

地球及び惑星大気科学特論 I

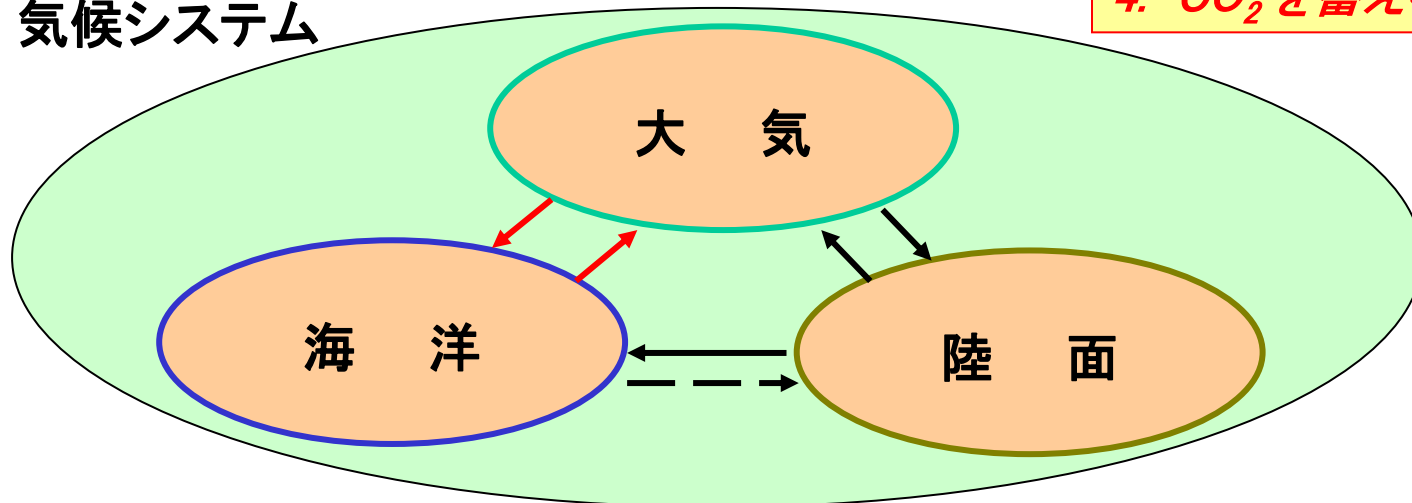
気候における海洋の役割

北村 佳照

神戸海洋気象台

1. 熱を蓄える
2. 熱を運ぶ
3. 時間を決める
4. CO_2 を蓄える

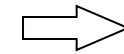
気候システム



	密度 (g/cm ³)	比熱 (J/g/K)	体積	
			高さ (km)	面積比
大 気	0.001	1	8	1
海 洋	1	4	4	0.7

熱容量 大気：海洋 ~ 1 : 1400

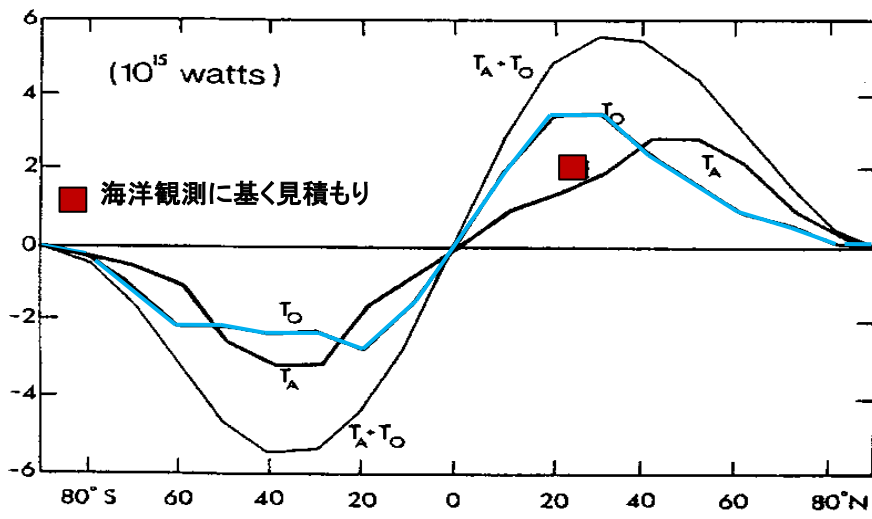
大気全体を1度上昇させる熱量



僅か3m深までの海洋が
1度昇温するのみ

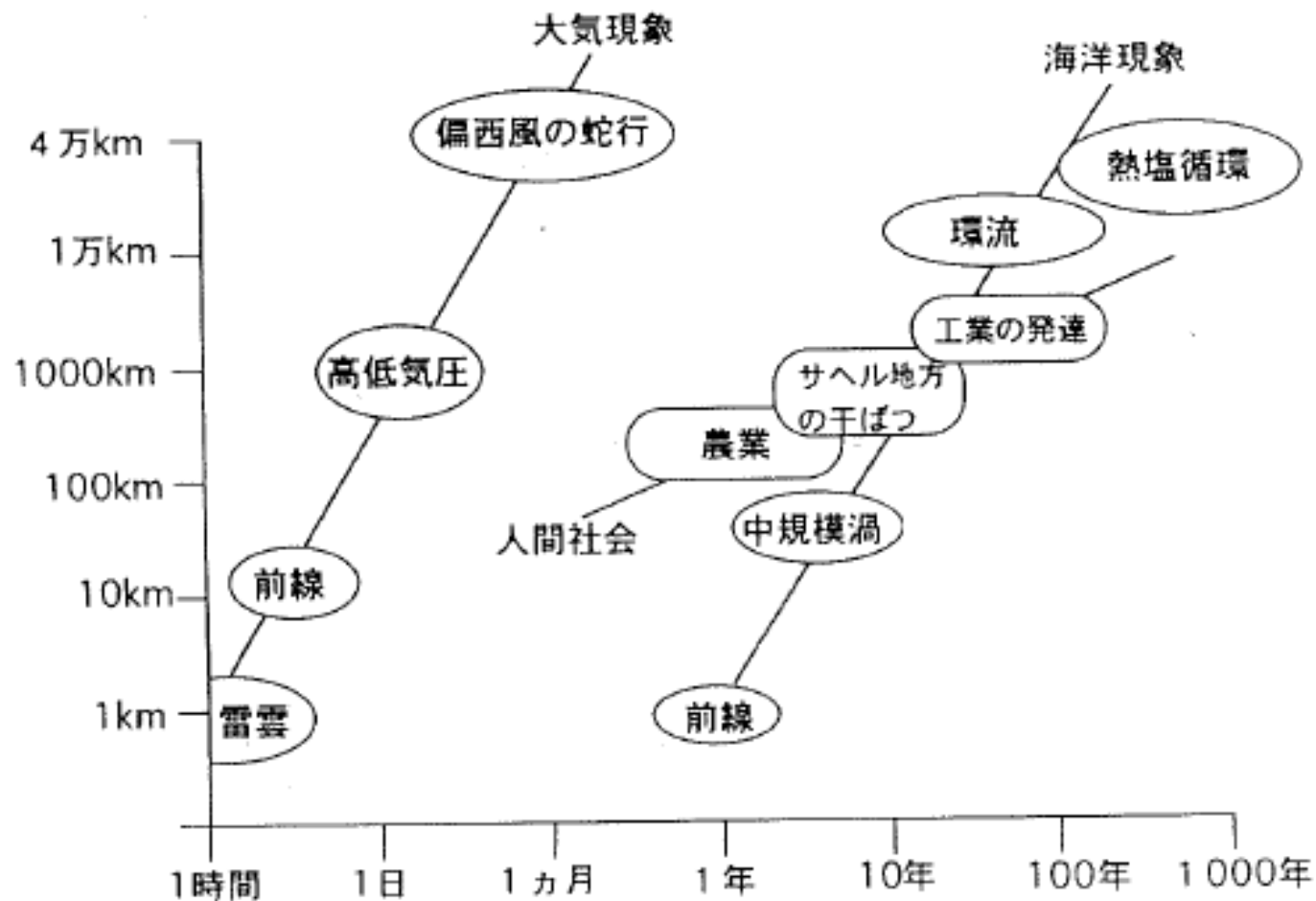
気候全体の変化を穏やかにするセンス

南北方向の熱輸送量 大気 (T_A)、海洋 (T_O)



海洋は大気とほぼ同量の熱を運んでいる

現象の時空間スケールの比較



(木村龍治氏による)

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

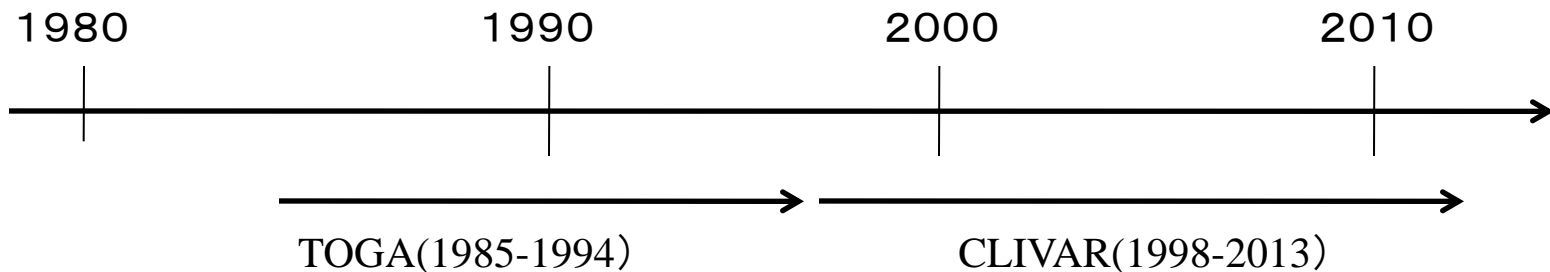
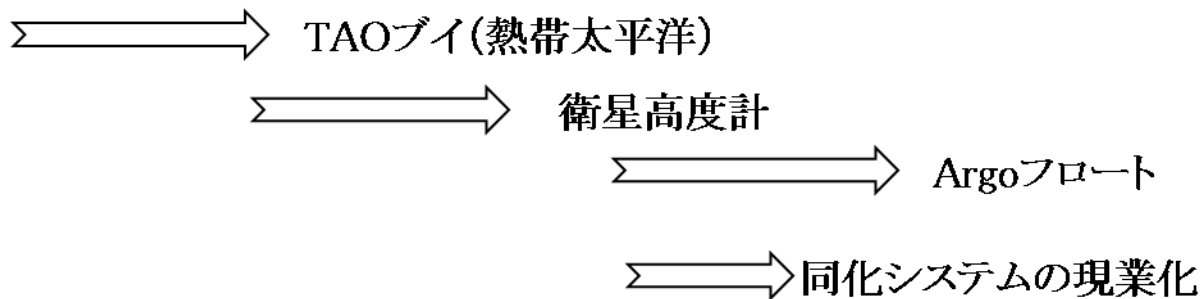
El Nino, La Nina, and the Southern Oscillation : S. G. H. Philander, Academic Press

IPCC 第4次報告書(第1作業部会) :

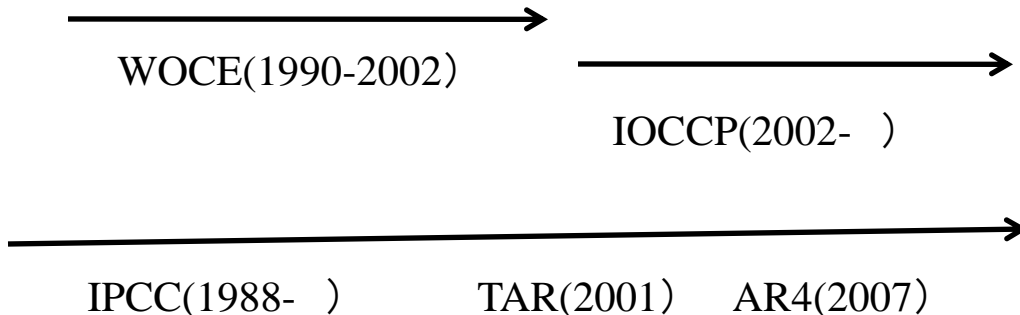
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html

地球温暖化と海 : 野崎義行 東京大学出版会

自己紹介 専攻 海洋物理学・気候モデリング

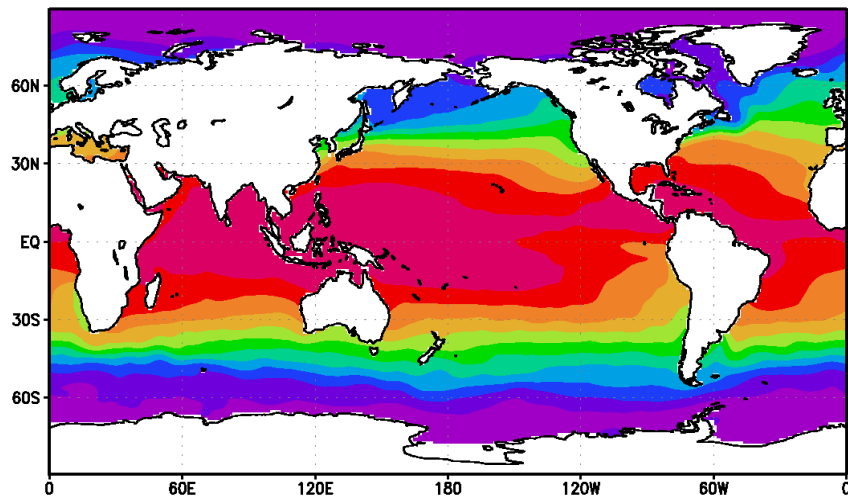


国際プログラム



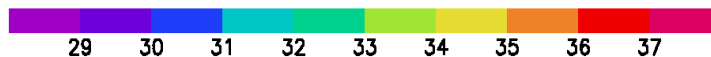
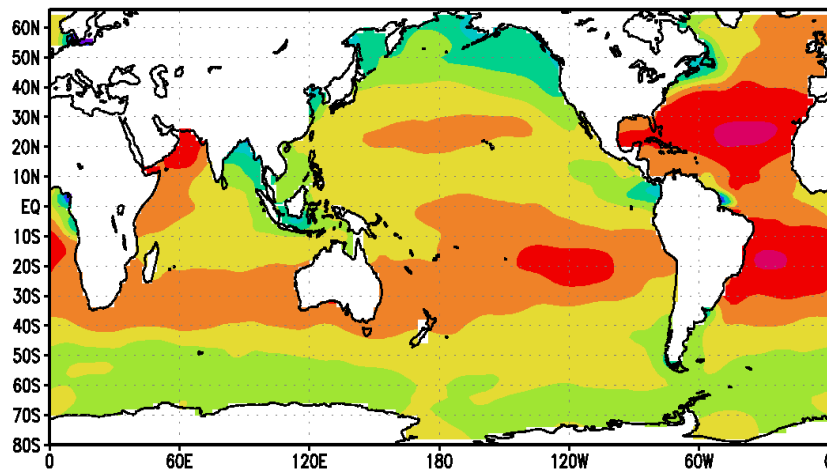
水 温

ann.mean SST

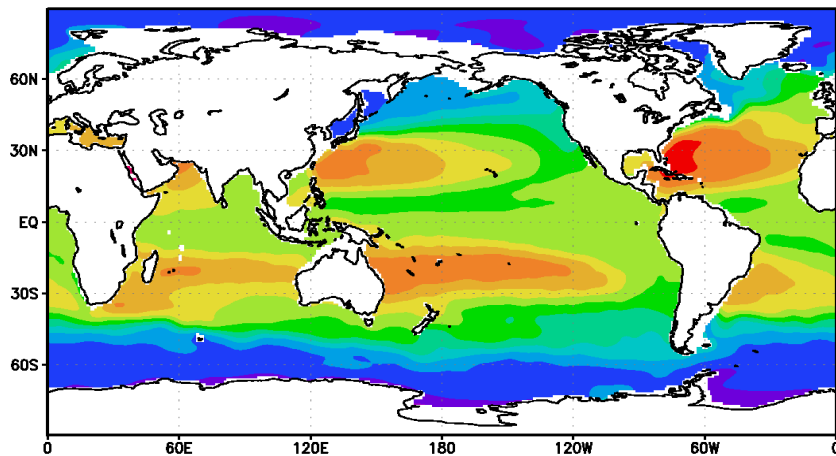


塩 分

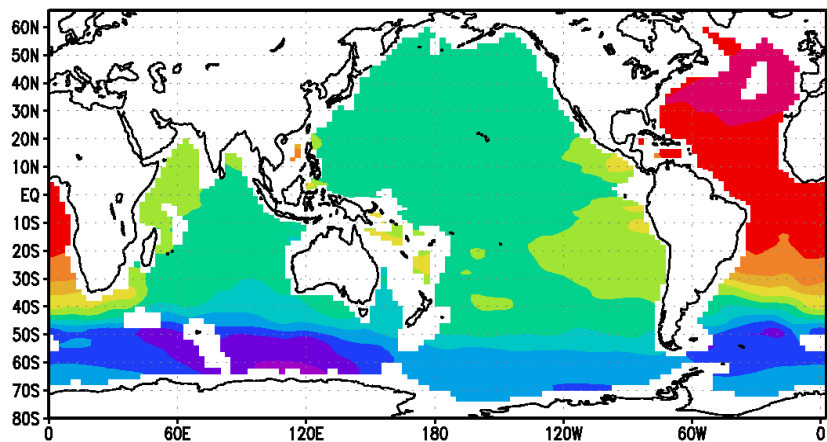
ann.mean S(0m)



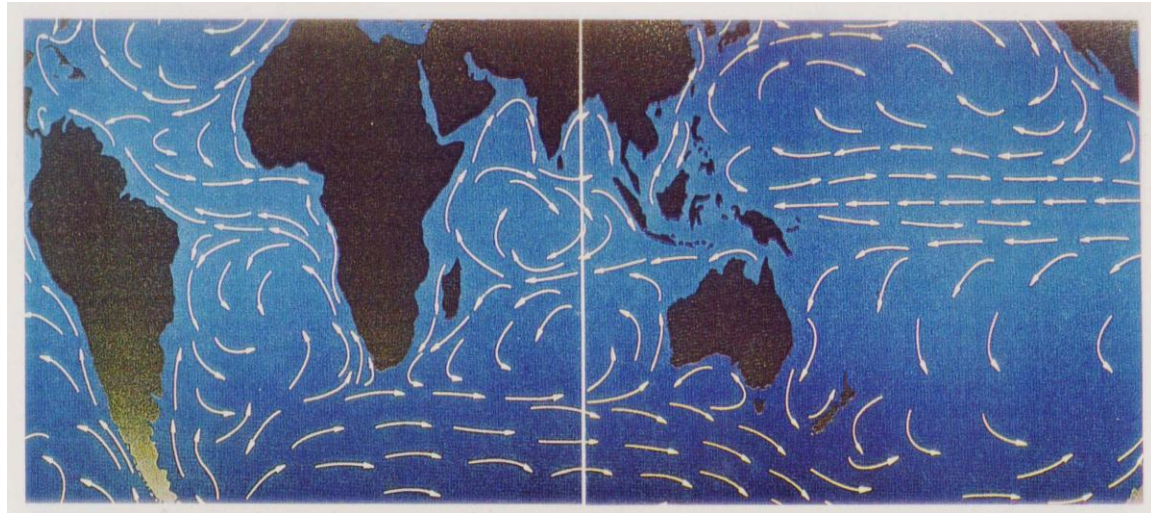
ann.mean T(300m)



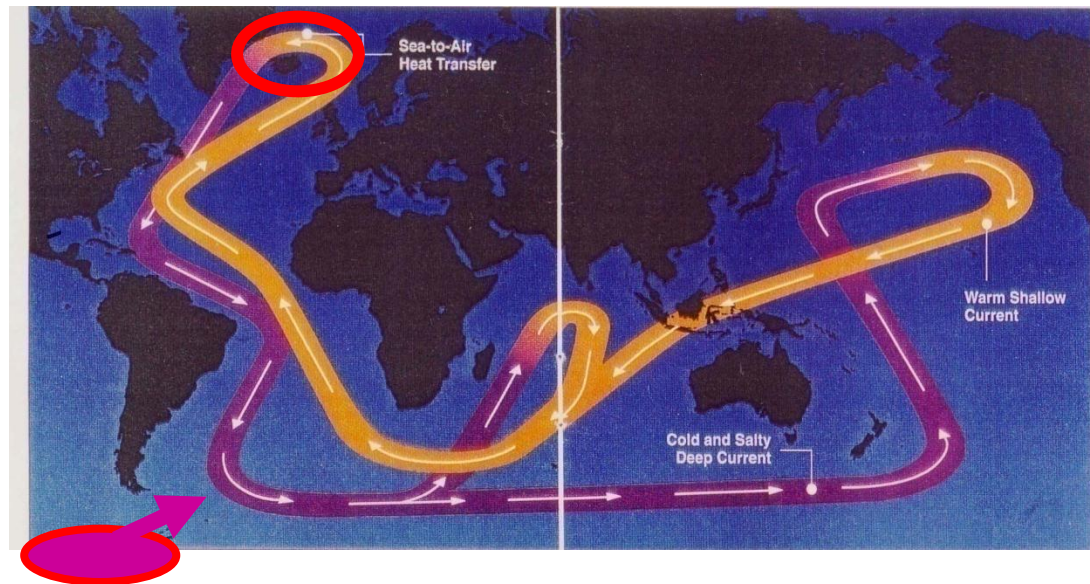
ann.mean T(3000m)



風成循環



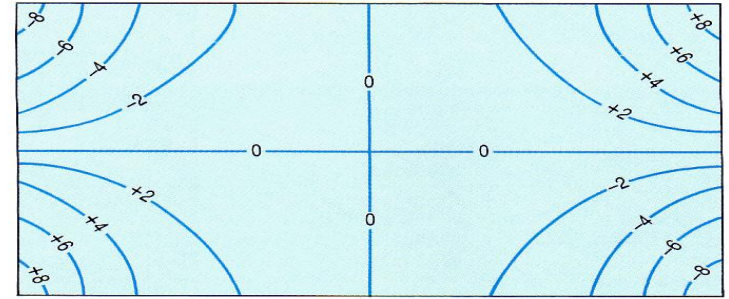
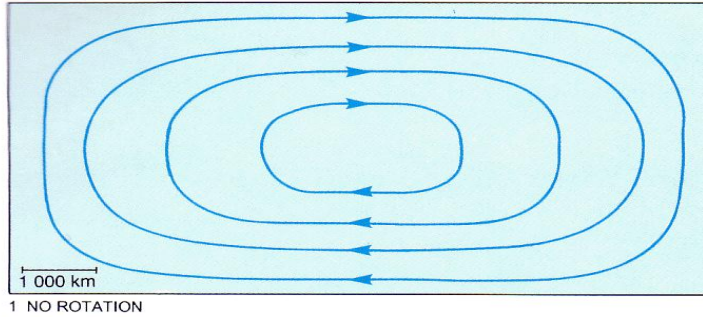
熱塩循環



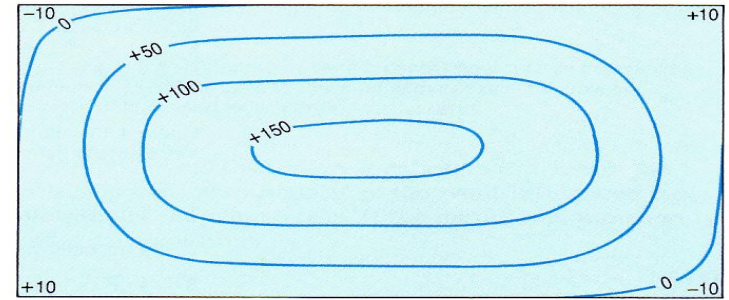
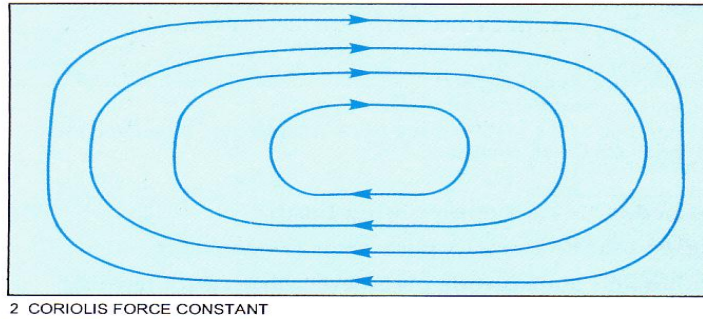
流線関数 (流れ)

圧力 (海面高度)

$f=0$
(no rotation)

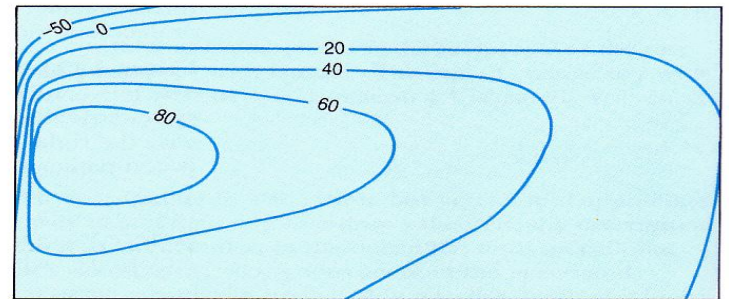
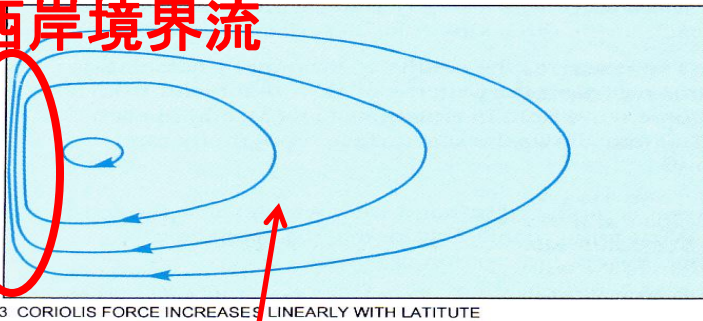
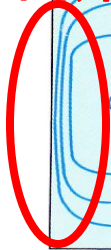


$f = \text{const.}$



$f = f_0 + \beta y$
(緯度の関数)

