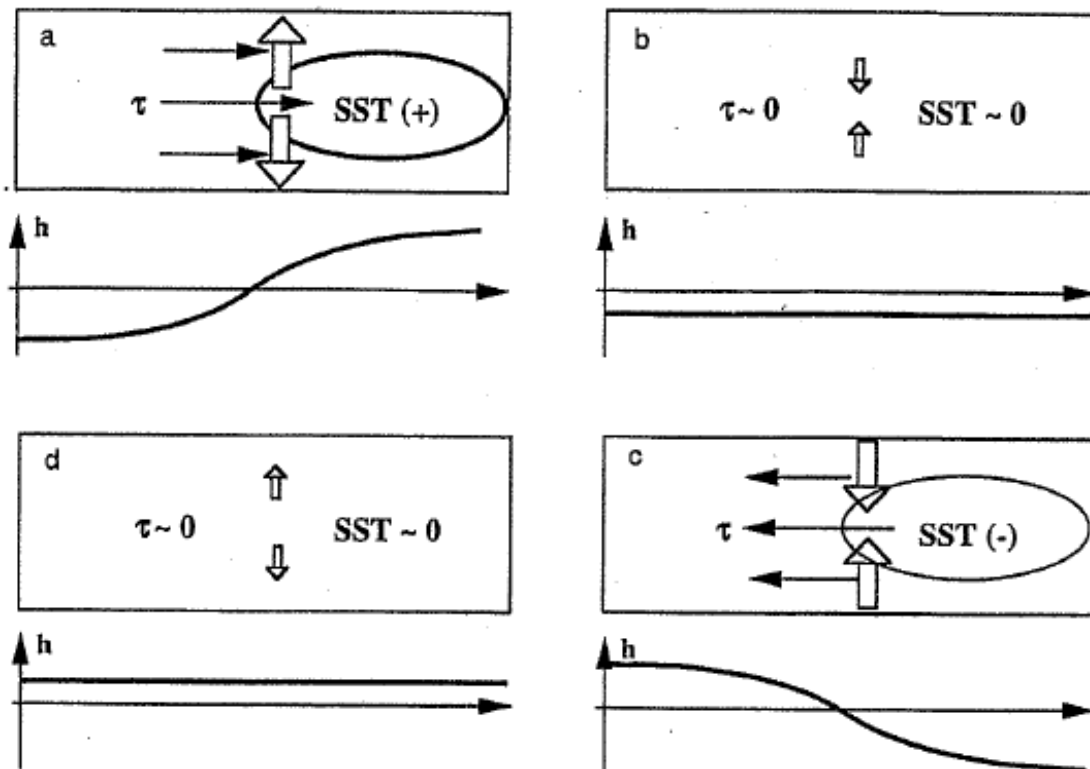