西岸境界流



Sverdrup balance

$$\beta v = \text{curl}(\tau)$$

Stommel(1958)の回転水槽実験

渦度バランスに基づき、極向き流を説明

$$\beta v = f \frac{w}{H}$$

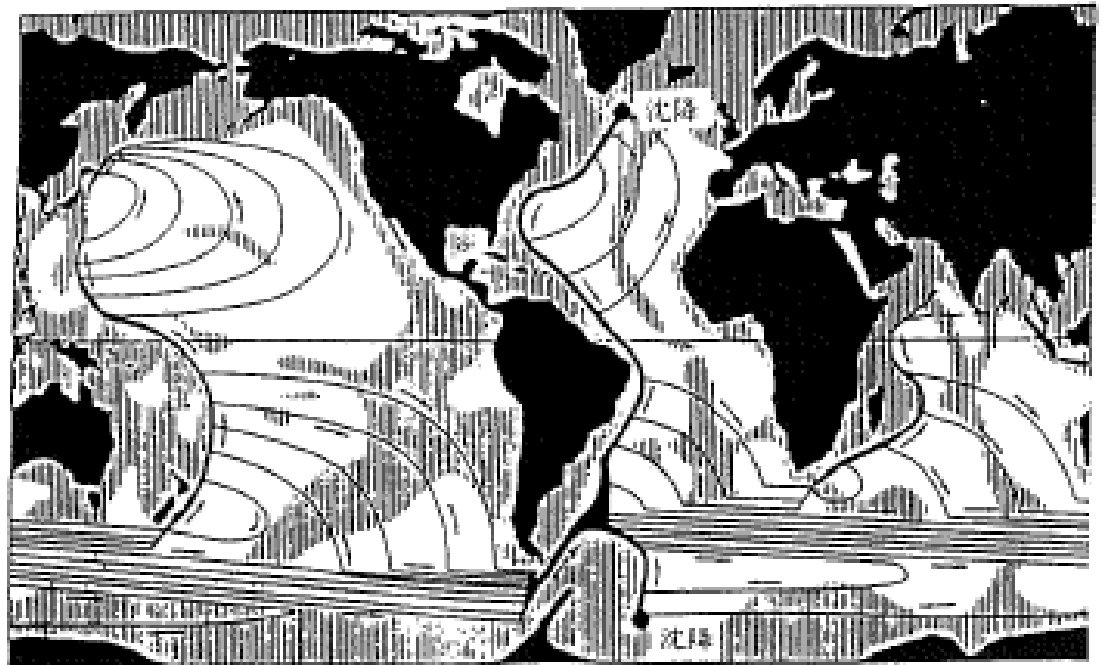
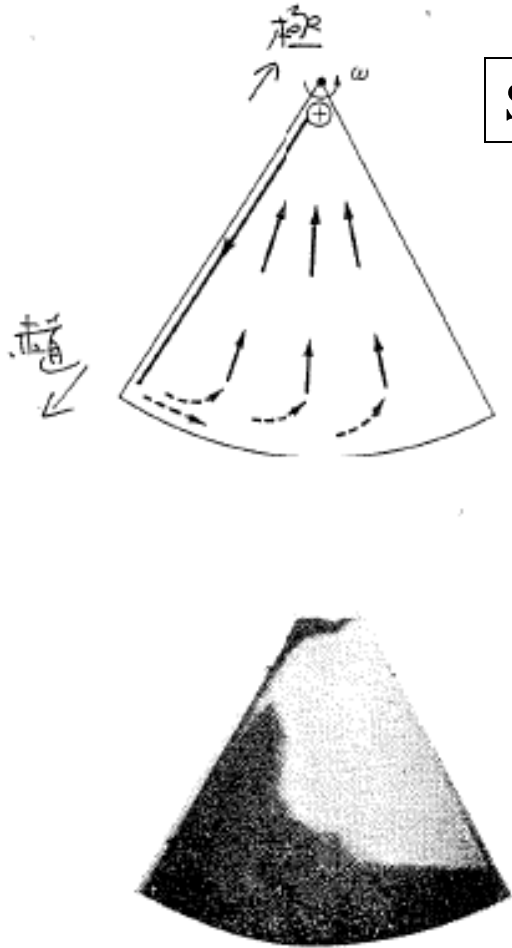
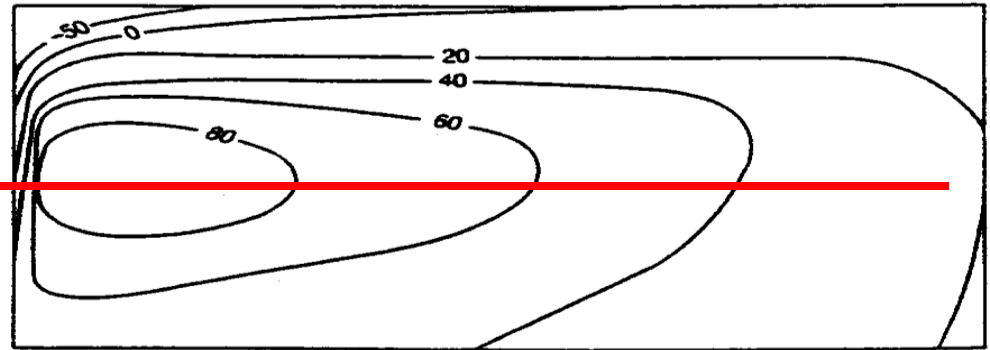


図 6-7 全球規模の深層循環の概念図 (Stommel, 1958)

力学応答

H 躍層深度(上層厚)



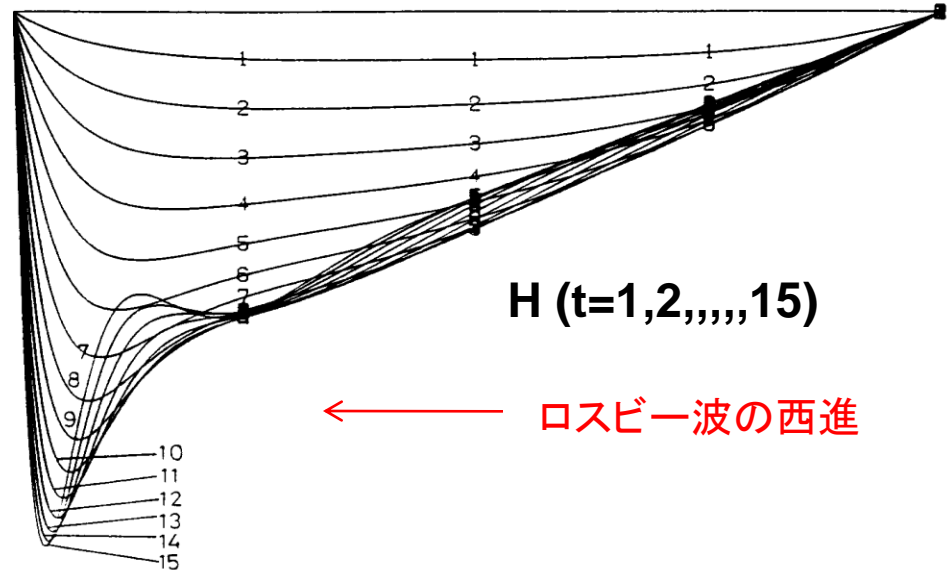
駆動力 (風応力、浮力)の変化

波動の伝播

中緯度 ~10年

赤道域 2~3年

新たな圧力分布の形成



H (t=1,2,,,,,15)

← ロスビー波の西進

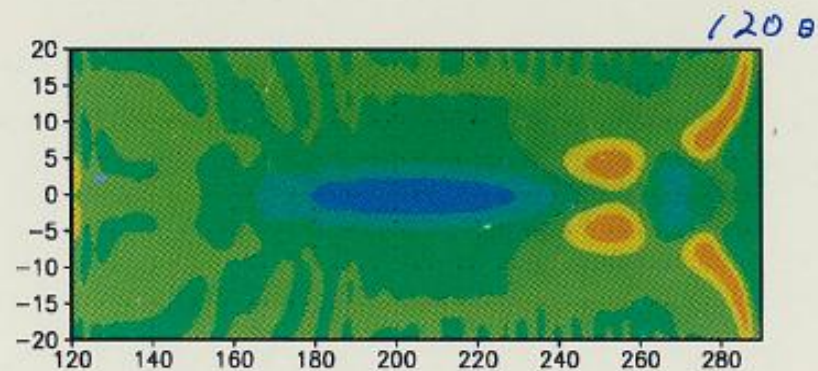
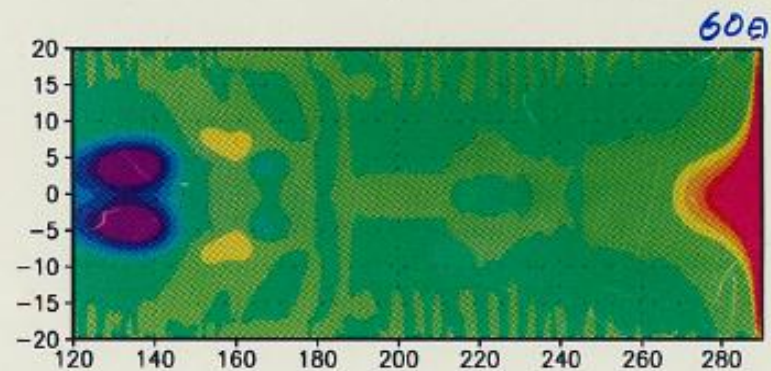
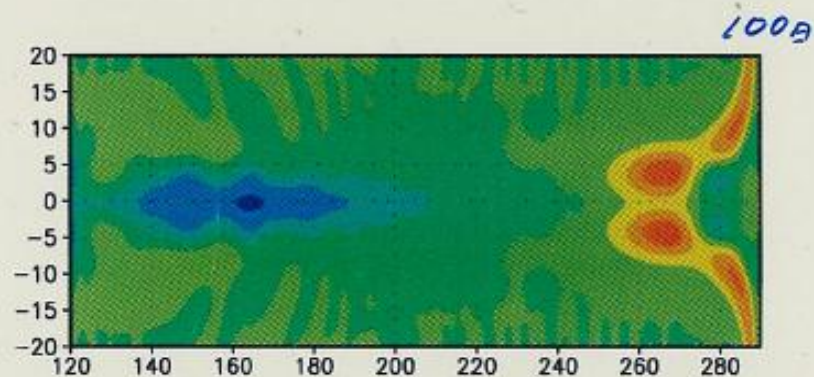
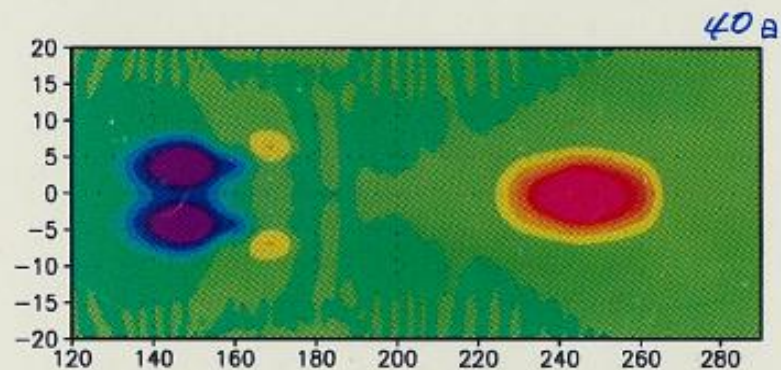
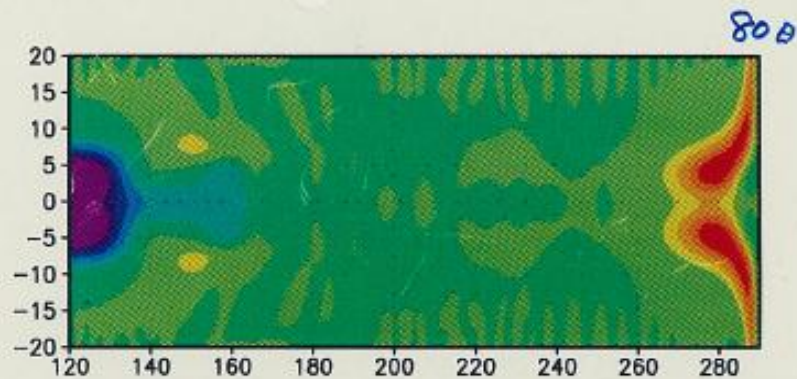
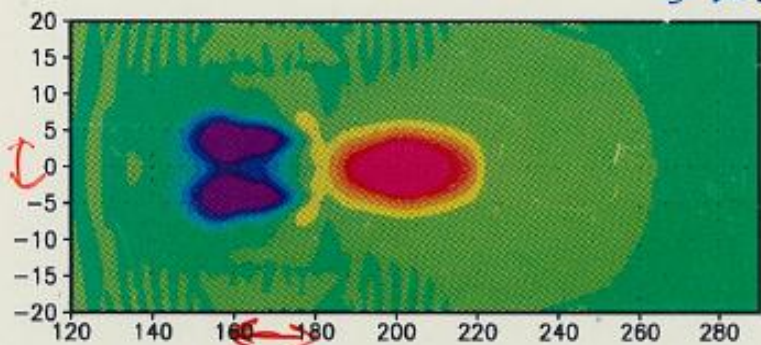
SST の変化

大気応答

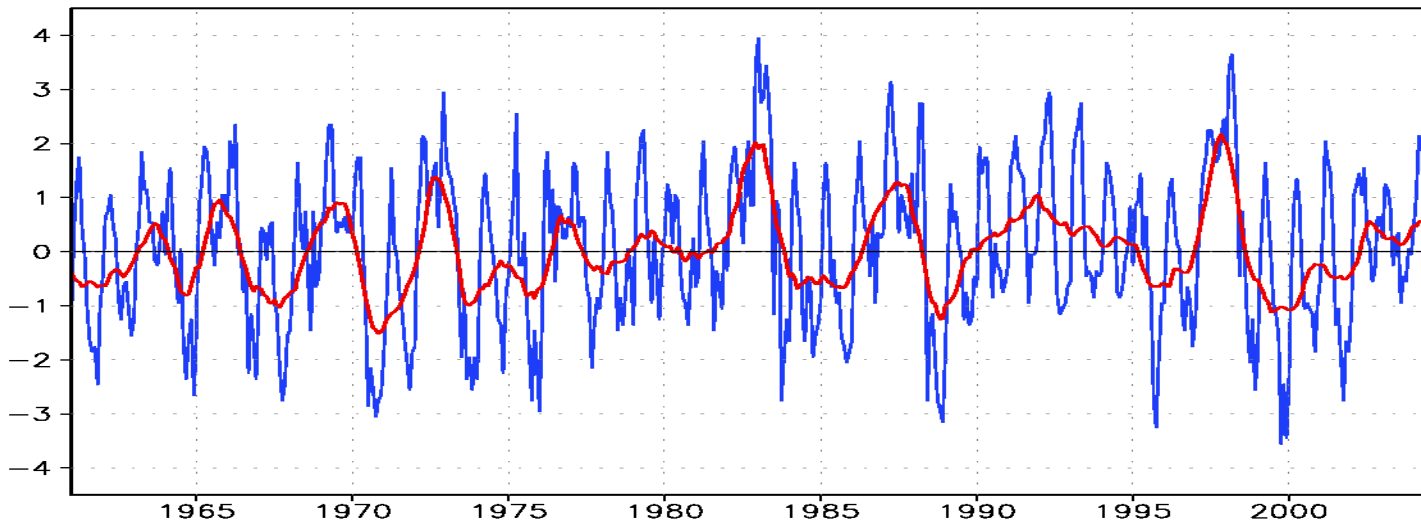
正・負のフィードバック

熱帯海洋の応答の様子 (赤道ケルビン波・赤道ロスビー波)

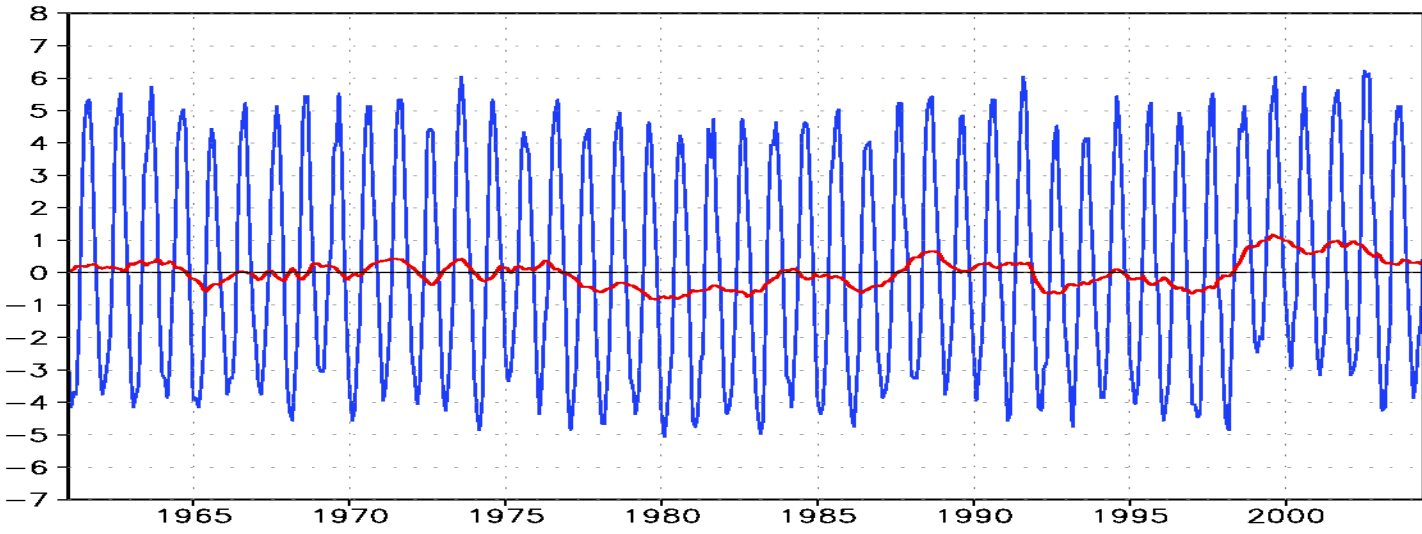
τ_x
($t=0 \sim 20$ 日) $\tau = 20$ 日



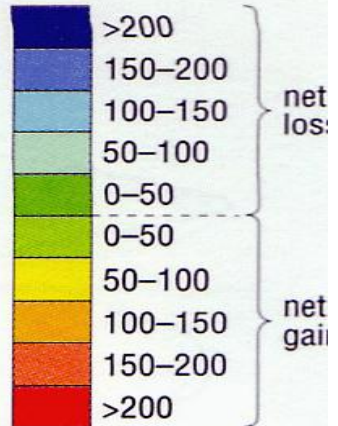
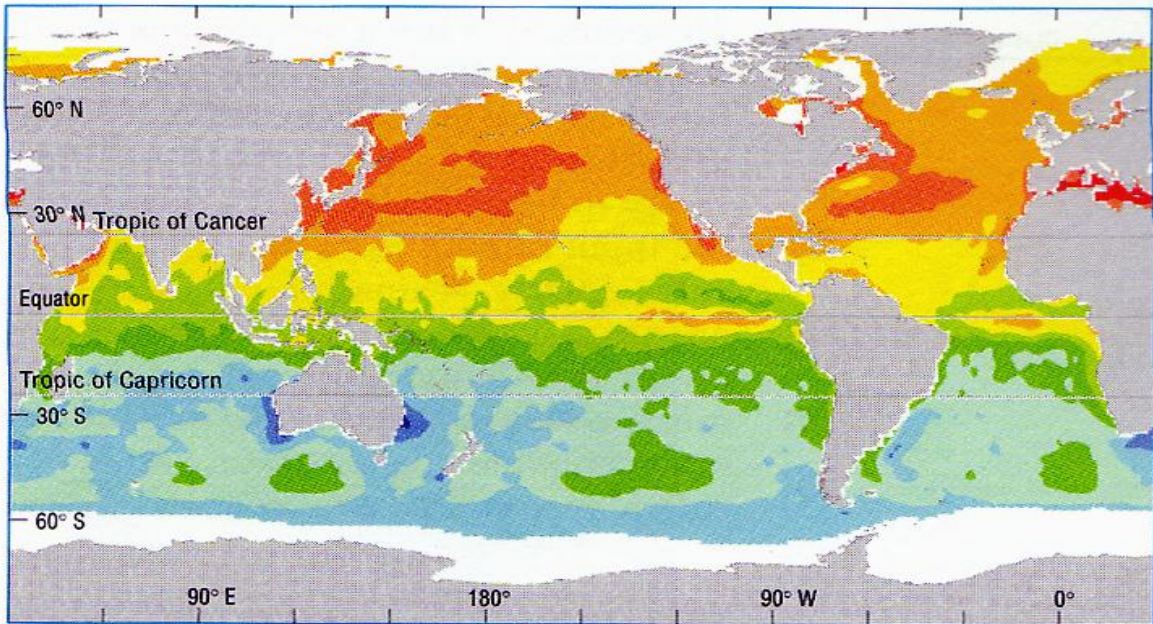
SST 120E EQ.



SST 180E 30N



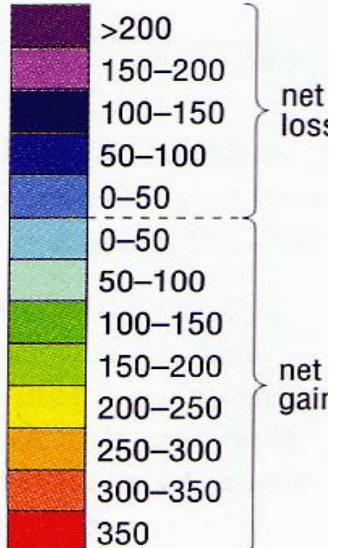
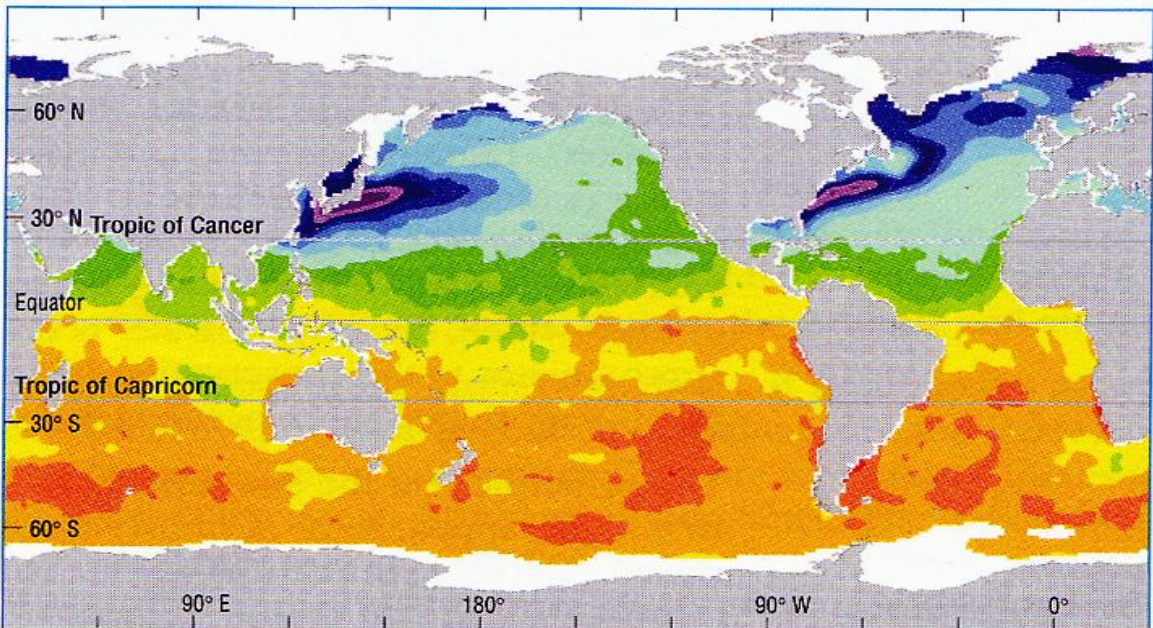
7月



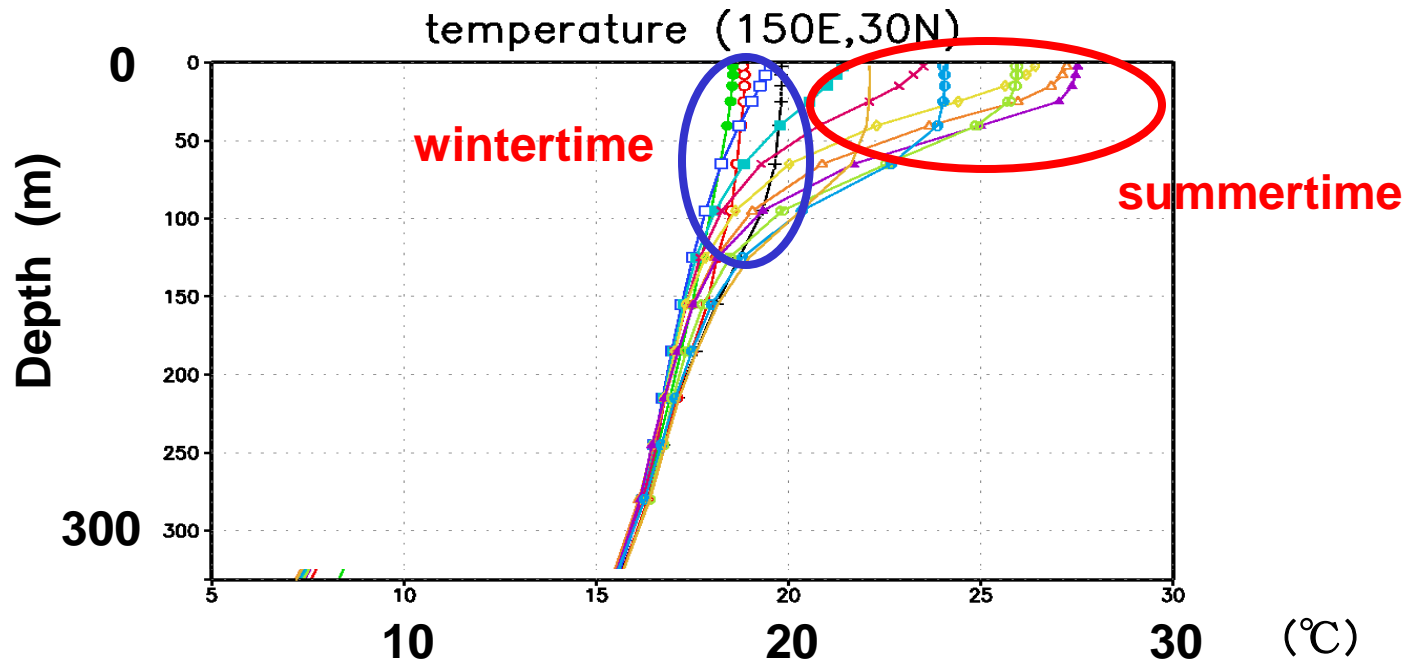
(a)

熱フラックス
w/m²
正:A→O

1月



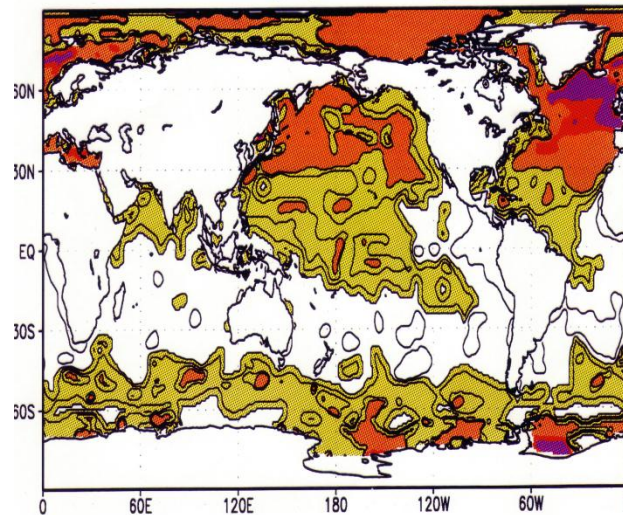
(b)



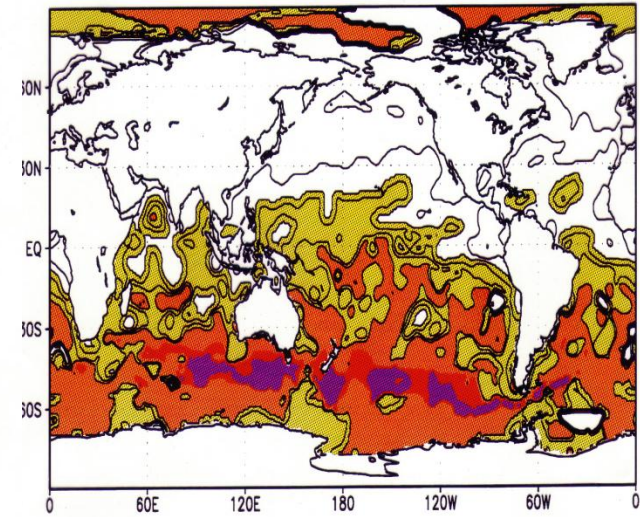
Mixed Layer Depth (m)

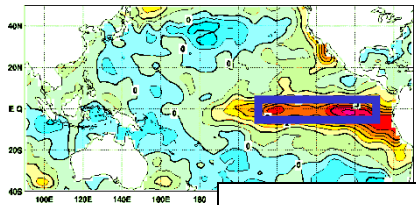


MLD(m) February



MLD(M) August

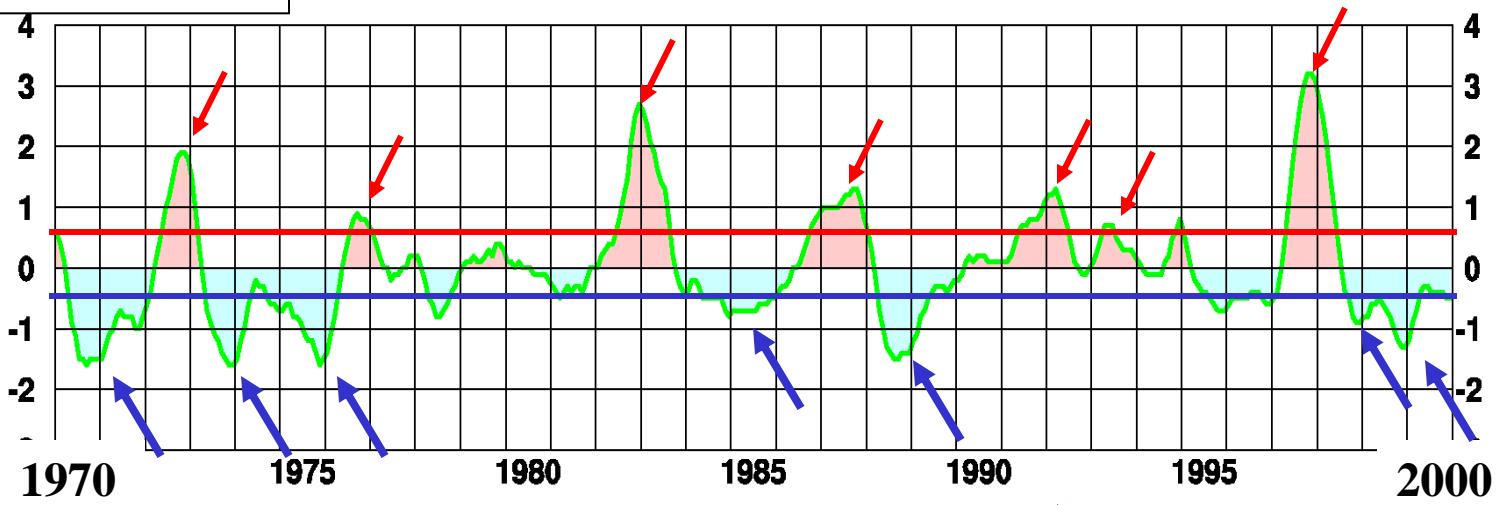




Niño 3 SST

↙ : El Niño

海洋

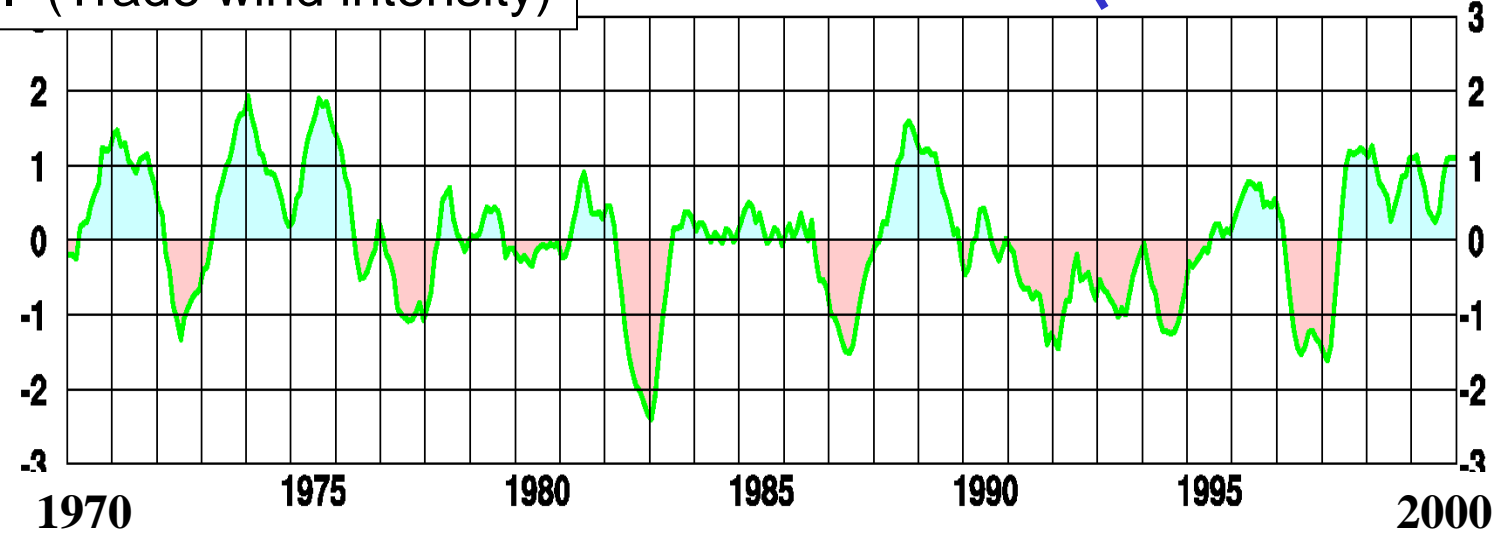


SOI (Trade wind intensity)

↖ : La Niña

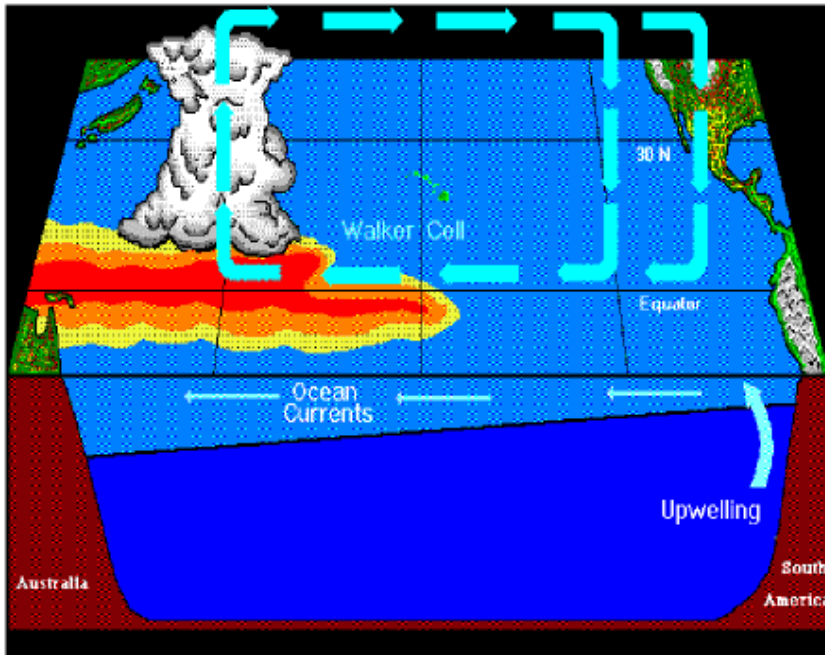
タヒチーダーウィン

大気

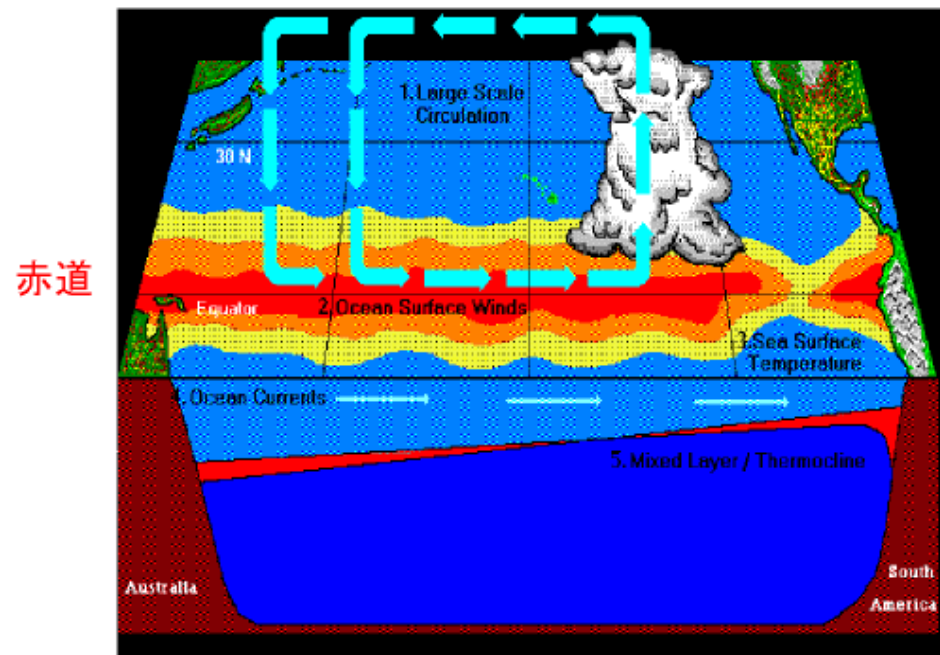


エルニーニョ時の正のフィードバック

Normal :



El Niño



Weakening of Easterly

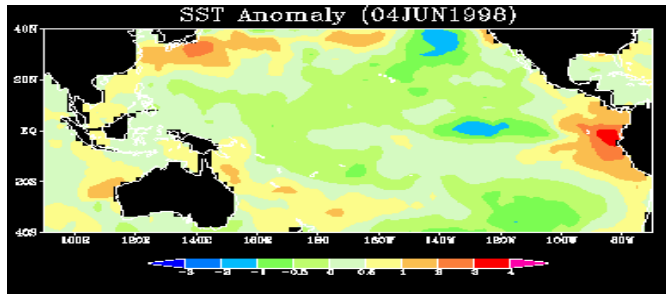
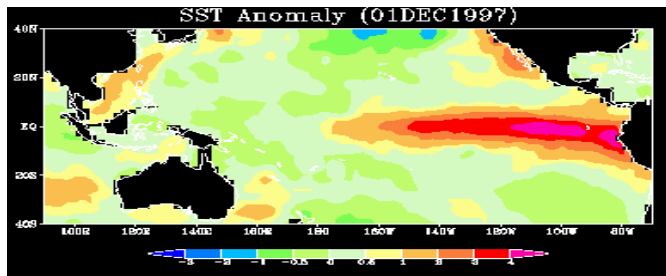
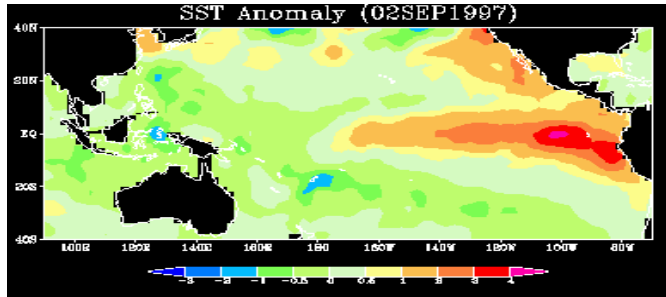
(NOAA HP)

Eastward expansion of warm water

Eastward shift of active convection

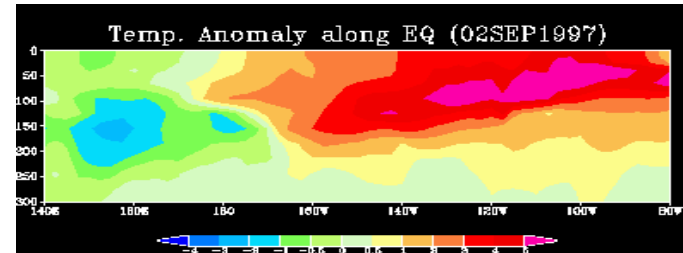
Nino 3 SST increase

SST anomaly

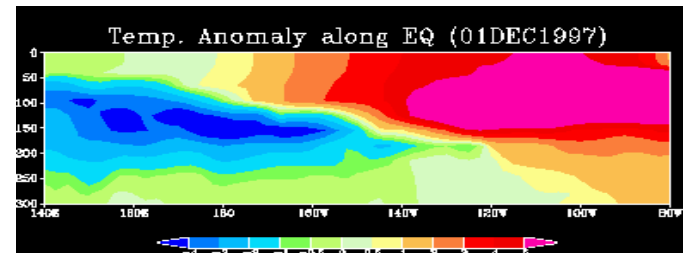


T anomaly (0-300m) along Eq.

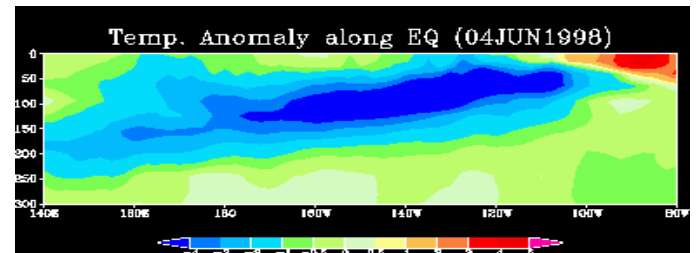
1997
SEP



1997
DEC



1998
JUN



海洋内部で位相反転の変化が先行 → 遅延振動子 Delayed oscillator (Battisti and Hirst, 1989)
再充填振動子 Recharge oscillator (Jin, 1997)

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

平成 23 年 11 月 10 日
気象庁 地球環境・海洋部

エルニーニョ監視速報 (No. 230)

2011 年 10 月の実況と 2011 年 11 月～2012 年 5 月の見通し

- ラニーニャ現象が発生しているとみられる。
- このラニーニャ現象は、冬から春までの間に終息する可能性が高い。

【解説】

エルニーニョ/ラニーニャ現象

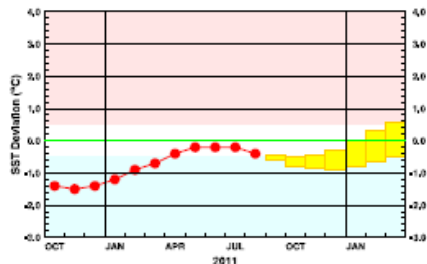
- 10 月の実況: ラニーニャ現象が発生しているとみられる。エルニーニョ監視海域の海面水温は基準値より低い値(基準値との差は -0.9°C) だった(図1、表)。太平洋赤道域の中部から東部にかけての海面水温は平年より低かった(図2、図4)。太平洋赤道域の海洋表層の水温は、西部で平年より高く、中部から東部にかけて平年より低かった(図3、図5)。これら海洋の状況は、ラニーニャ現象が発生していることを示している。一方、太平洋赤道域の気候では、西部で平年よりも対流活動が不活発で、西部から中部にかけての下層の東風が月平均では平年並の強さだった(図6、図7、図8)。
- 今後の見通し: ラニーニャ現象は冬から春までの間に終息する可能性が高い。エルニーニョ予測モデルは、エルニーニョ監視海域の海面水温が、冬から春にかけて基準値より低い値から基準値に近い値へ推移すると予測している(図9)。今後、太平洋赤道域の西部に蓄積された海洋表層の暖水が東進したとしても、東部の水温が基準値に近い値になるのは冬以降になると考えられる。以上のことから、ラニーニャ現象は冬から春までの間に終息する可能性が高い。

西太平洋熱帯域およびインド洋熱帯域の状況

- 西太平洋熱帯域: 10 月の西太平洋熱帯域の海面水温は、基準値より低い値だった(図1)。今後、冬にかけて基準値に近づく予測される(図10)。
- インド洋熱帯域: 10 月のインド洋熱帯域の海面水温は、基準値より高い値だった(図1)。今後、冬にかけて基準値に近づく予測される(図11)。

10 月の日本と世界の天候への影響

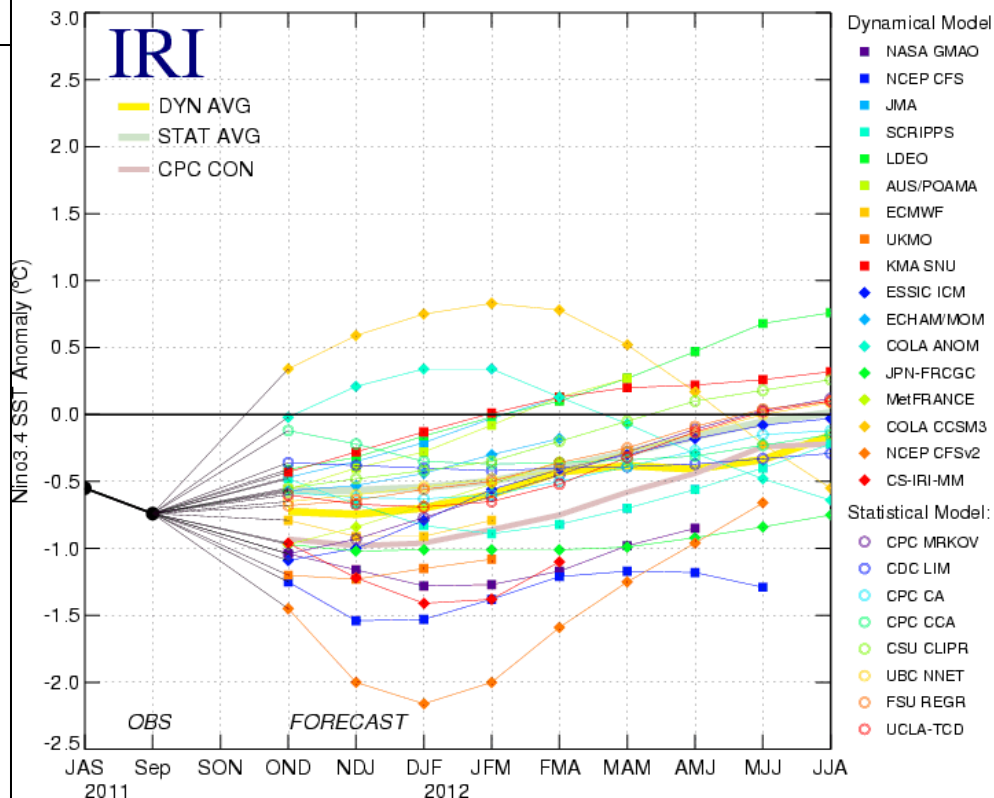
- 日本: ラニーニャ現象時の特徴は明瞭には見られなかった。今後の日本の天候については、最新の季節予報を参照されたい。
- 世界: ラニーニャ現象時の特徴は明瞭には見られなかった。



エルニーニョ/ラニーニャ現象の経過と予測

左の図は、エルニーニョ監視海域の海面水温の基準値との差の5か月移動平均値(指数)の推移を示す。8月までの経過(観測値)を折れ線グラフで、エルニーニョ予測モデルによる予測結果(70%の確率で入ると予想される範囲)をボックスで示している。指数が赤/青の範囲に入っている期間がエルニーニョ/ラニーニャ現象の発生期間である。

Model Predictions of ENSO from Oct 2011



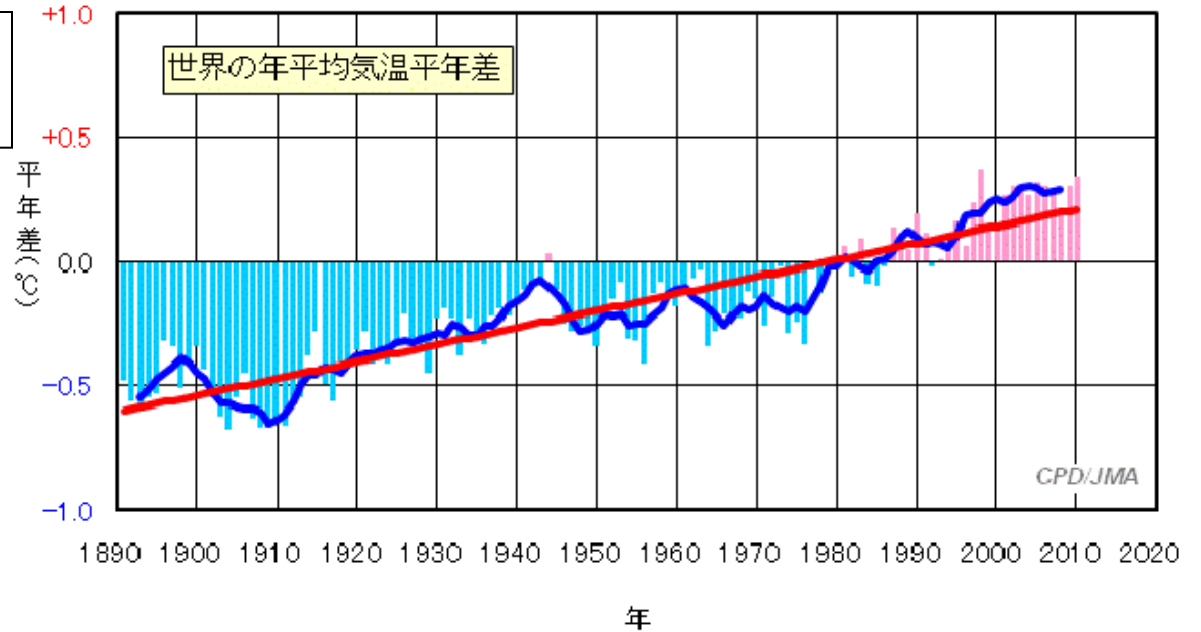
海洋データで初期化した結合モデルが主流

→ 力学的季節予報

世界の年平均気温の平年差の経年変化(1891~2010年)

温暖化の検出 detection

→ 自然変動の分離

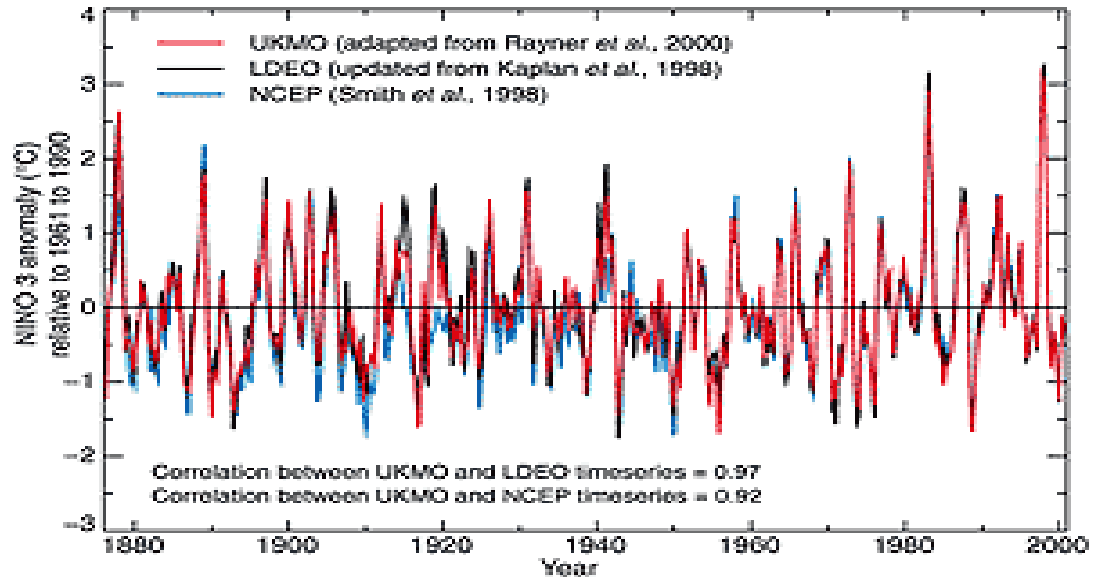


NINO3のSST偏差

ENSO の

変調 Modulation

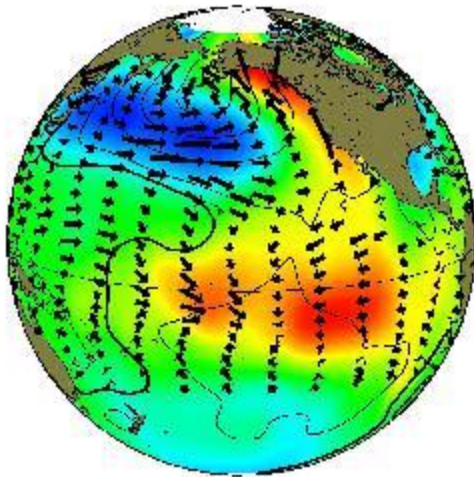
→ 気候シフト



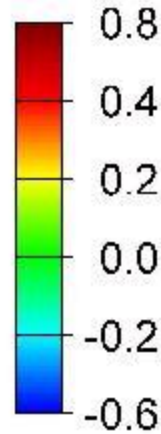
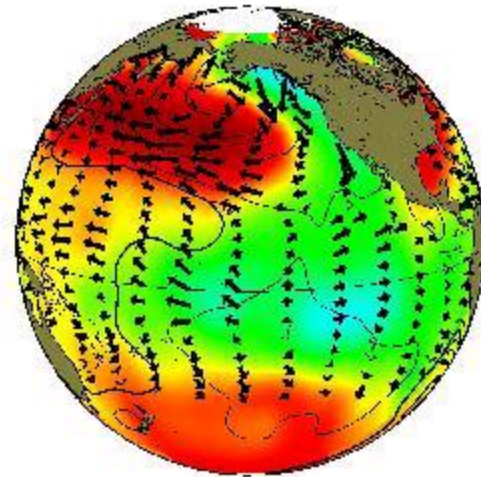
** CPエルニーニョ/もどき