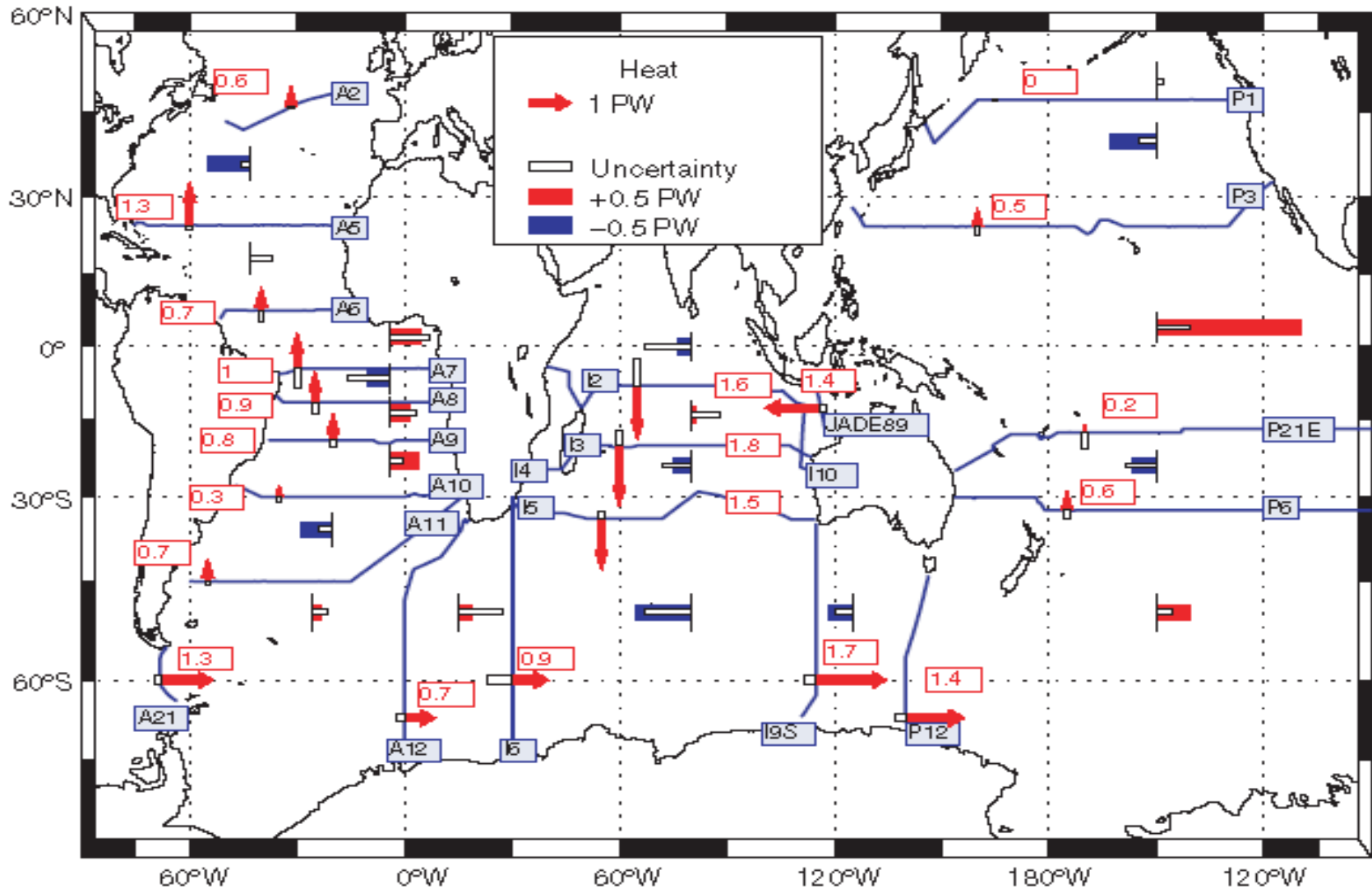