Pacific Decadal Oscillation (PDO)

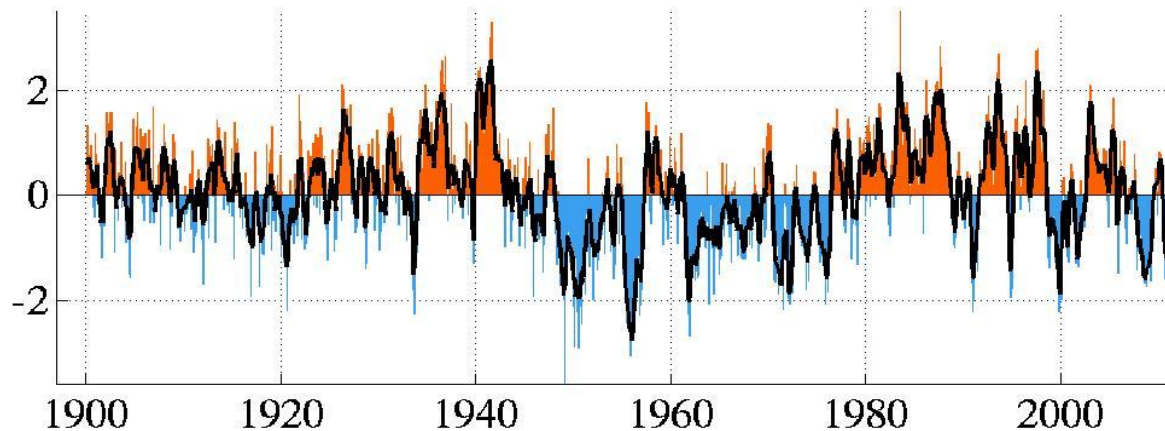
Cold phase



Warm phase



monthly values for the PDO index: 1900-2010

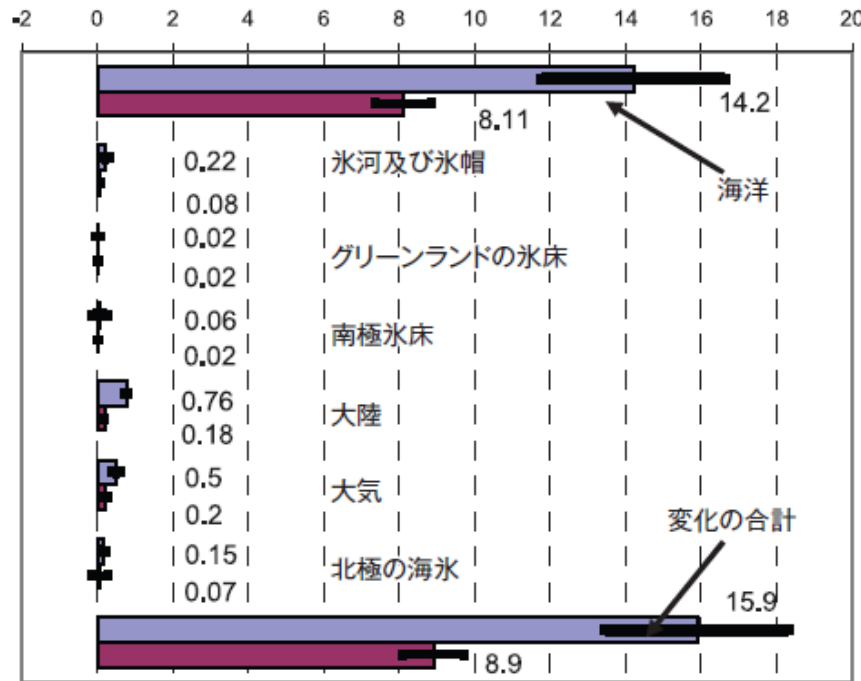


(<http://www.jisao.washington.edu/pdo/>)

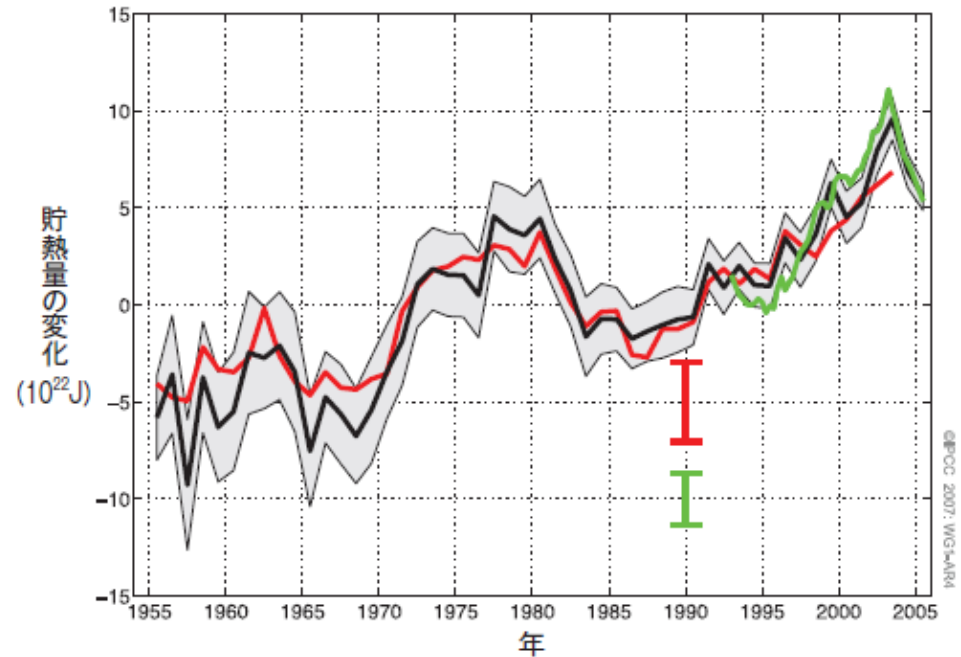
(IPCC AR4より)

気候システムのエネルギー容量

エネルギー要領の変化 (10^{22} J)



世界の海洋貯熱量 (0~700m)



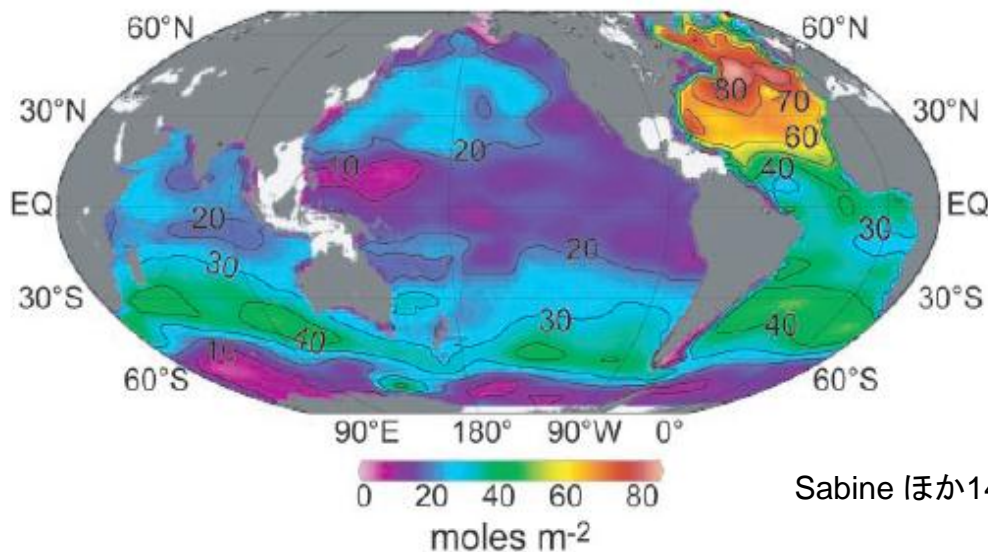
薄青 1961-2003

紫 1993-2003

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]

温暖化により、大気中の二酸化炭素の陸地と海洋への取り込みが減少するため、人為起源の排出の、大気中への残留分が増加する傾向がある。例えば、A2 シナリオでは、気候－炭素循環のフィードバックにより、2100 年には世界平均気温がさらに1°C以上上昇する。

気候と炭素循環が結合することで、気候システムの温暖化につれ、大気中の二酸化炭素が増加することが予測されるが、このフィードバックの大きさは不確実である。このため、大気中の二酸化炭素濃度をある特定の水準に安定化させるために必要な二酸化炭素排出量変化の不確実性が増大する。



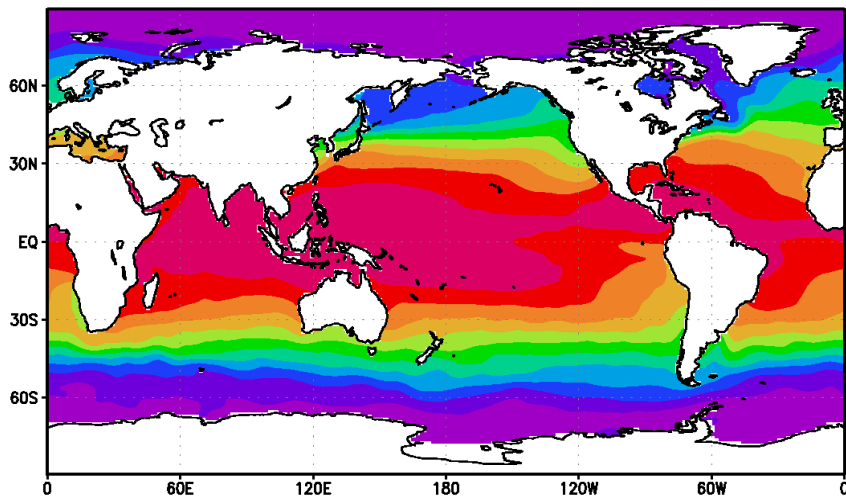
- ・ 産業革命以後1994年までの総蓄積量
1180 ± 190 億トン炭素
- ・ これまでの総排出量の半分近くに相当

Sabine ほか14名(2004)

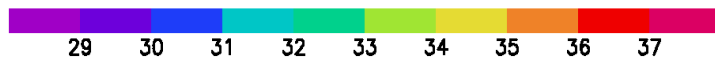
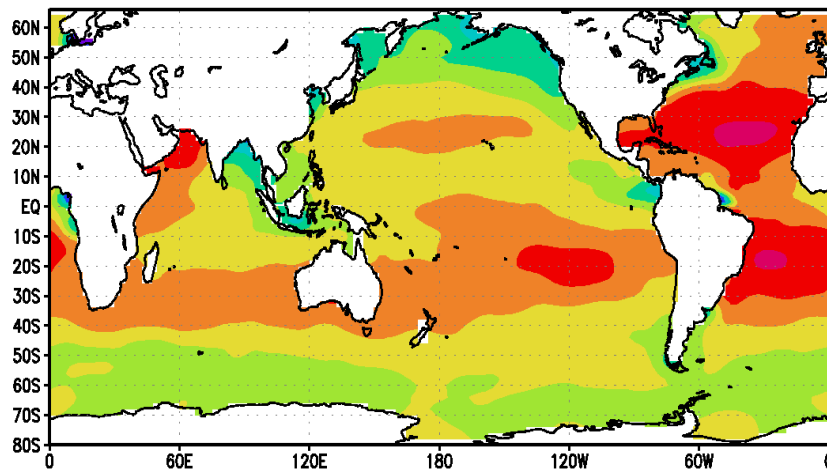
1. 海洋の構造

http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA09F/pr_woa09f.html

ann.mean SST

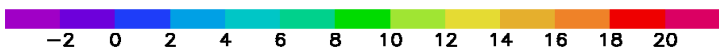
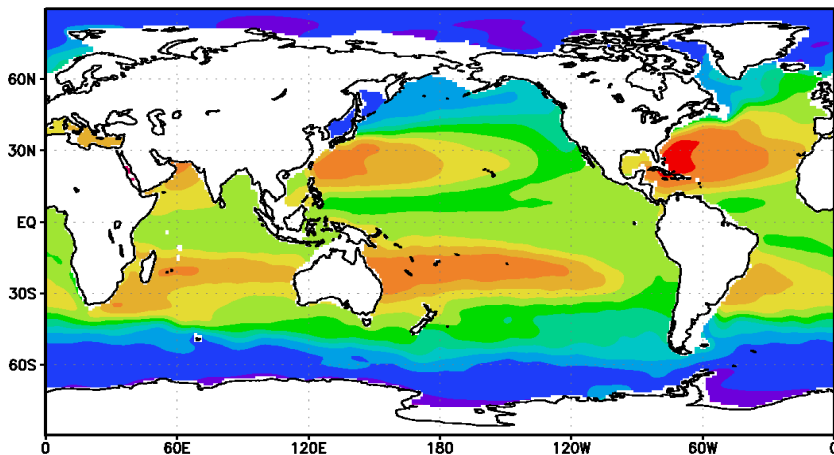


ann.mean S(0m)

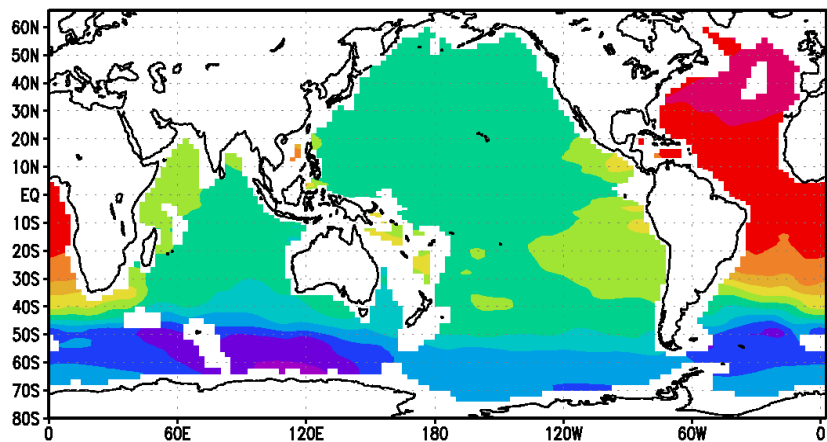


海面とは大きく異なる分布

ann.mean T(300m)

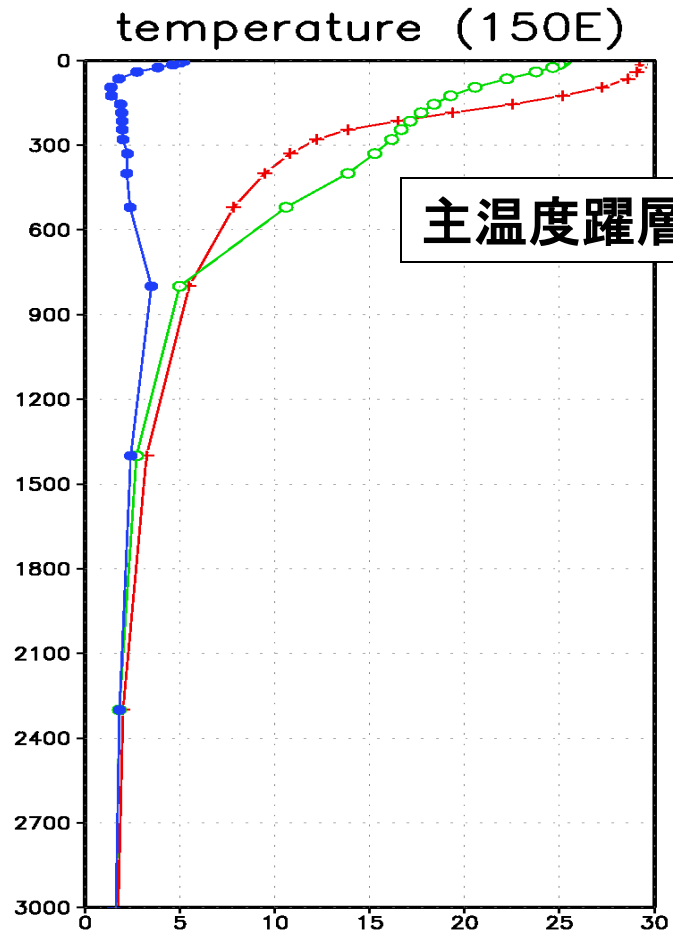
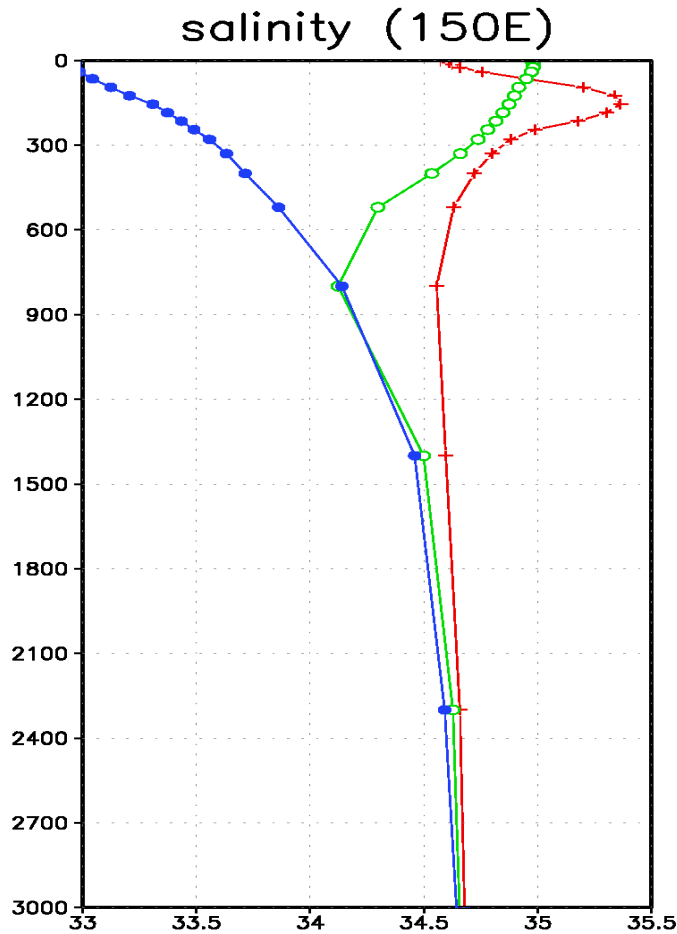


ann.mean T(3000m)



塩分・水温の鉛直構造の比較

- 赤道
- 25N
- 45N



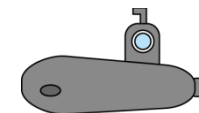
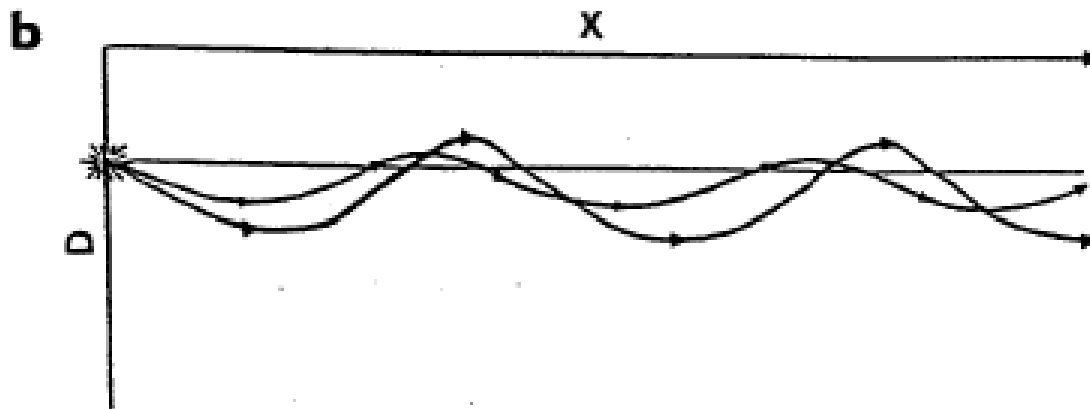
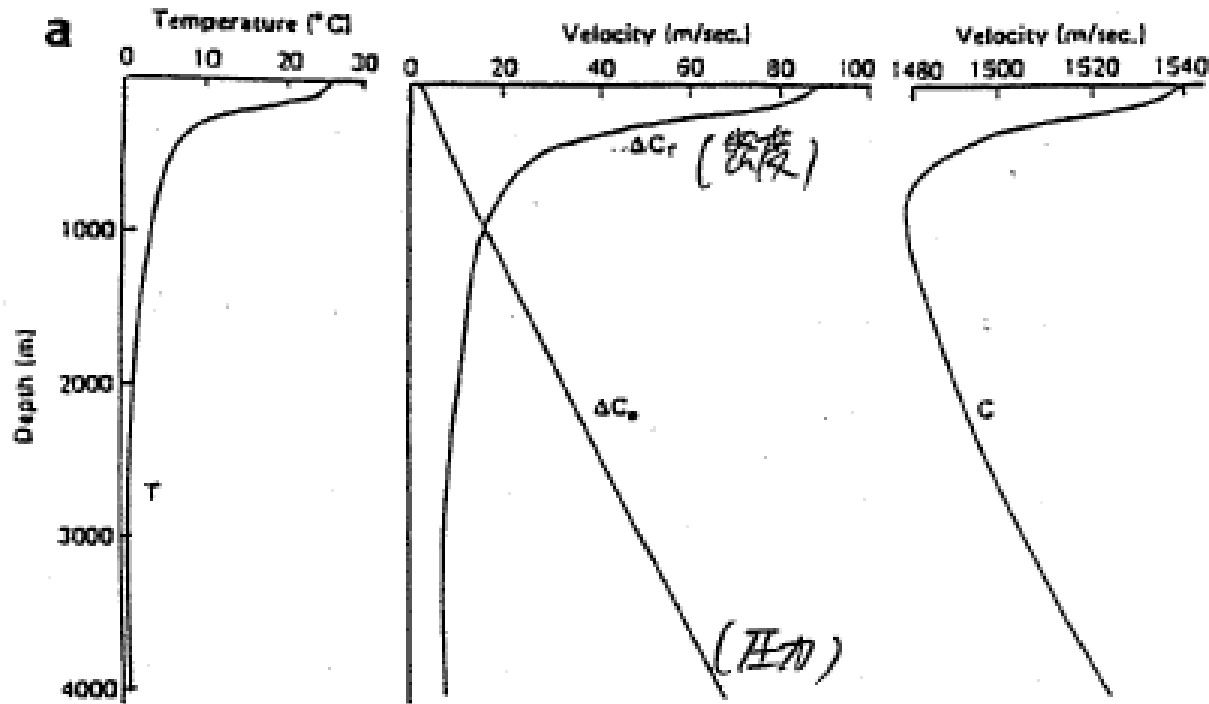
/IGES

2003-

高緯度では、主として塩分により密度が決まっている。

$$\rho(T, S) \approx \rho_0 - \alpha(T - T_0) + \beta(S - S_0)$$

音速



主躍層の維持

- ・ 深層水 局所的に沈降
→ 内部領域 上昇流
- ・ 鉛直移流と鉛直拡散がバランス

$$w \frac{dT}{dz} = \kappa \frac{d^2T}{dz^2}$$

- ・ 深層の流れは

$$\beta v = f \frac{w}{H}$$

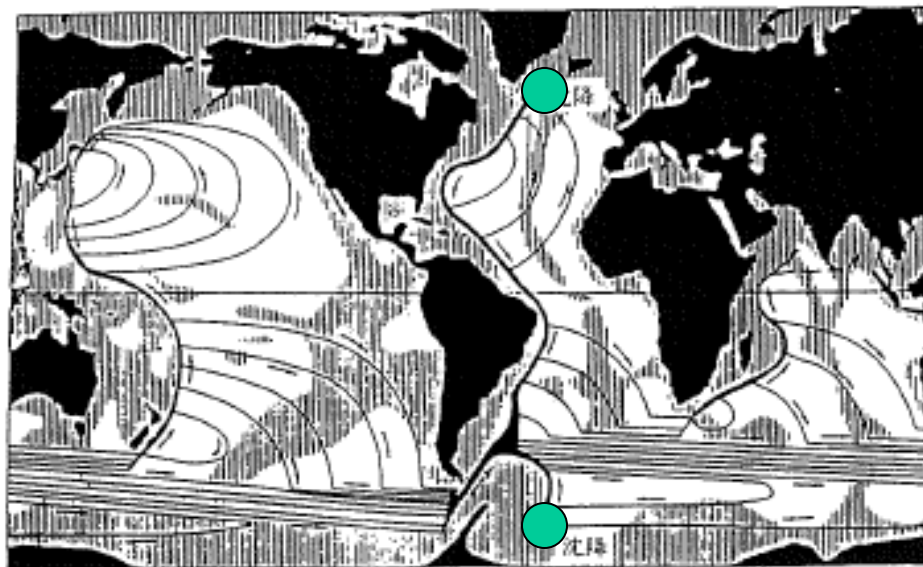
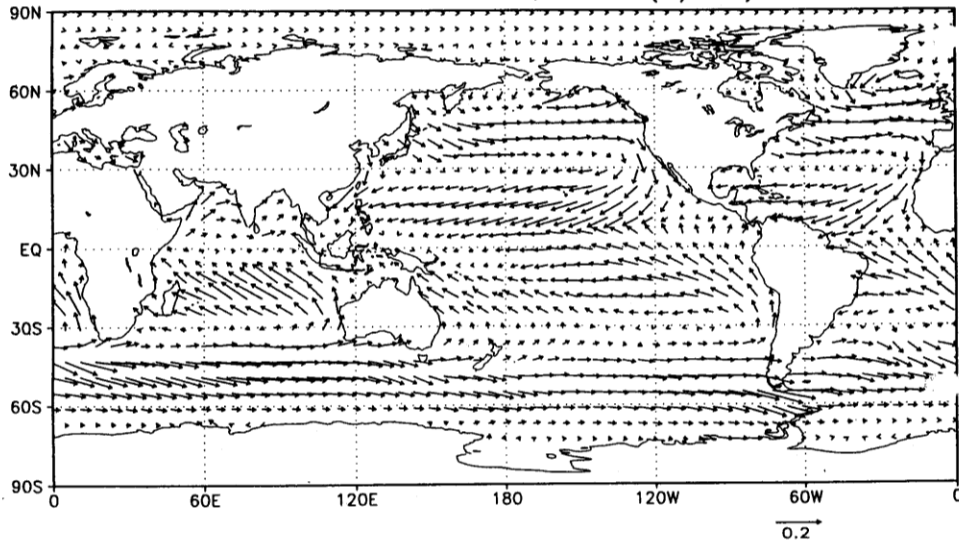
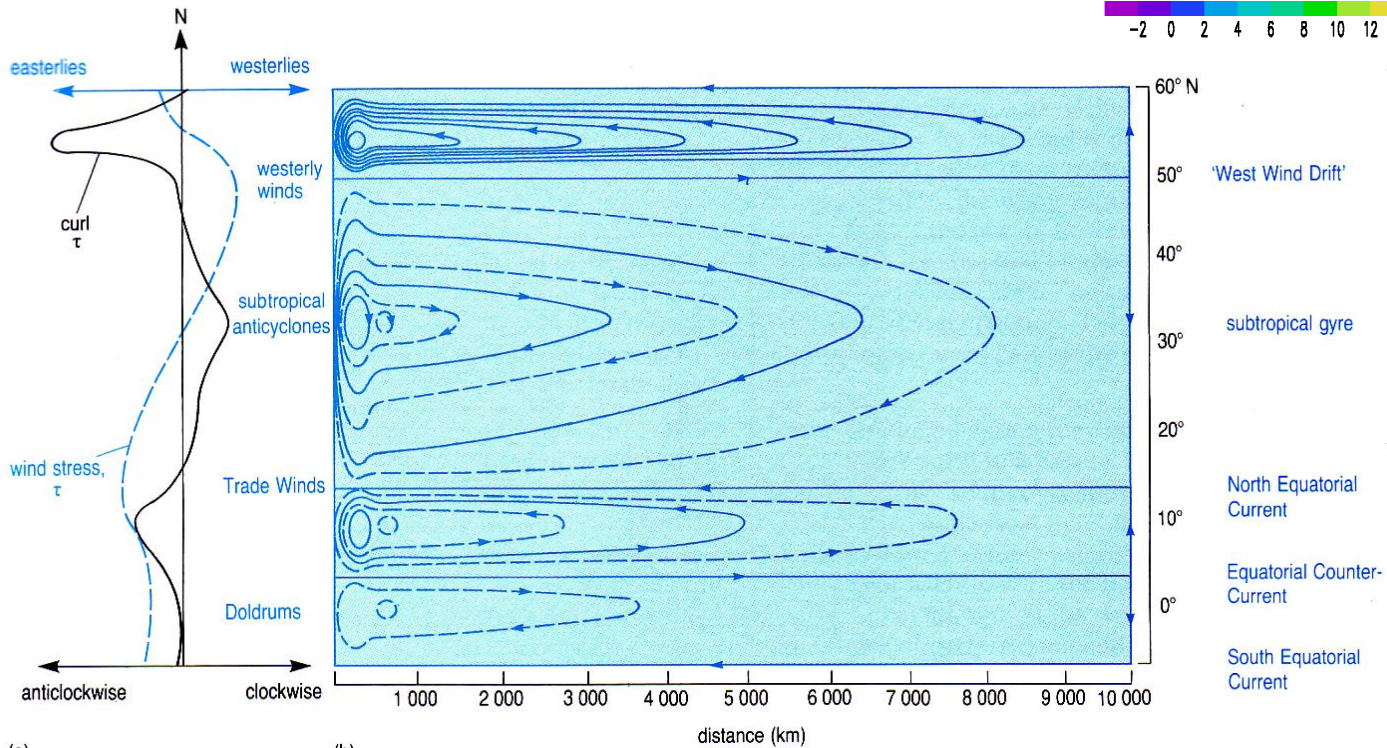
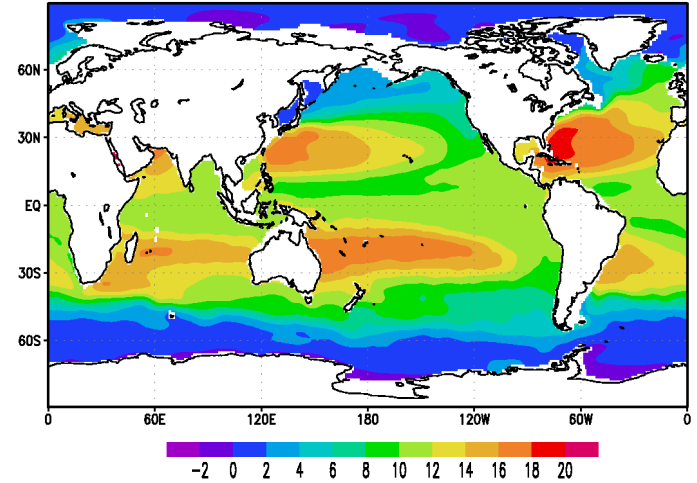


図 6-7 全球規模の深層循環の概念図 (Stommel, 1958)

Annual Mean Wind Stress (N/m²)



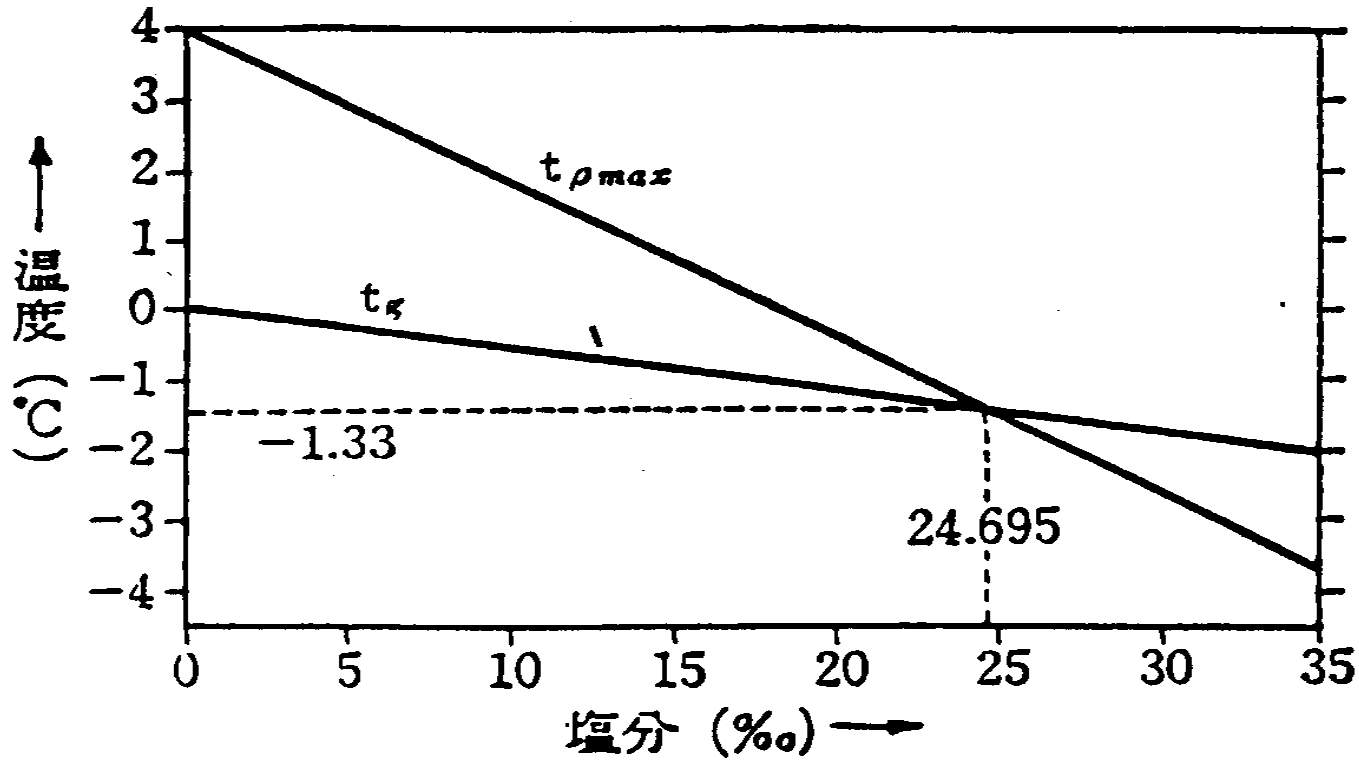
Temp 300m



$S=0$ 冷却 → t_{max} 対流停止 → 表面のみ t_g (結氷)

$S>24.7$ 冷却 → t_g 先 → 深層に達する対流

低温高塩の重い水 北西太平洋・南極海



第2.2図 密度を最大にする温度 ($t_{\rho max}$) と氷点温度 (t_g) との関係

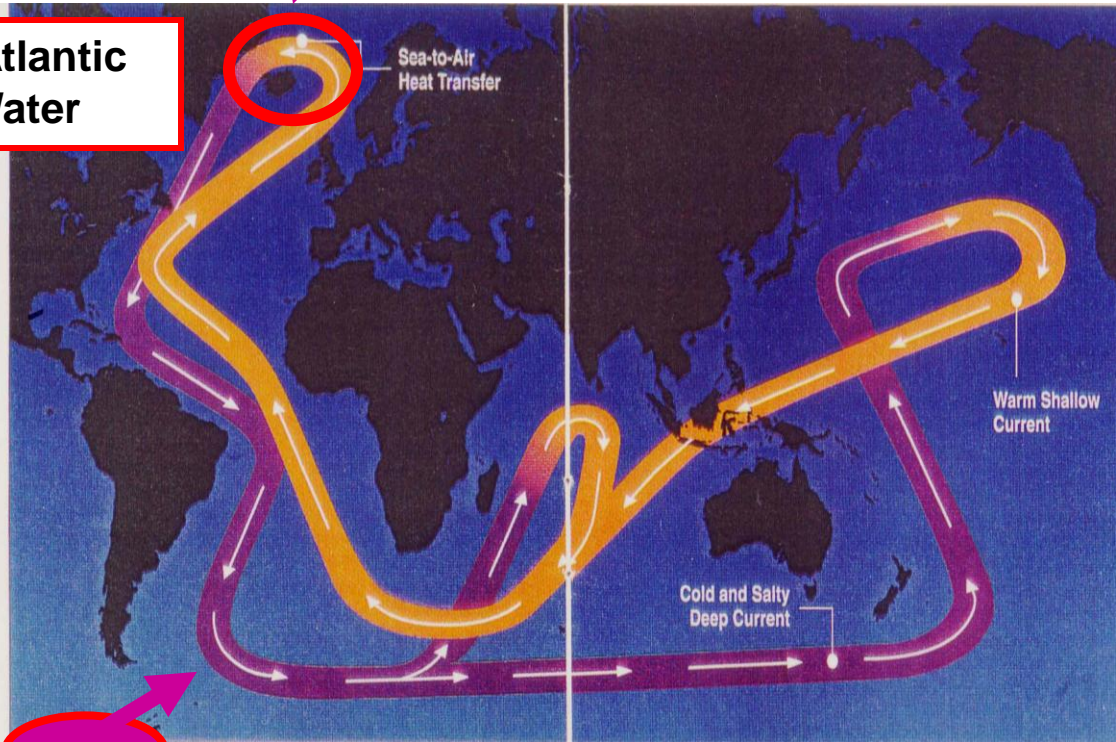
熱塩循環

Deep depth dominant

(Arctic Sea)

Conveyer Belt

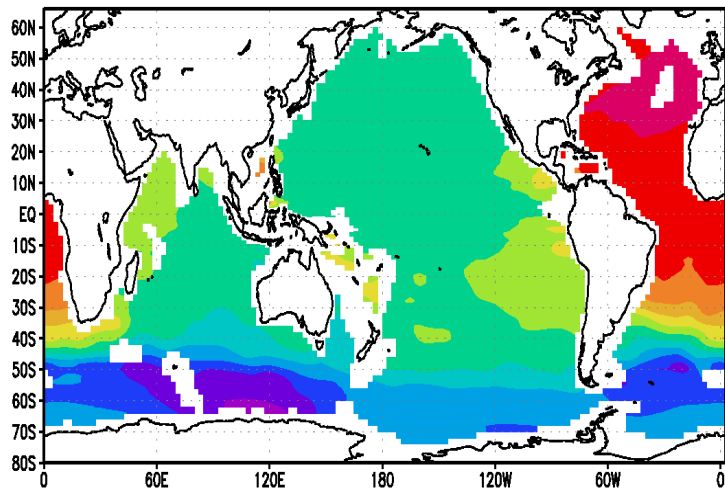
North Atlantic Deep Water



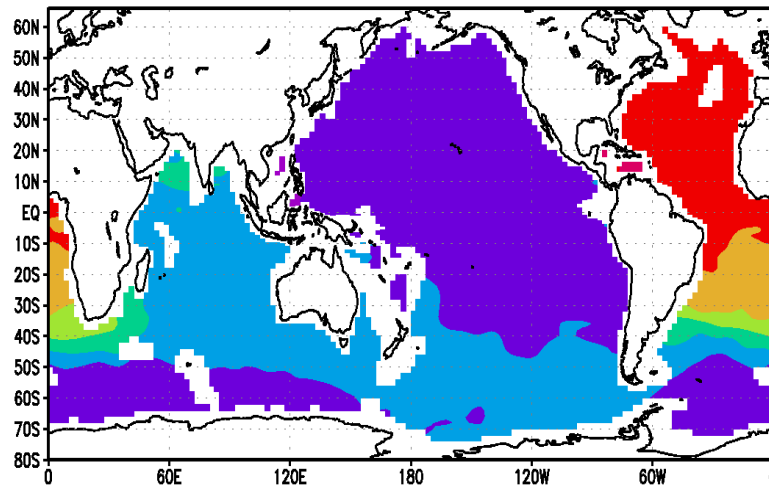
Antarctic Bottom Water

Surface layer
Deep layer

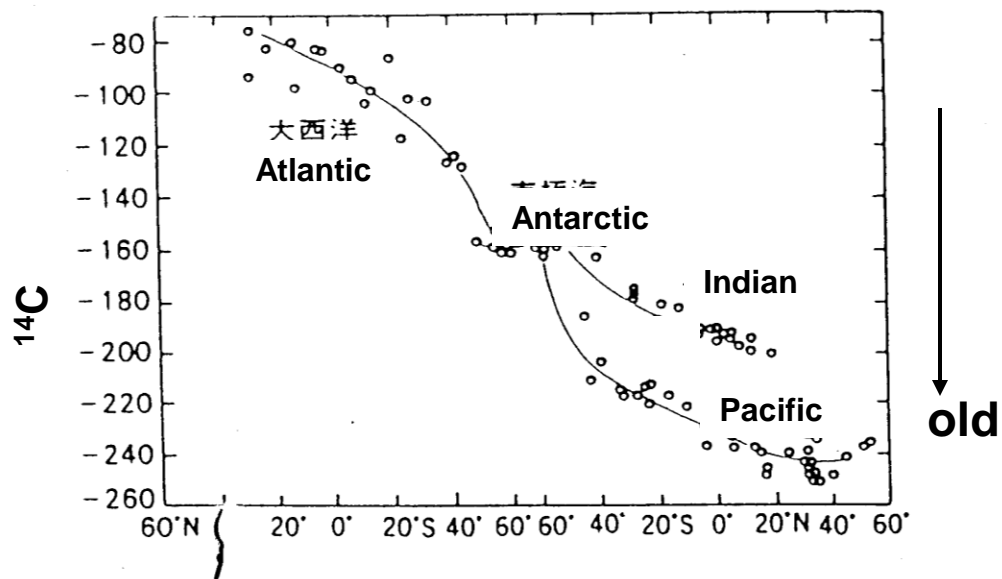
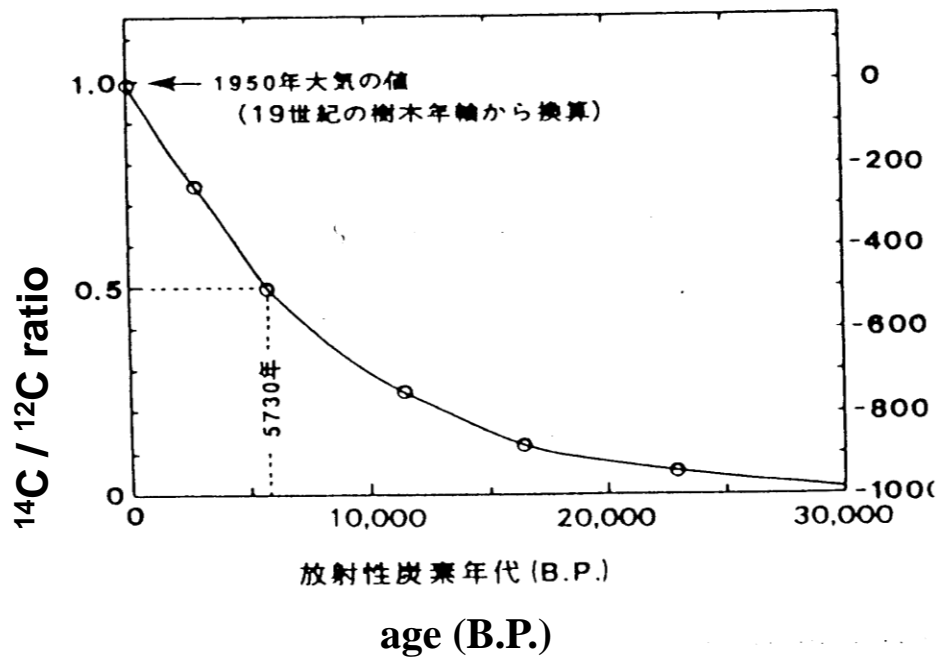
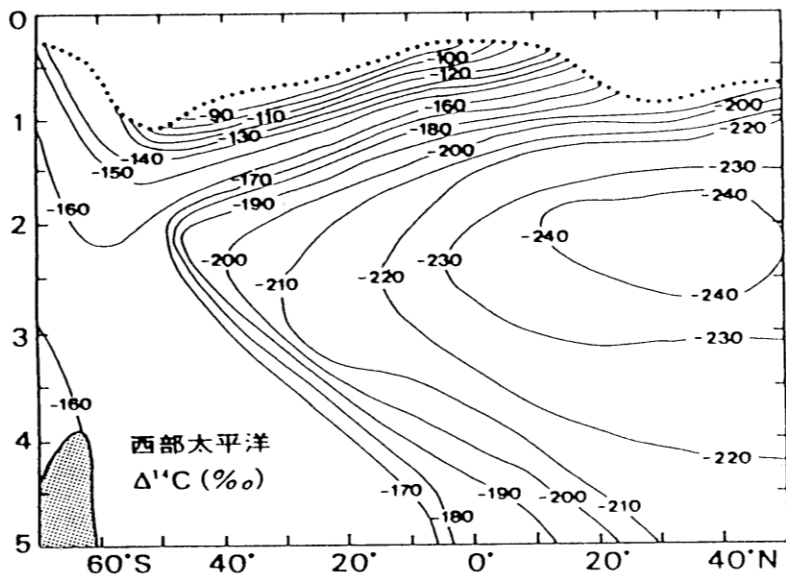
ann.mean T(3000m)



ann.mean S(3000m)

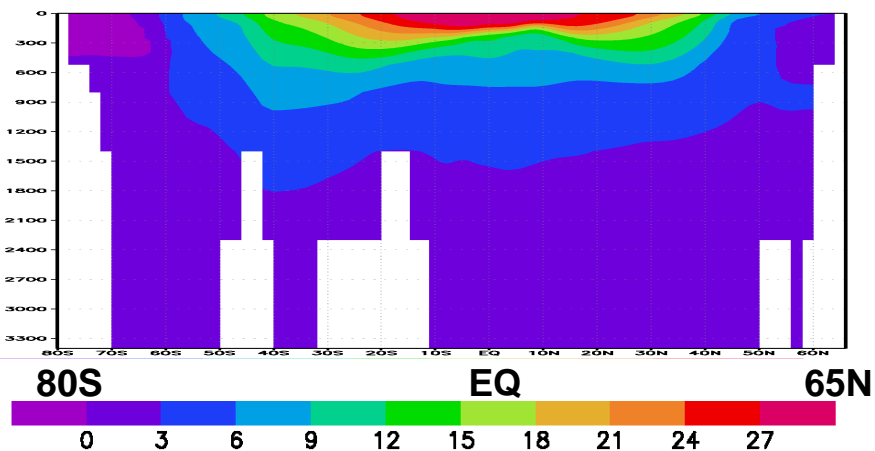


西部太平洋 ^{14}C



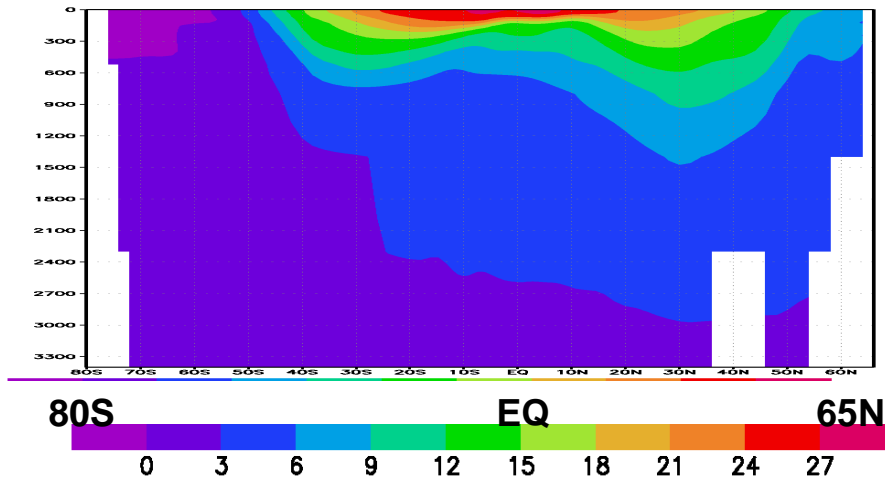
水温南北断面 (太平洋 180E)

80S-65N 0-3400m



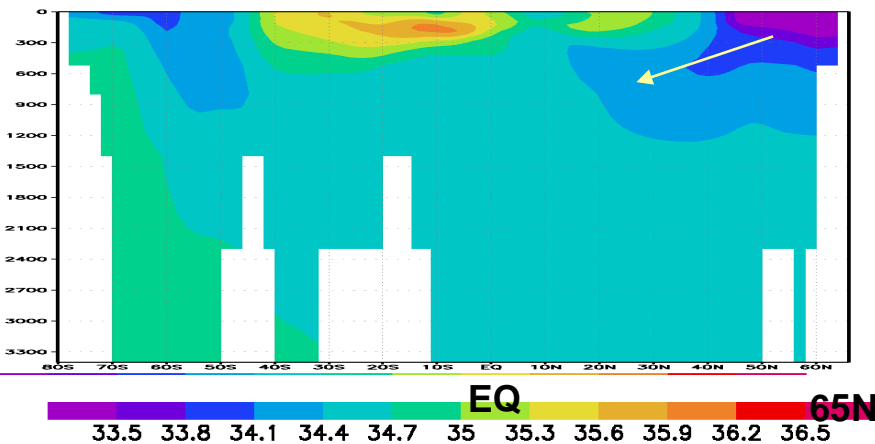
水温南北断面 (大西洋 30W)

80S-65N 0-3400m



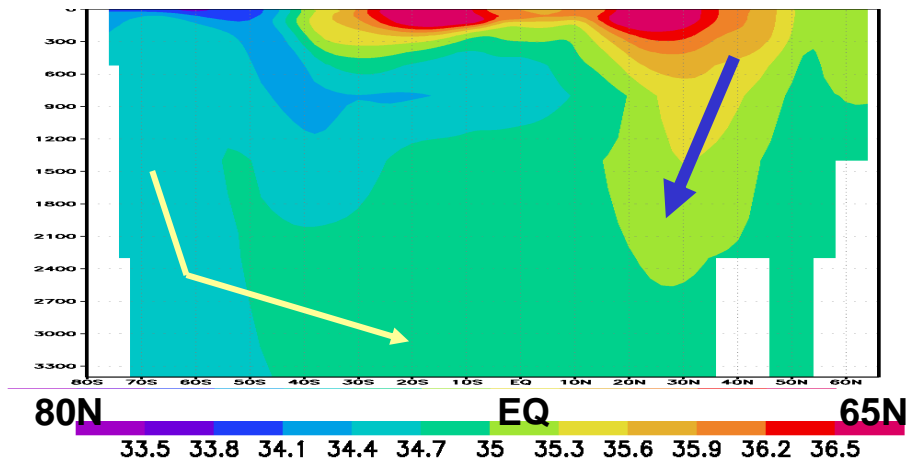
塩分南北断面 (太平洋180E)

80S-65N 0-3400m



塩分南北断面 (大西洋 30W)

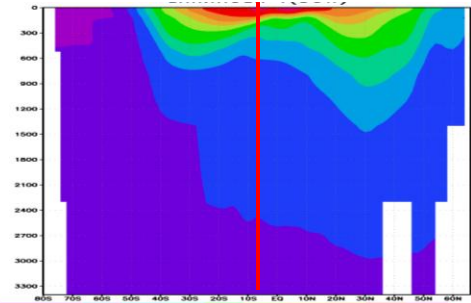
80S-65N 0-3400m



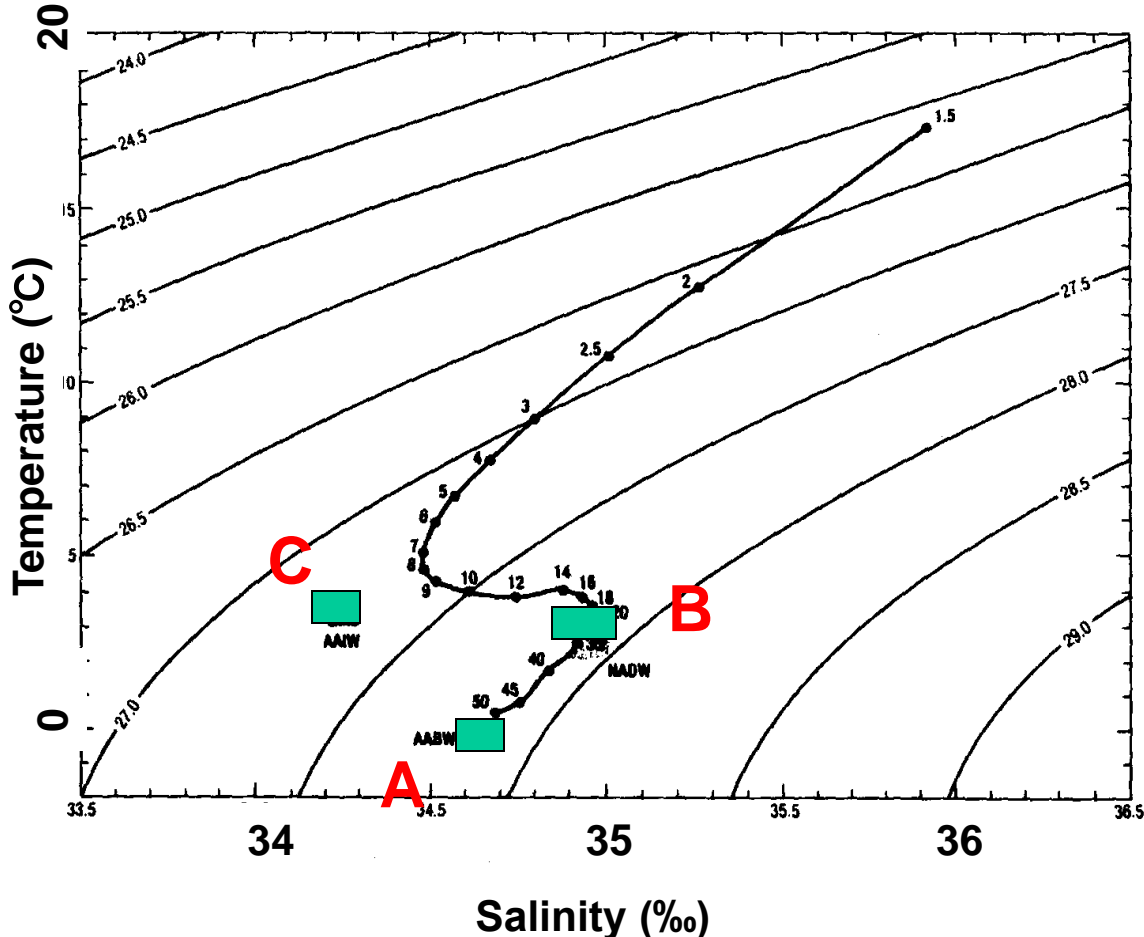
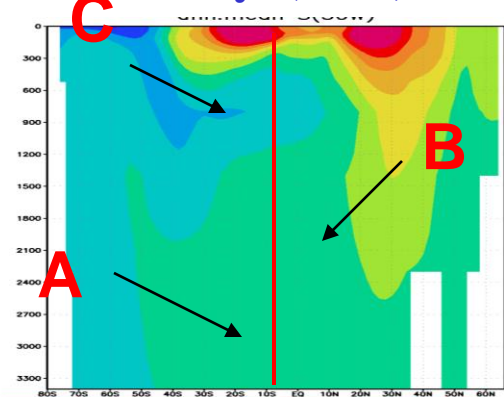
水塊