FIG. 1. Schematic panels of the four phases of the recharge oscillation: (a) the warm phase, (b) the warm to cold transition phase, (c) the cold phase, and (d) the cold to warm transition phase. The rectangular box represents the equatorial Pacific basin, the elliptical circle represents the SST anomaly, the thin and filled arrows represent wind stress anomaly associated with the SST anomaly, and the thick unfilled arrows represent the recharge/discharge of equatorial heat content. Each panel also shows the distribution of the thermocline depth anomaly (h) along the equator.

補足(2) WOCE横断観測の成果： 海洋による熱輸送量 (Ganachaud & Wunsch, 2000)



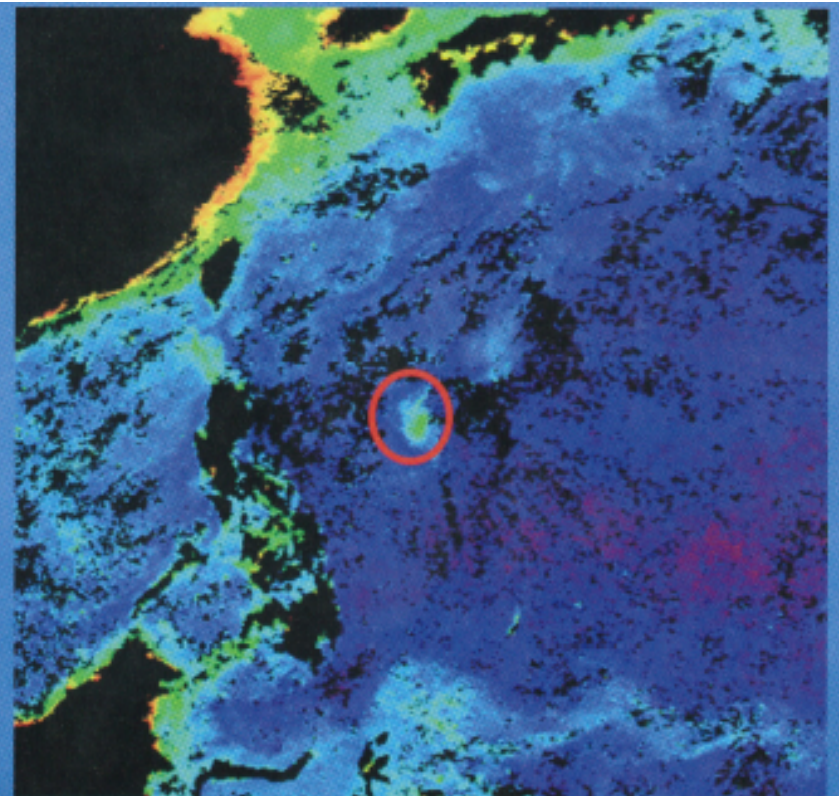
補足(3)

トピック1 台風は珪藻を育てる？

台風が通過すると、本来、窒素やリンの供給が少なく植物プランクトン生物量が低い亜熱帯海域で、植物プランクトンが増えることが、衛星観測で確認されています。物理モデルによれば、強い風によって、海水が巻き上げられたり上下に混ざったりし、海の下層にある栄養塩が表層に供給されるらしいのです。では、どんな植物プランクトンが増えているのでしょうか。船舶による観測でこれを確かめるのは非常に難しいのです。そこで我々は、海水が巻き上げられたり上下に混ざったりを再現する培養実験を設計し、台風の多く通過する海域・季節で実験を行いました。その結果、亜熱帯の海洋表層では、ほとんど生息していない、大型の植物プランクトンである珪藻が増殖することを突き止めました。珪藻は大型動物プランクトンに直接食べられたり、沈む速度が大きかったりするため、海域の食物網構造や物質循環を大きく変える可能性があります。(津田 敦)