- A 南極低層水
- B 北大西洋深層水
- C 南極中層水

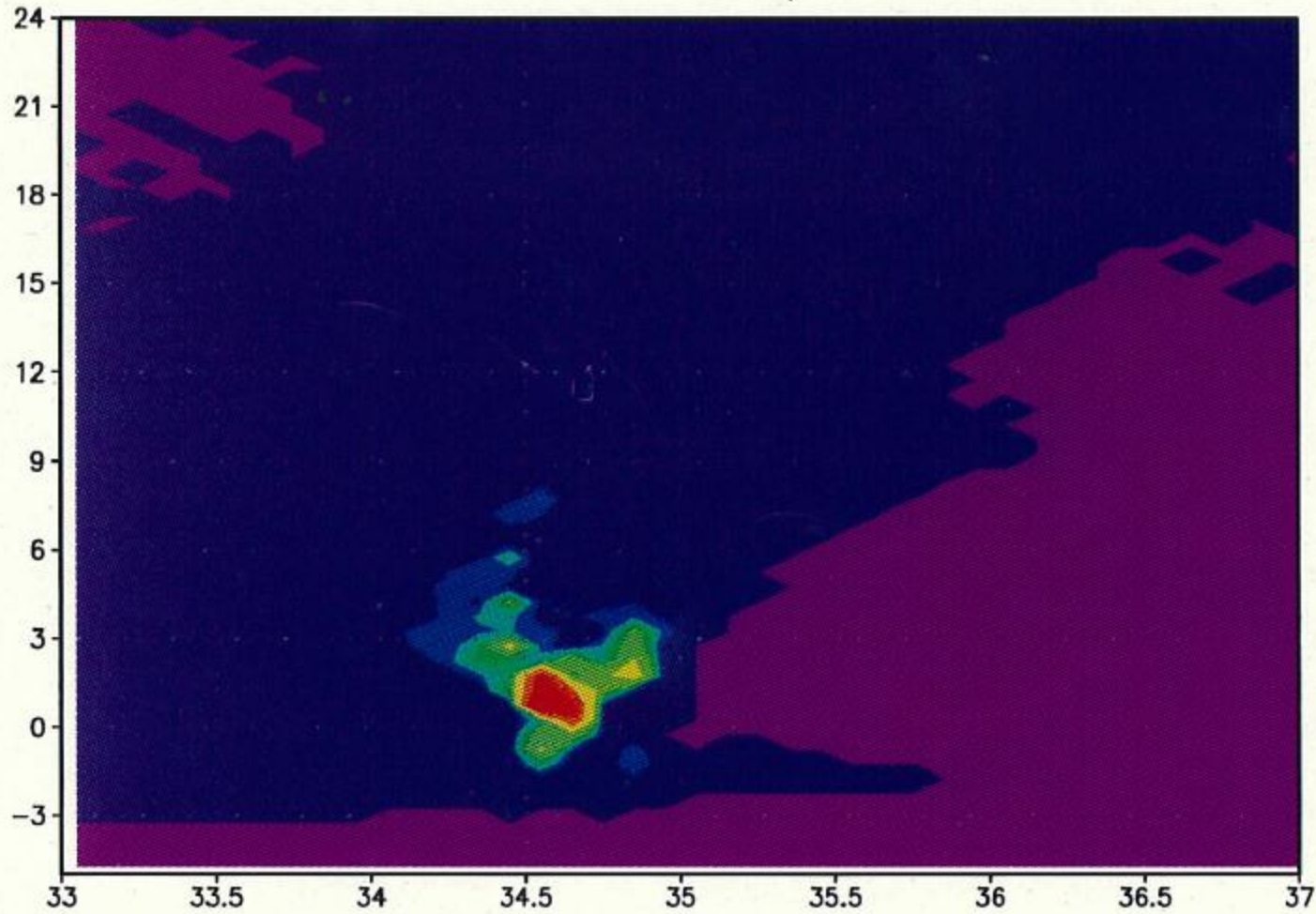
Temperature (30W)



Salinity (30W)

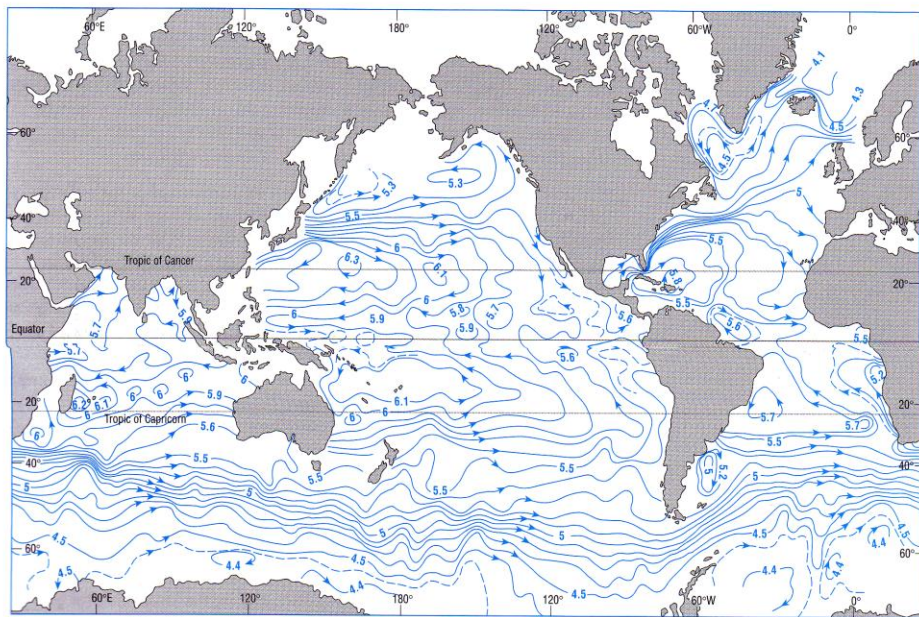
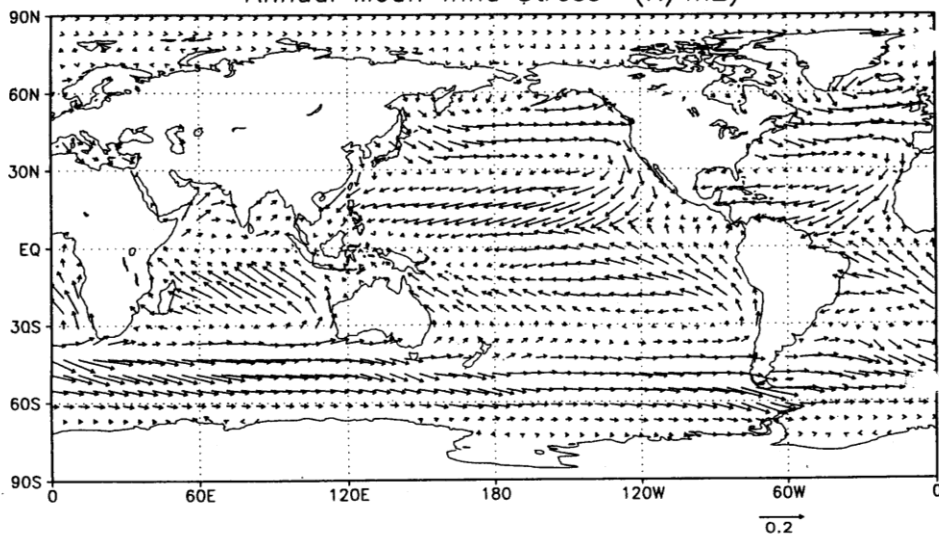


大西洋赤道域でのT-S 曲線

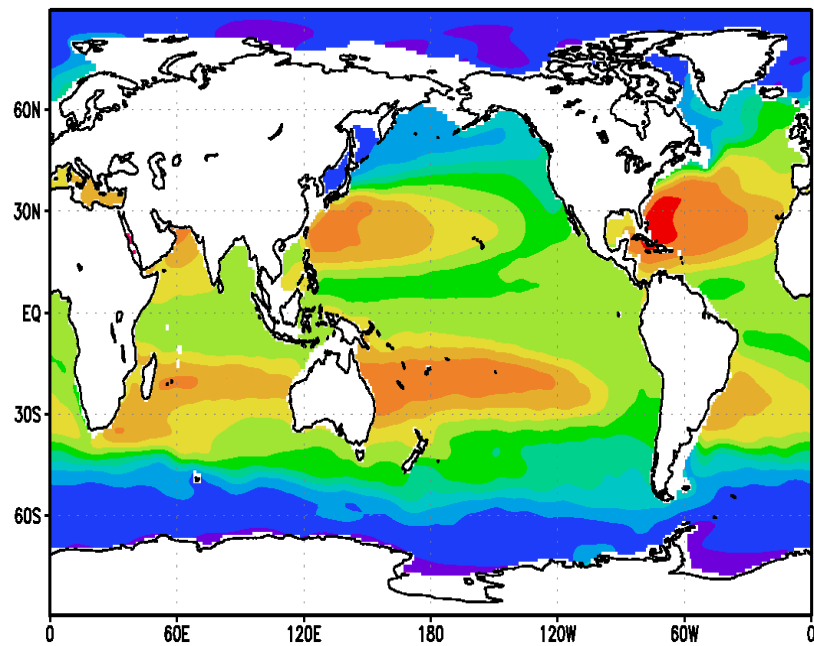


体積比(%)

Annual Mean Wind Stress (N/m²)



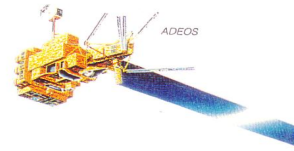
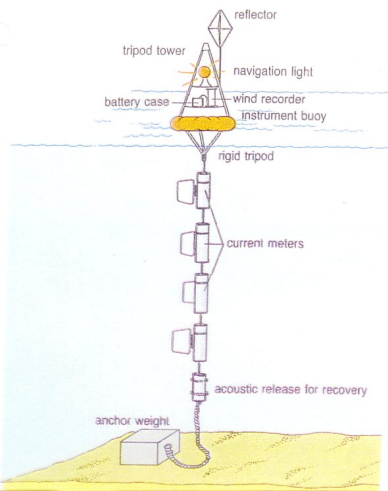
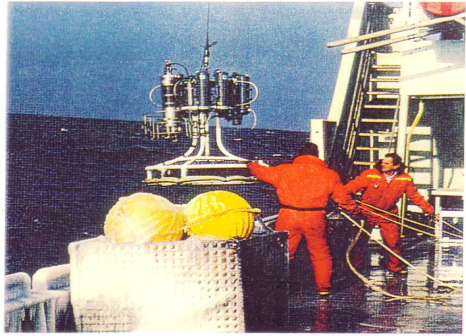
海面上度



300m 水温



4. 海洋観測システム



海に関する単位あれこれ

深さ 尋(ひろ) fathom(ファゾン)

両手を広げた長さ

$$1 \text{ fathom} = 6 \text{ feet} = 1.8288 \text{ m}$$

$$1 \text{ 尋} = 6 \text{ 尺} = 1.818 \text{ m}$$

距離 海里 (nautical mile)

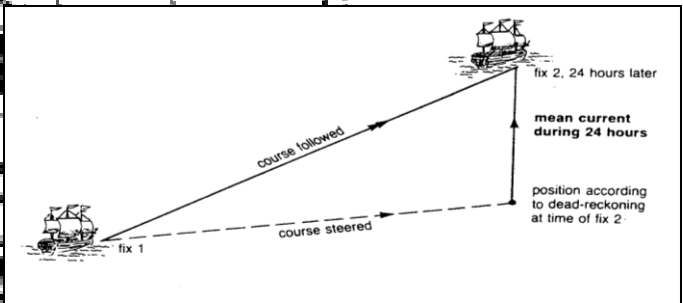
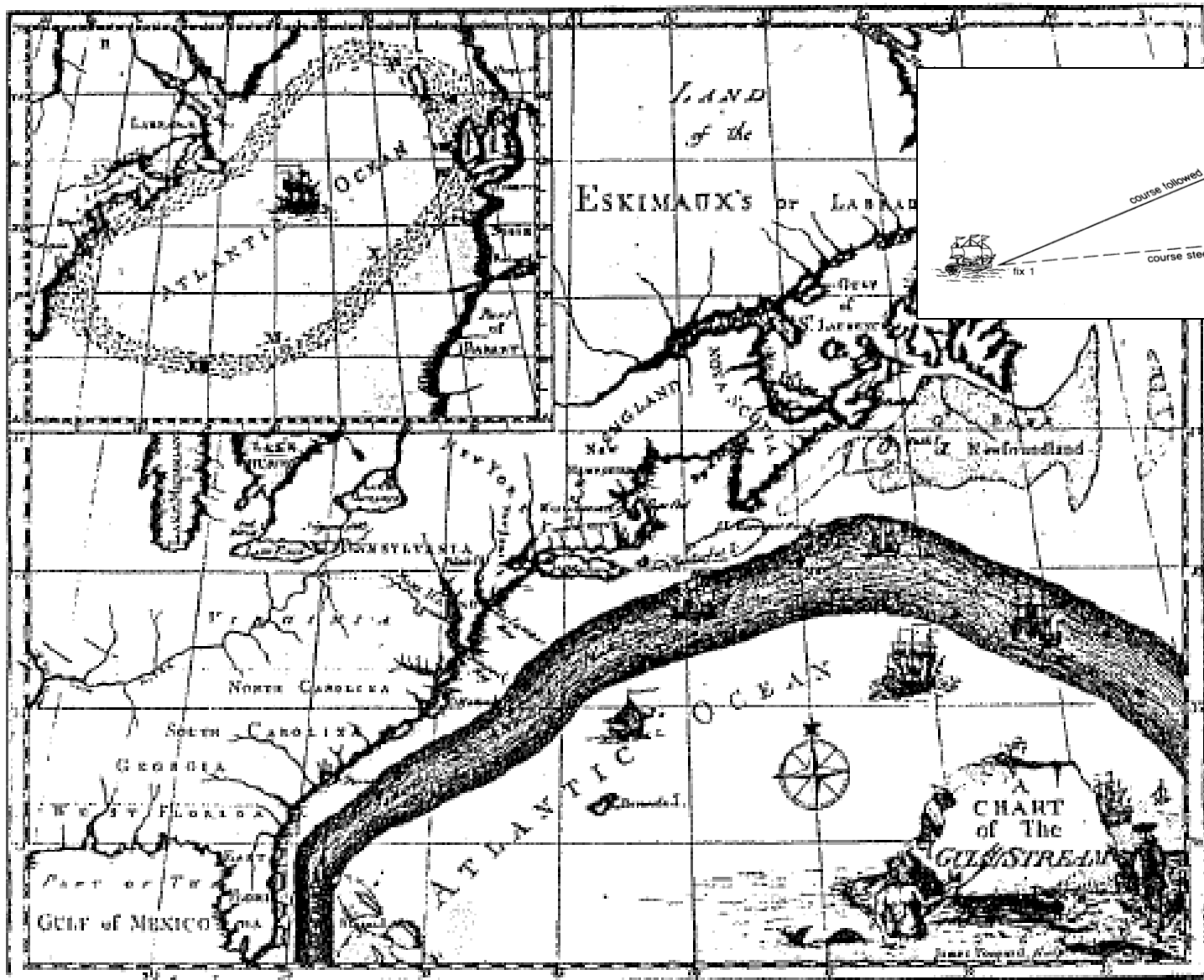
$$1 \text{ マイル} = 1.852 \text{ km}$$

子午線の1分 (=1/60度)

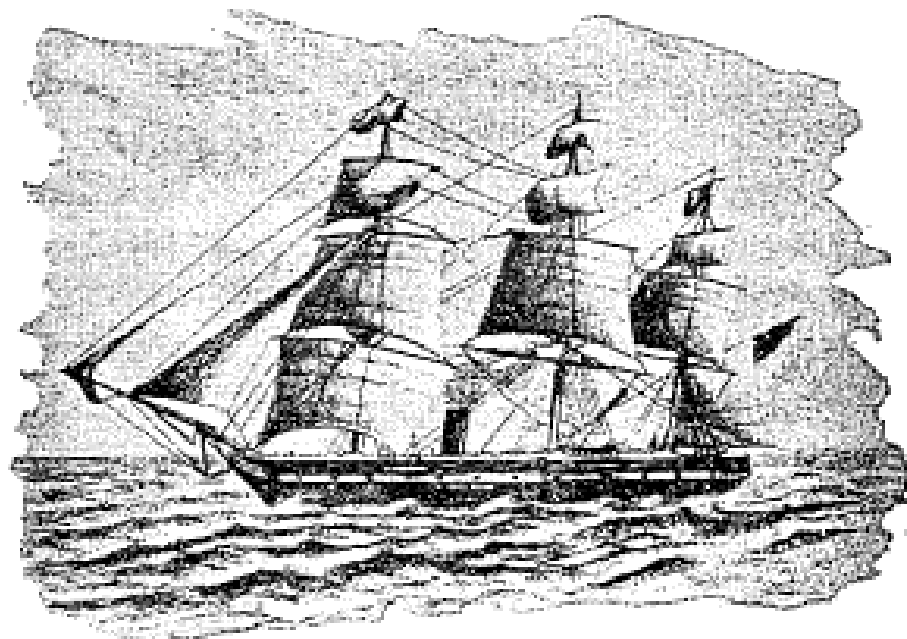
$$\text{(陸の)マイル} \quad 1 \text{ マイル} = 1.6093 \text{ m}$$

速度 ノット

$$1 \text{ ノット} = 1 \text{ nm/h}$$



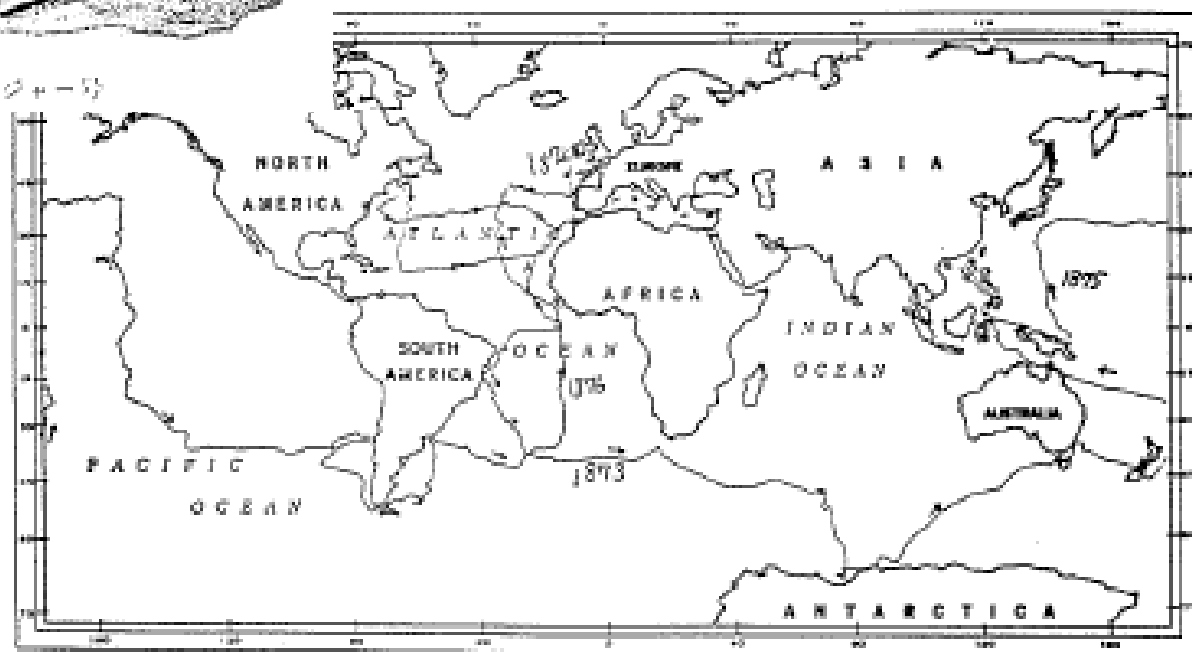
メキシコ湾流のchart Timoth Folger and Benjamin Franklin



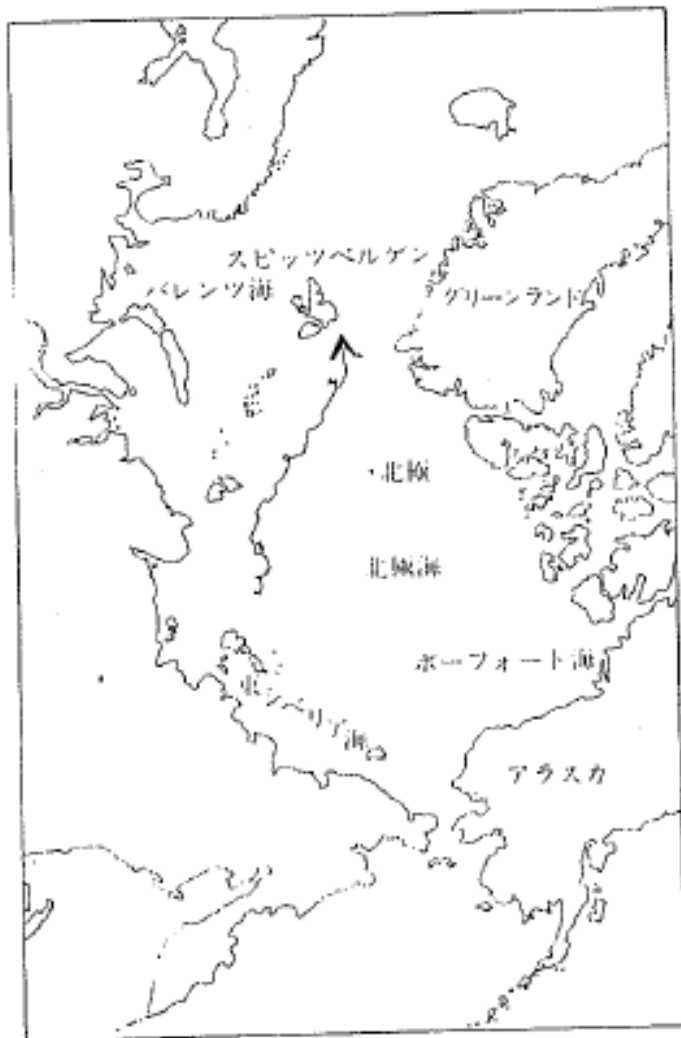
チャレンジャー号

化学組成 一定を見出す

第3.2図 H.M.S. チャレンジャー号

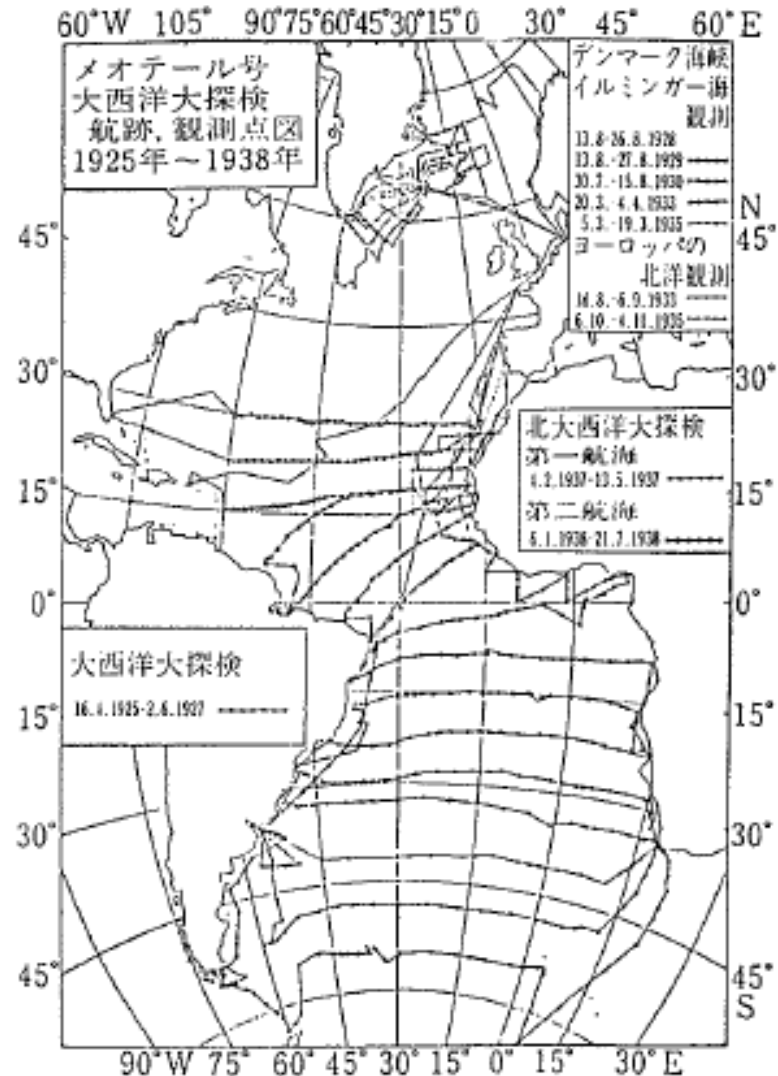


第3.3図 チャレンジャー号探検 (1872~76) の航跡



第9図 氷に閉ざされたナンセンのフラム号の漂流経路。

1893-96 ノルウェー
 エクマン流の発見



第38図 メテオール号の航跡と観測点 (1925～1938)。

第一次大戦
 錬金術 (賠償の目論見)

水の圧力



0m



200m

海の中では、水深10mにつき
1気圧ずつ水圧が高くなります。



500m

1000mの深さでは海面の
100倍の圧力を受けます。



1000m

カップめんの容器を測器と一緒
に沈めると、このようにちぢん
でしまいます。

2000m



3000m



4000m

電触

パワー

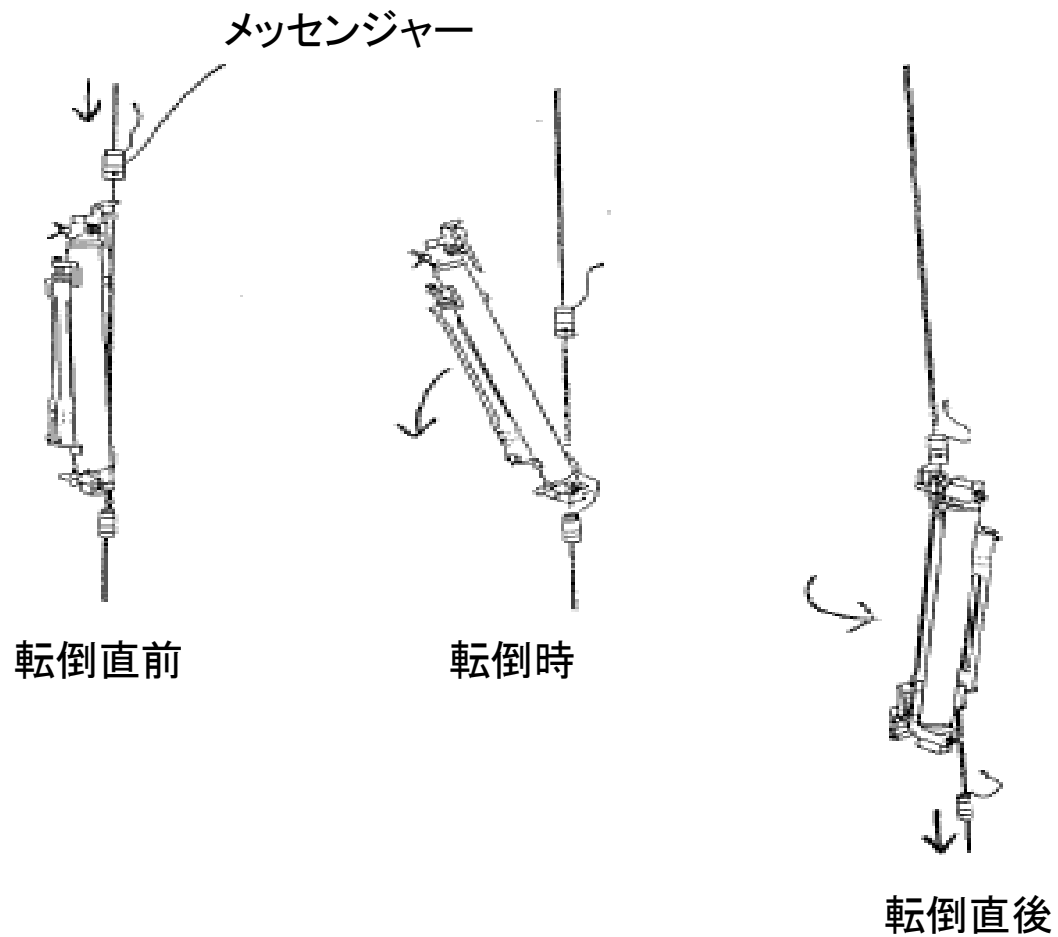
生物活動

通信

.....

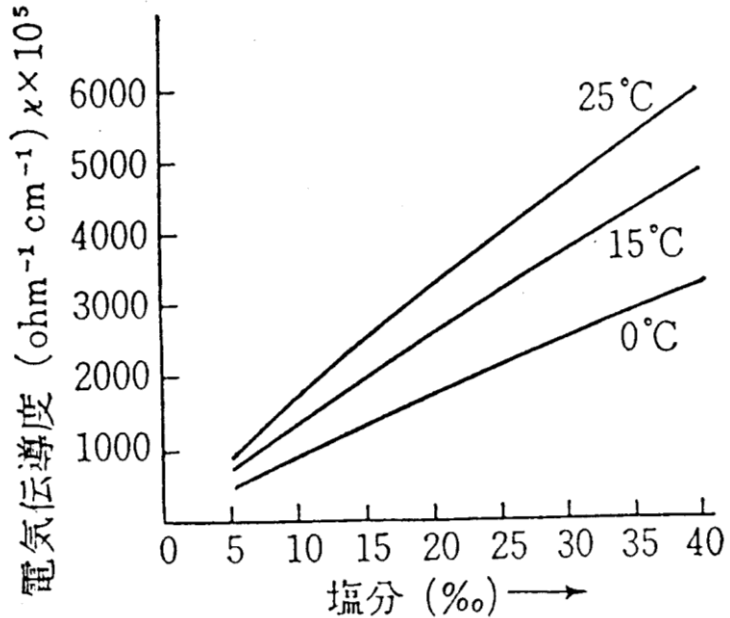


ナンセン採水器



CTD sensor

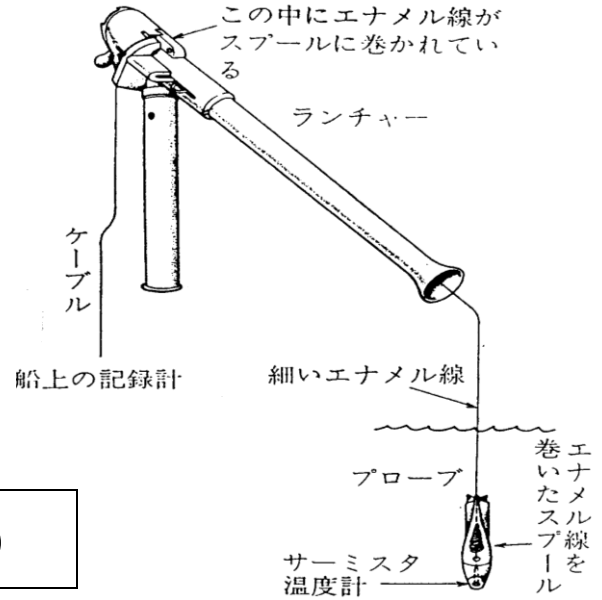
T(z) S(z)



XBT sensor

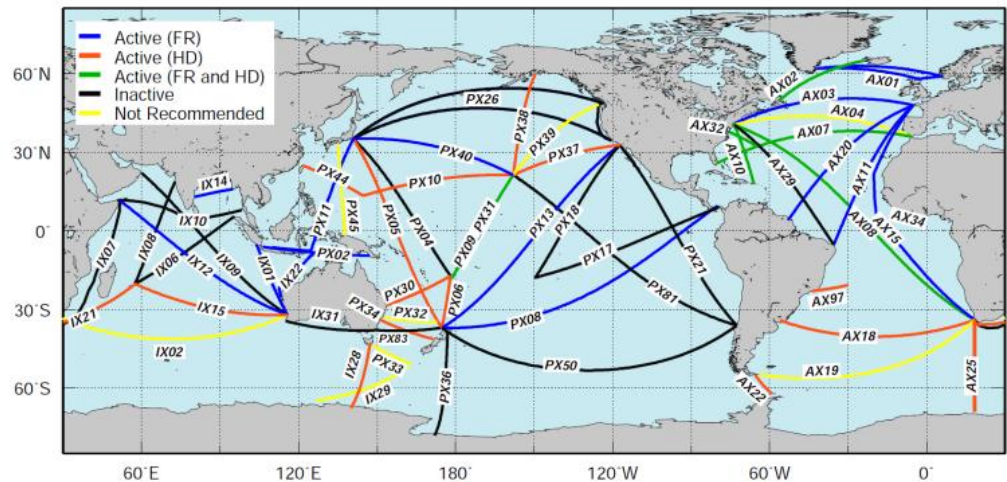
T(z)

Expendable Bathythermograph: 投下式水温水深計



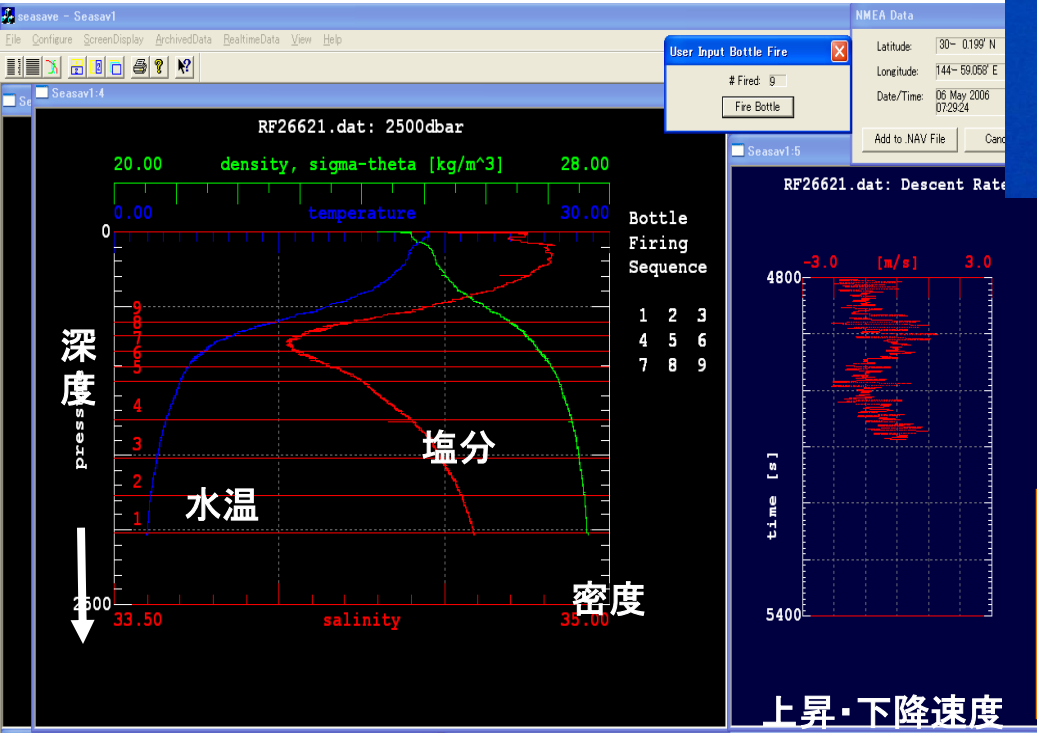
XCTD

Current Status of XBT Transects Implementation (2010)



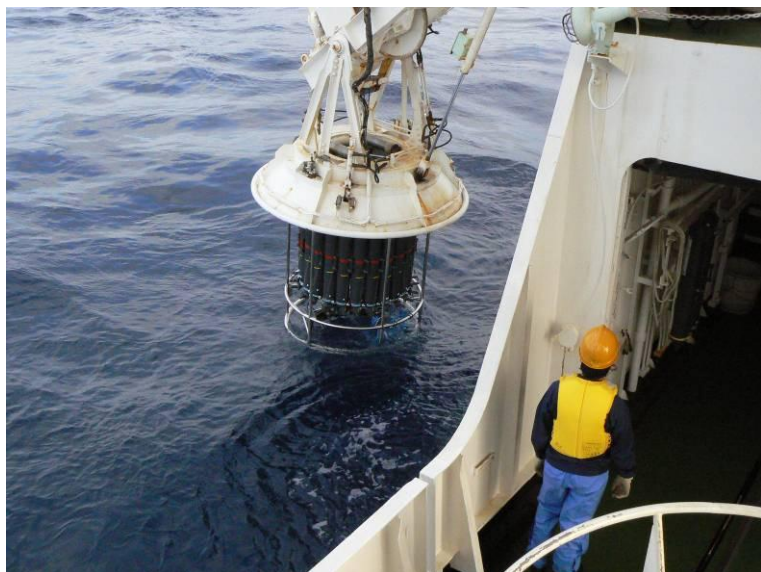
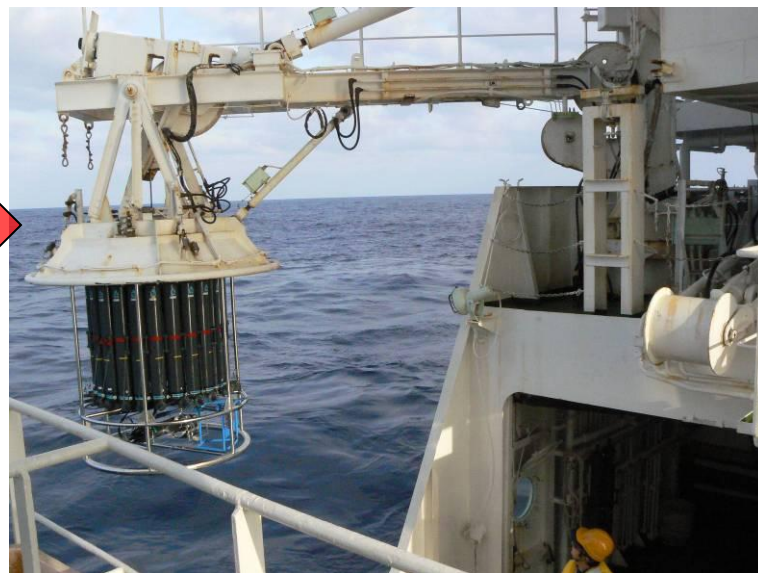
CTD観測・採水

(C:電気伝導度、T:水温、D:深度)
塩分



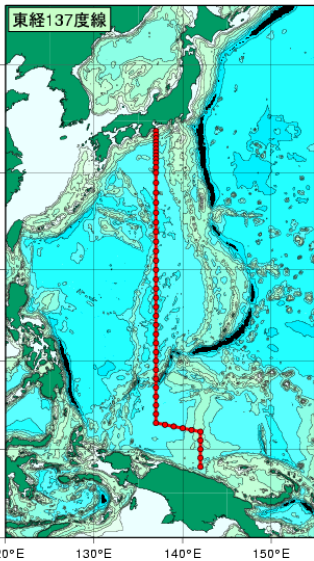
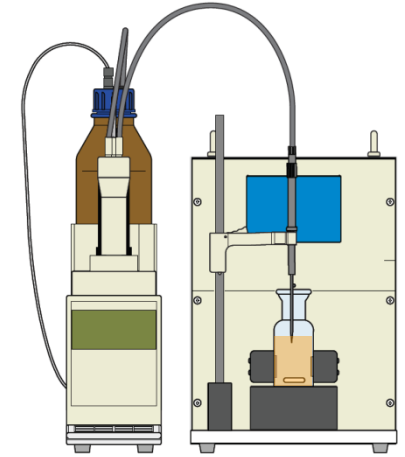
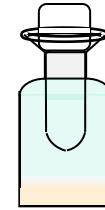
センサーを海中に投入し、船上で監視しながら連続データを取得する。

CTD海中投入の様子





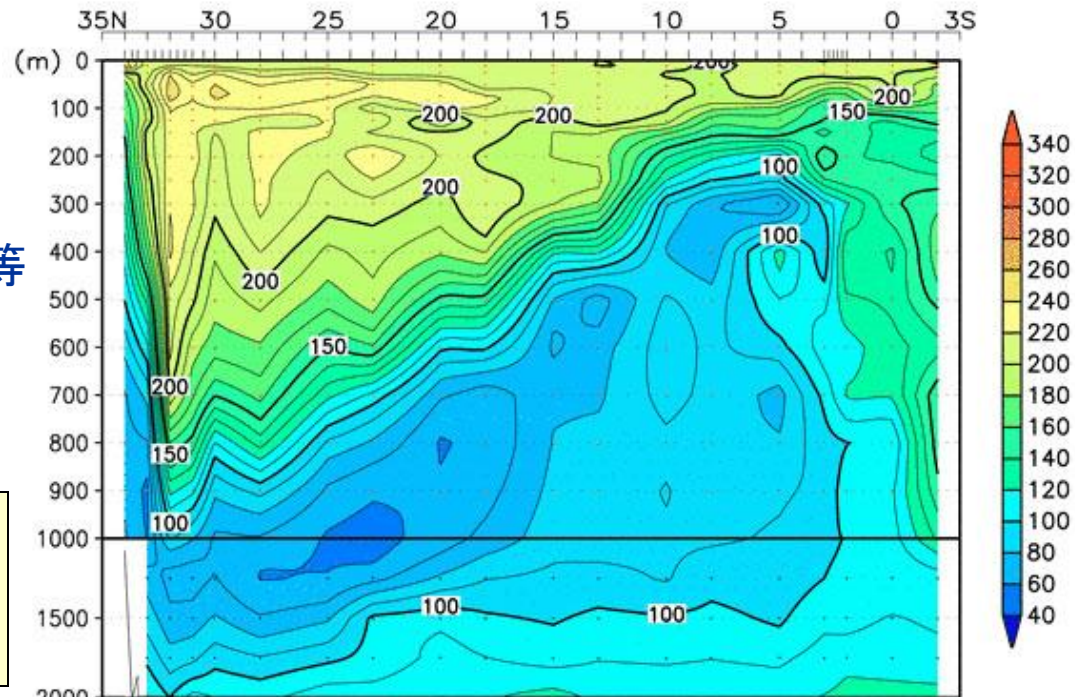
採水・分析



分析項目

溶在酸素量、栄養塩、
全炭酸、植物色素量等

東経137度線にお
ける溶在酸素量の
分布(2006年夏)

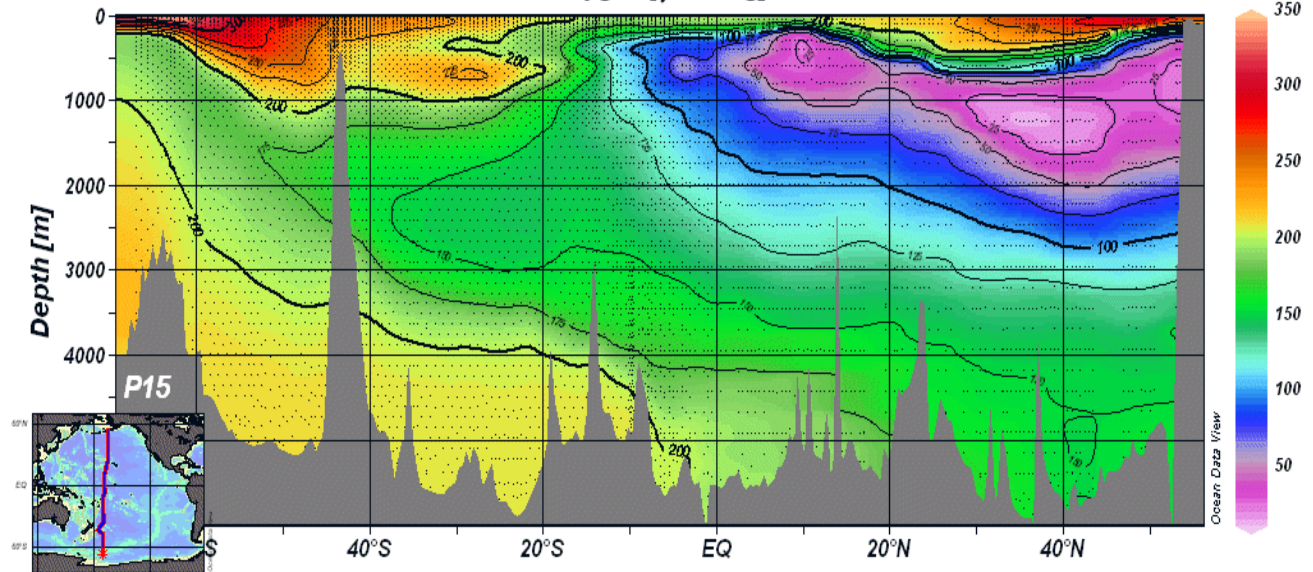


Dissolved Oxygen along 137°E line, June 2006

(C) Japan Meteorological Agency

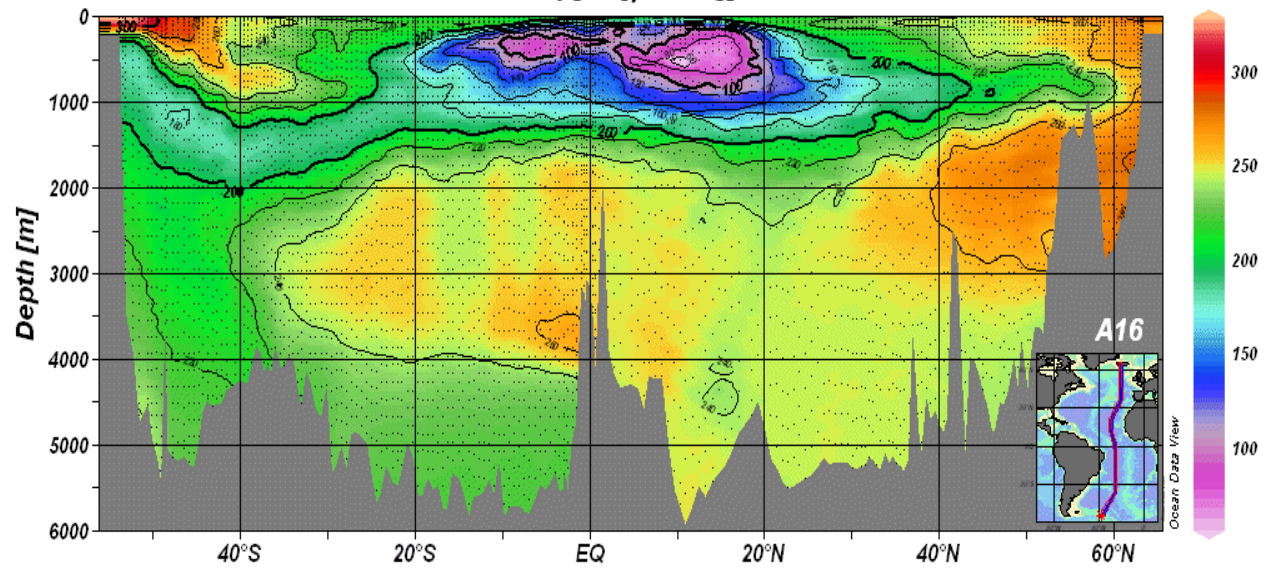
eWOCE

Oxygen [$\mu\text{mol/kg}$]



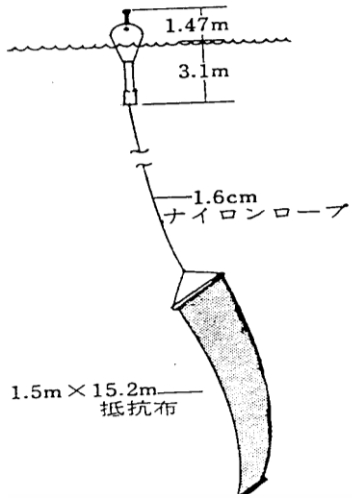
eWOCE

Oxygen [$\mu\text{mol/kg}$]

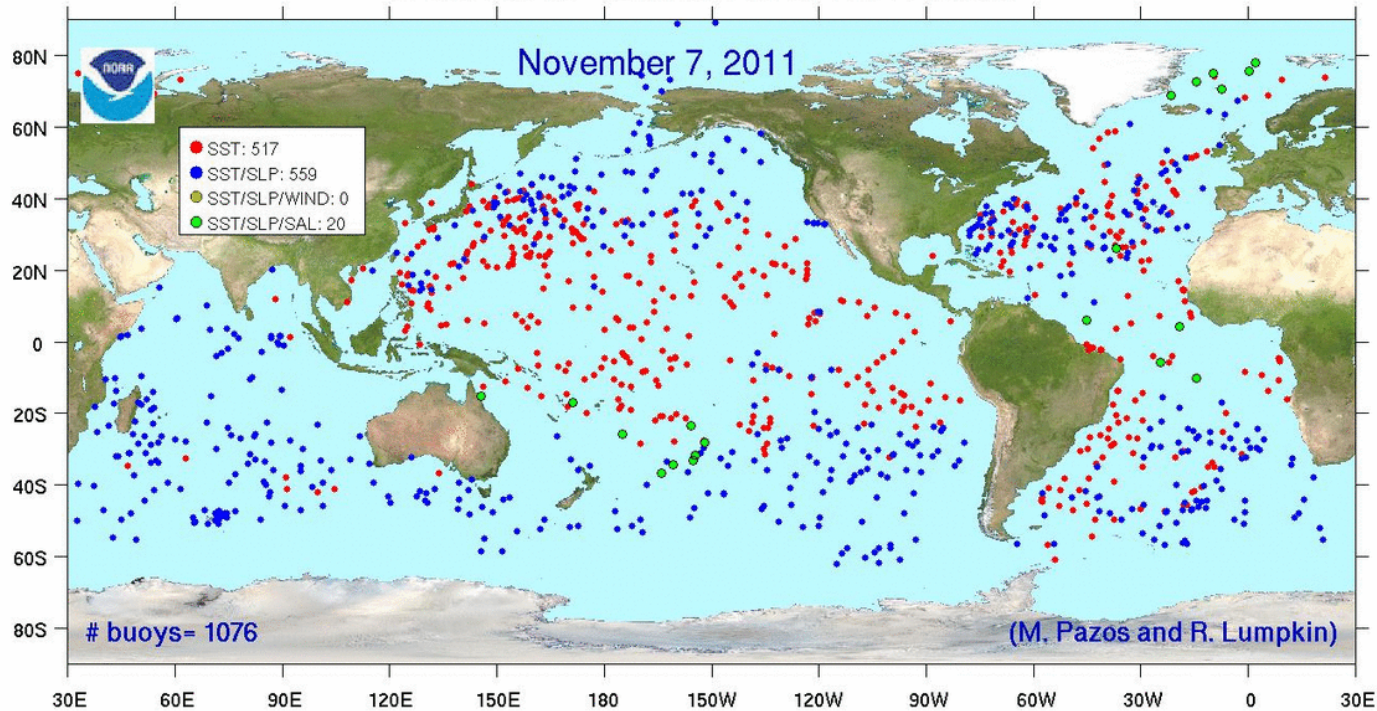


漂流ブイ

SST・気圧・風など

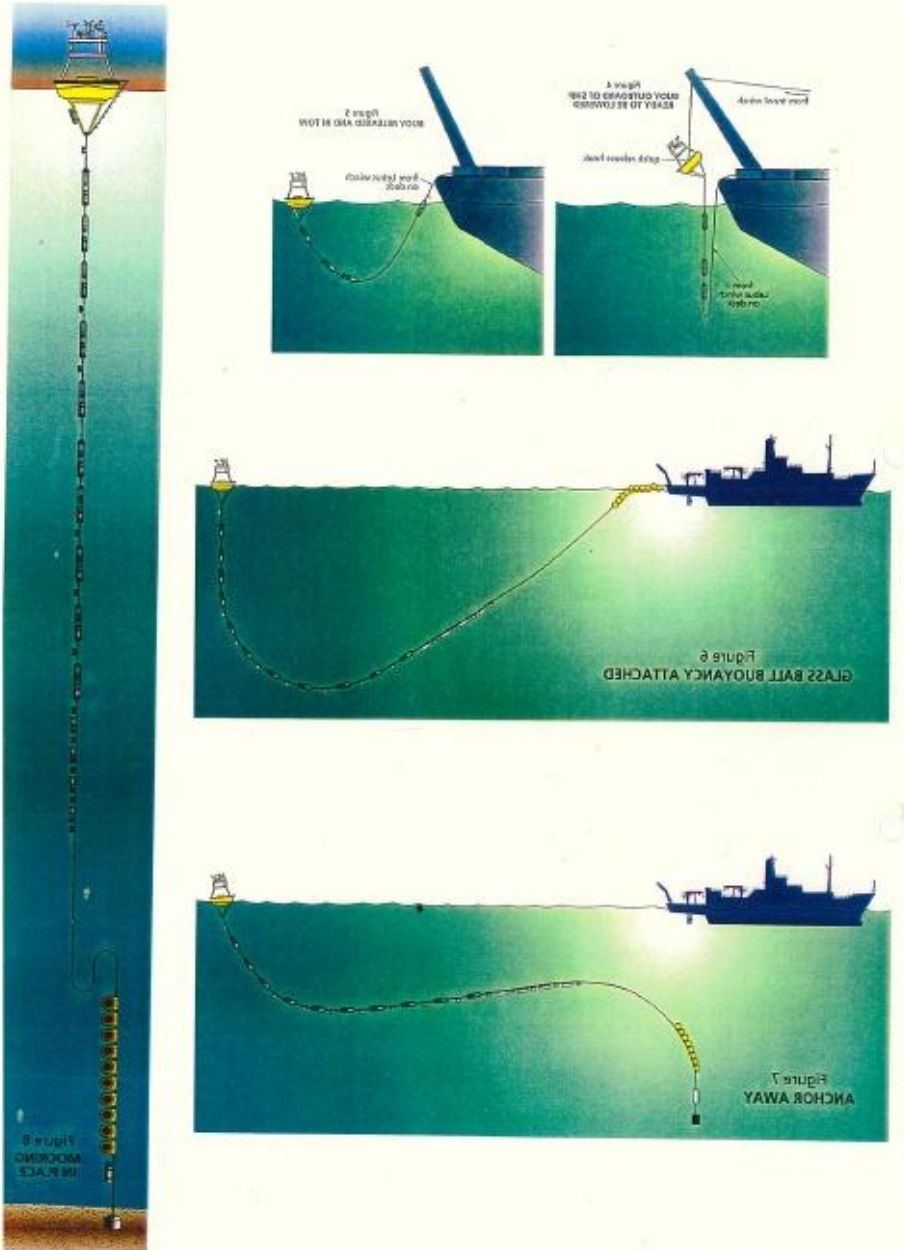


STATUS OF GLOBAL DRIFTER ARRAY

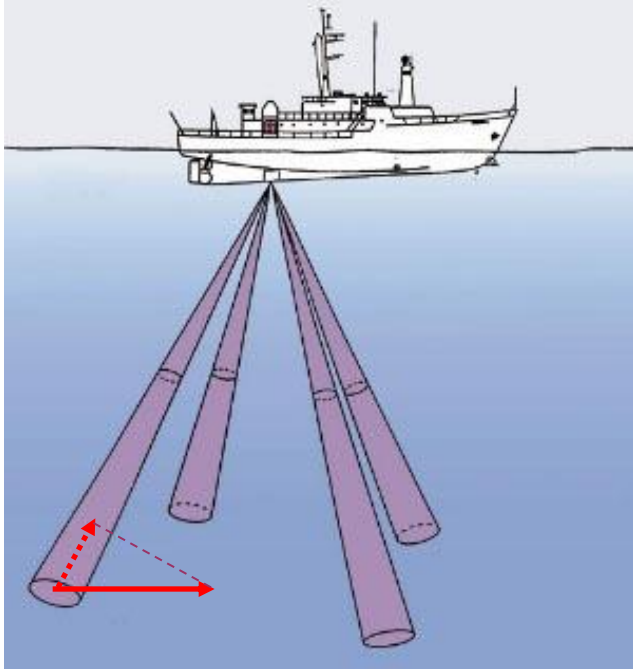


係留系による直接測流

リアルタイムは通信に技術・コスト



ADCP (超音波式ドップラー多層流速計)