東京大学大気海洋研究所

Ocean Breeze、2011秋号

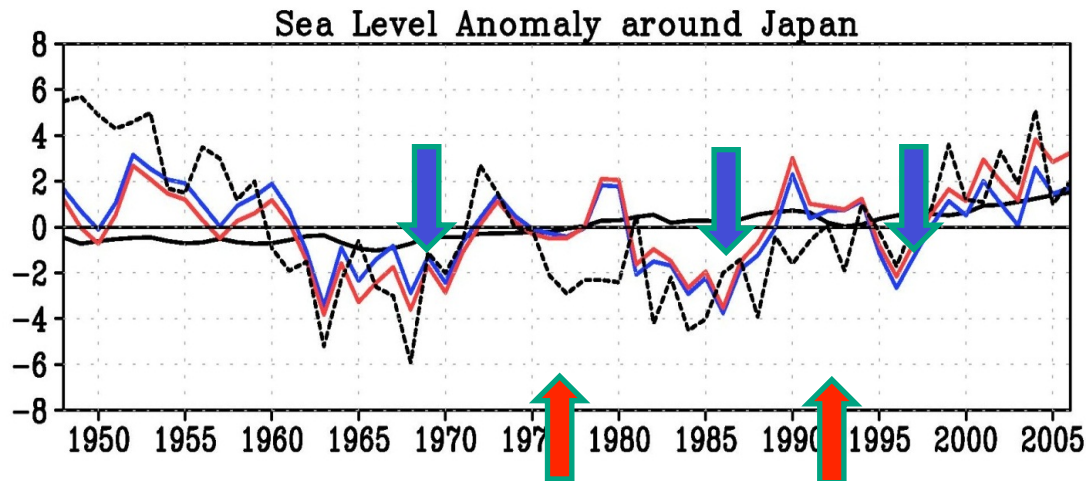


2003年台風17号によるクロロフィル(葉緑素:植物プランクトン生物量の指標)濃度の上昇

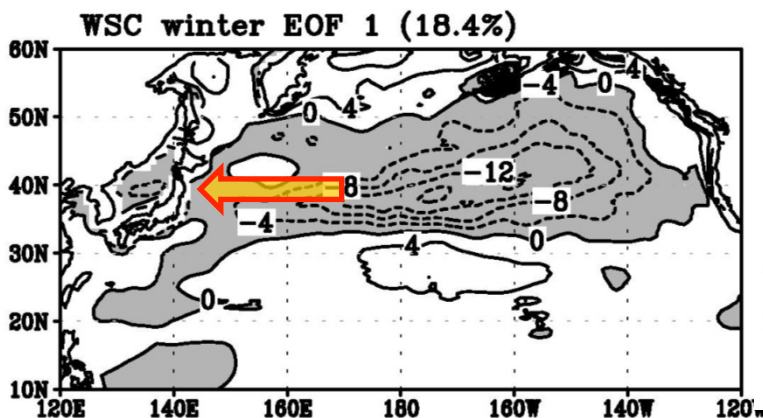
SeaWiFS 8 days composite 2003年10月24-31日

補足(4)

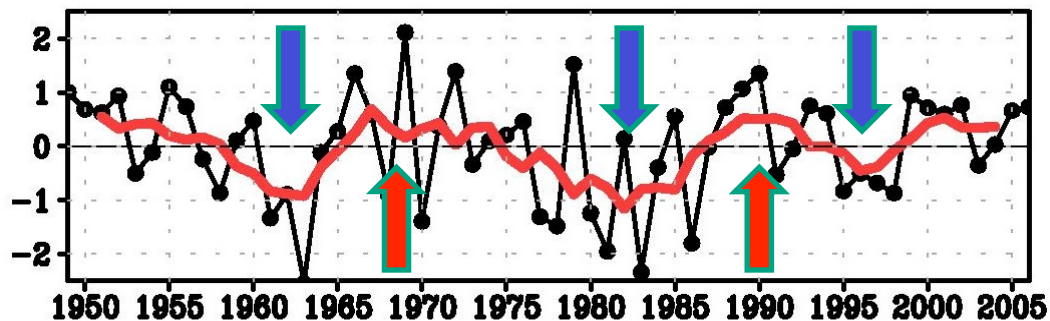
海洋大循環モデルで再現された日本周辺海面高度変動 (安田)



観測日本沿岸平均水位(点線)
 日本周辺モデル海面高度
 (128-146E, 30-46N平均)
 日本周辺モデル海面高度
 (全球海洋熱膨張成分を除く)
 全球海洋熱膨張成分(実線)



冬季風応力curl EOF第1モード



Yasuda and Sakurai (2006)

日本沿岸水位変動: 風応力curl変動に対する力学的応答(数年のラグ)

授業概要

前半は、海洋の具体的な循環構造とその力学を海洋観測の技術革新とともに説明する。

後半は、エルニーニョ予測や温暖化予測の進展を、特に大気と海洋の相互作用に焦点を当てて紹介する。

0. Overview

1. 海洋の構造

2. 海洋観測

3. 風成循環と熱塩循環

4. 波動と応答

5. エルニーニョと南方振動

6. 地球温暖化

海洋の炭素循環

参考書:

Ocean Circulation : The Open University, PERGAMON PRESS *OC

El Nino, La Nina, and the Southern Oscillation : S. G. H. Philander, Academic Press

IPCC 第4次報告書(第1作業部会) : http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html

地球温暖化と海 : 野崎義行 東京大学出版会

大気・海洋の相互作用 鳥羽良明編 東京大学出版会 (追加)