船底部に取り付けた送受波器から海中に超音波パルスを発信し、浮遊物や密度の不連続からの反射音を受信することによって流れを測定する。

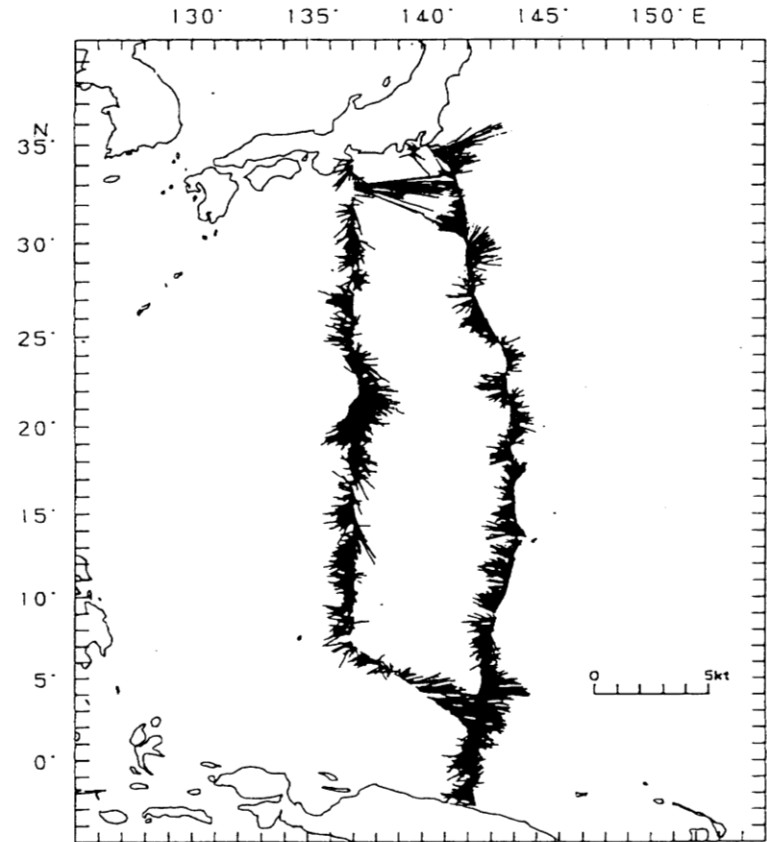
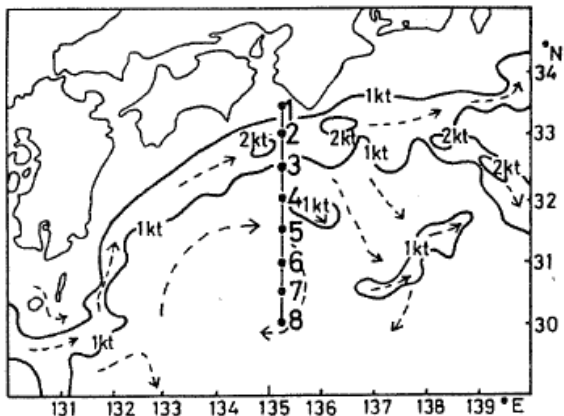
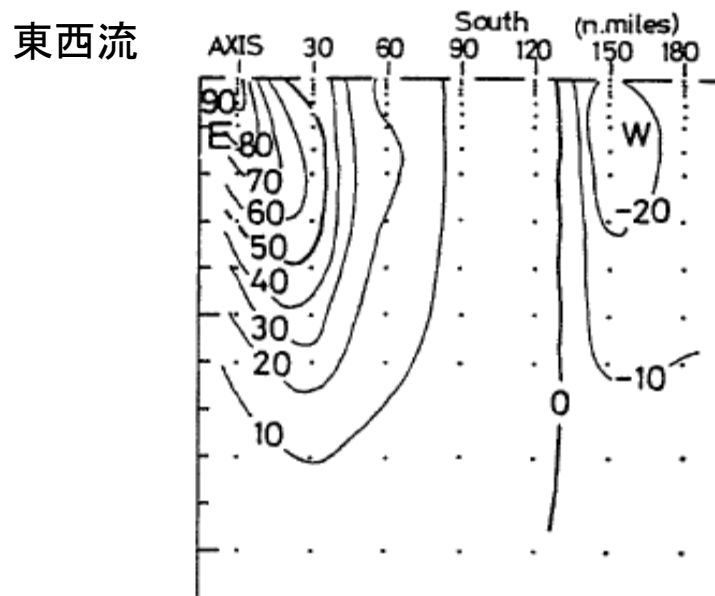
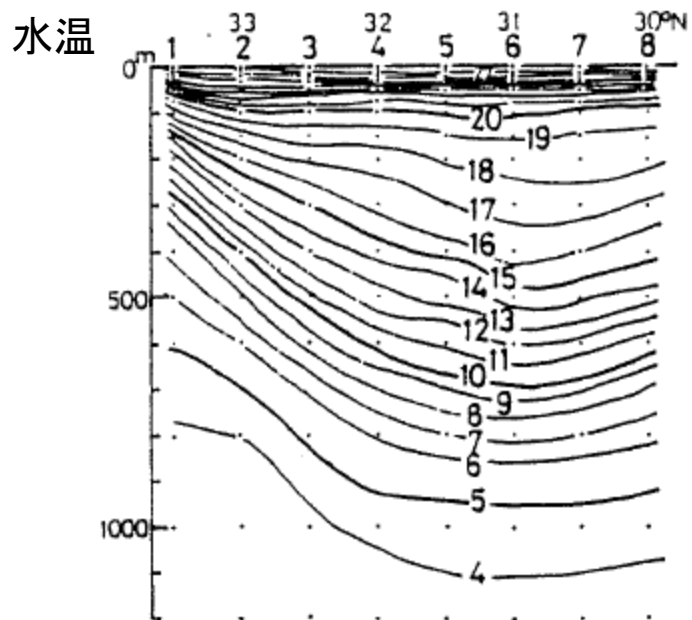


図2 船用ADCPによる表層の海流(深度20m).



- 水温・塩分 → 密度
- 静水圧近似で圧力計算
- 無流面を仮定、地衡流



実測流

閉じた領域にInverse法を適用

中部太平洋150W

南北断面

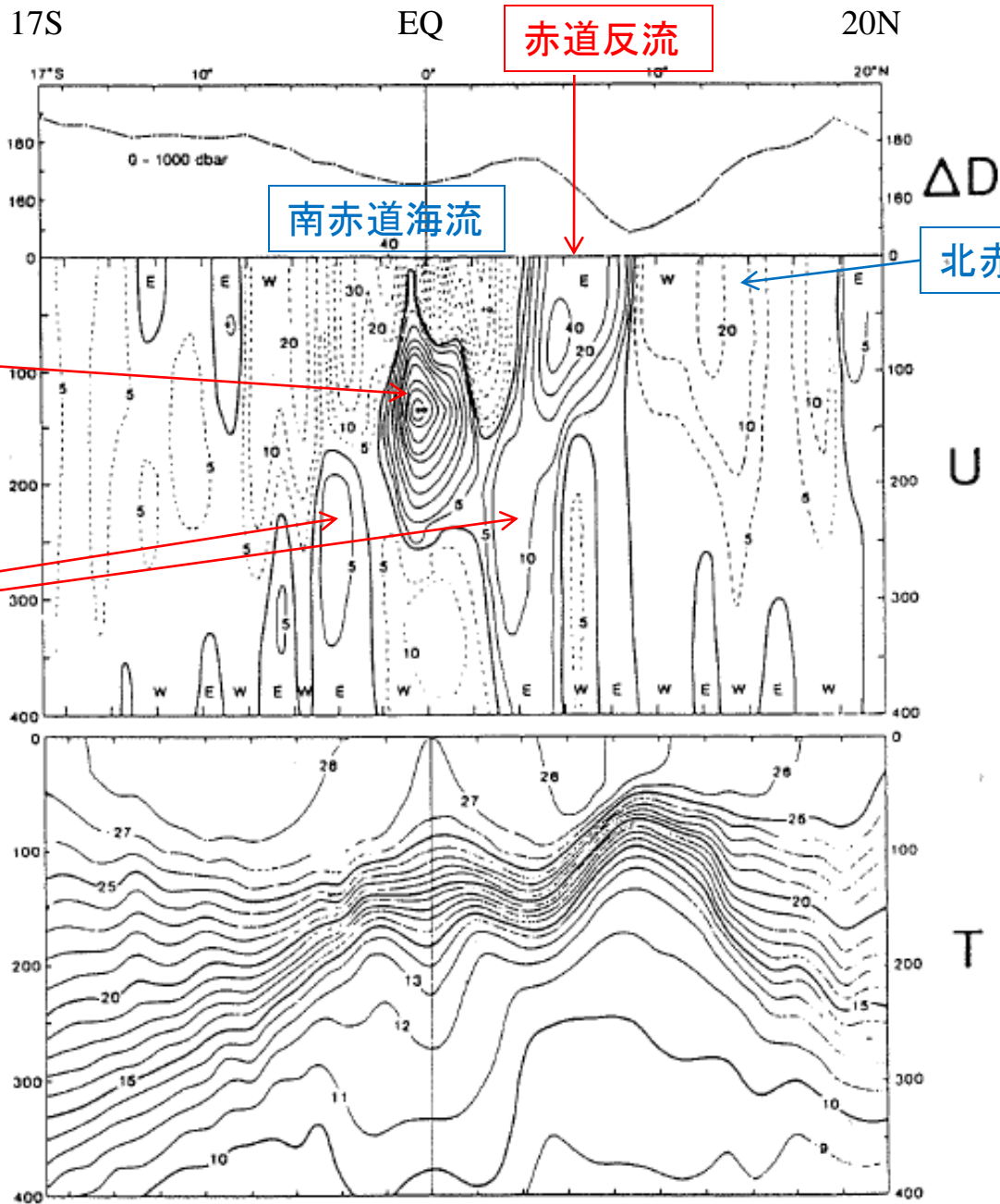


表 8-1 航空機や人工衛星に搭載する主なセンサーとその観測可能な項目

電磁波	タイプ	リモートセンサー	観測項目
可視光	受動型	海色走査放射計	潮目, 海水分布, 汚染度, クロロフィル量
	能動型	レーザー散乱計	微細地面海面構造
	"	レーザー高度計	海面凹凸, さざ波や風波の海面粗度
赤外線	受動型	赤外放射計	地面および海面の温度, 海水分布
マイクロ波	受動型	マイクロ波放射計	海面温度, 表面塩分, 水蒸気, 雲水, 海上風速, 海水分布および水質
	能動型	マイクロ波散乱計	海面微細構造, 汚染油膜, 海上風速
	"	マイクロ波高度計	海面凹凸, 津波, 高潮

2009 SMOS (ESA)

2010 AQUARIUS (NASA)

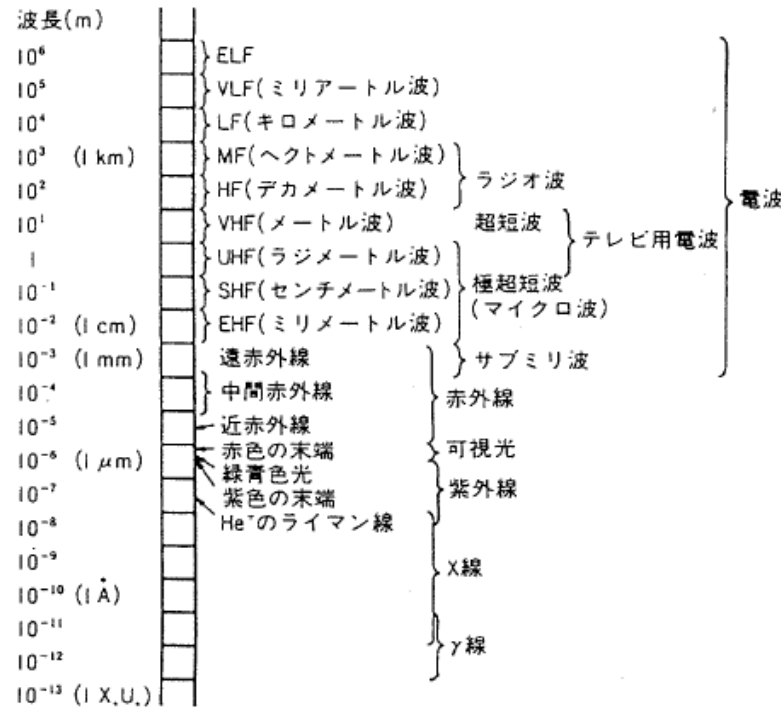


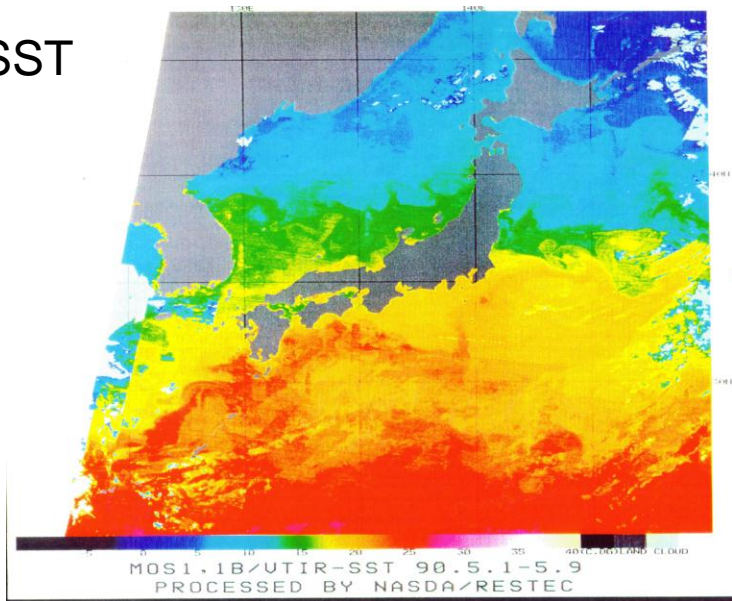
図 1.1 電磁波の波長別の名称

SMOS will provide:

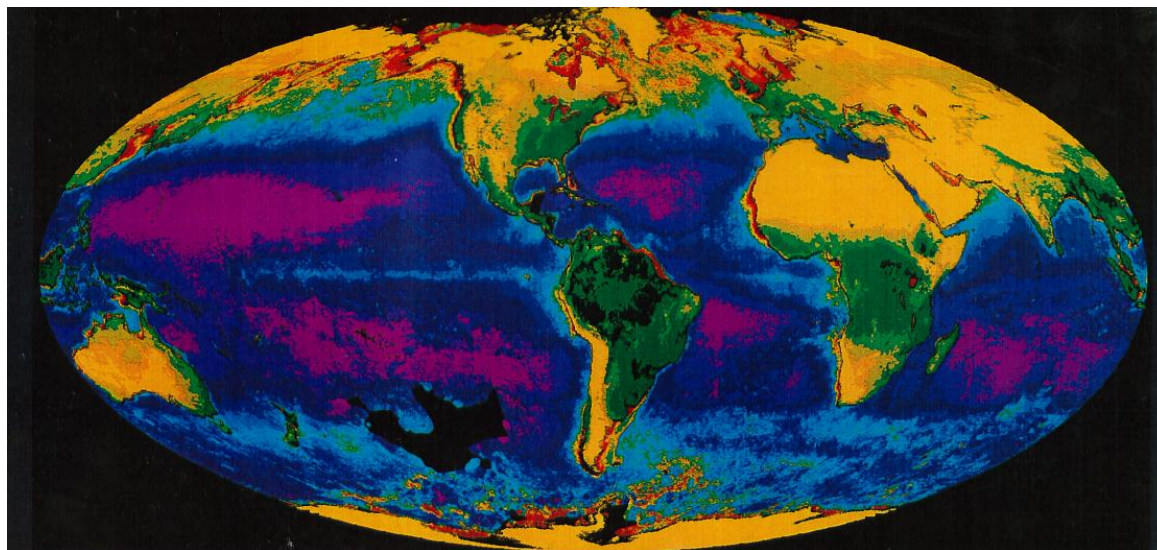
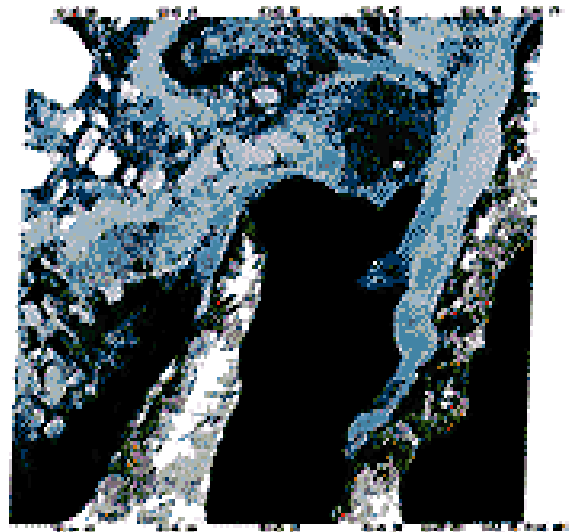
Global maps of soil moisture every three days within an accuracy of 4% at a spatial resolution of 50 km – comparable to detecting one teaspoon of water mixed into a handful of soil.

Global maps of sea-surface salinity down to 0.1 practical salinity units for a 30-day average over an area of 200 × 200 km – comparable to detecting 0.1 g of salt in a litre of water.

SST



海氷



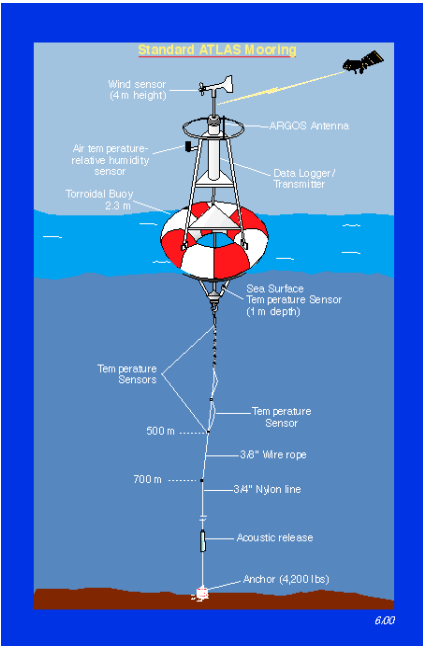
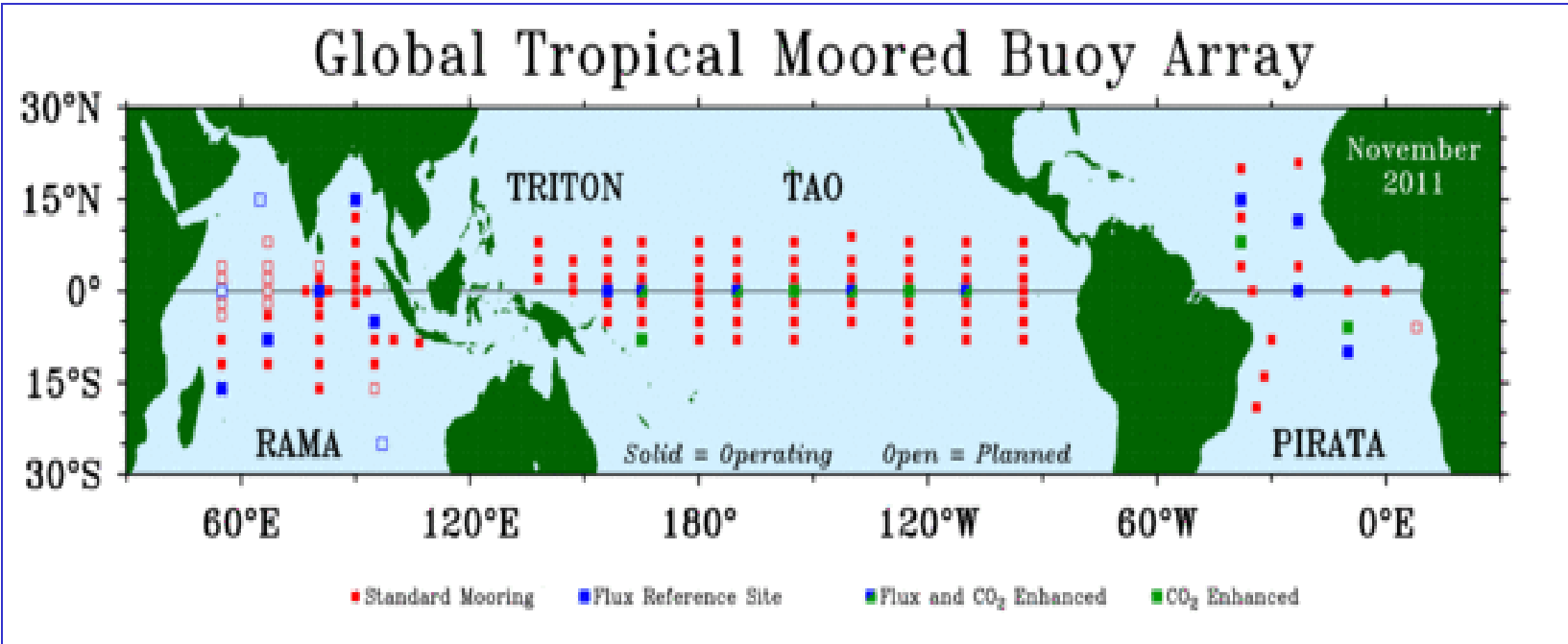
海洋(海色) クロロフィル

* 陸の植生 可視・近赤外

極域でのブルーミング

沿岸湧昇・赤道湧昇

観測ツールの多様化・高度化 ①係留ブイネットワーク



TAO/TRITON

Tropical Atmosphere Ocean project/NOAA

Triangle Trans-Ocean Buoy Network/JAMSTEC

PIRATA

Prediction and Research Moored Array in the Atlantic

RAMA

Research Moored Array for African-Asian-Australian

Monsoon Analysis and Prediction

Tropical Atmosphere Ocean project

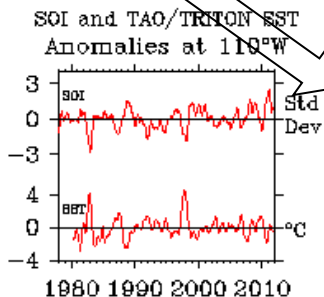
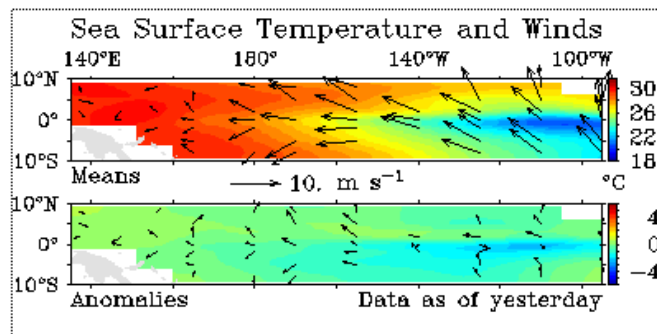
Home Project overview Data display Data delivery El Niño & La Niña Site map



TAO / TRITON Data display

Buoy summary plot Time series plots ? Help
 Lat Lon plots Section plots
 Assorted plots Animation Find

Real-time data from moored ocean buoys for improved detection, understanding and prediction of El Niño and La Niña.



Try our combined [Display and Delivery Page](#) which includes more comprehensive data and features, like the ability to download what you view

[Other TAO graphics pages](#)

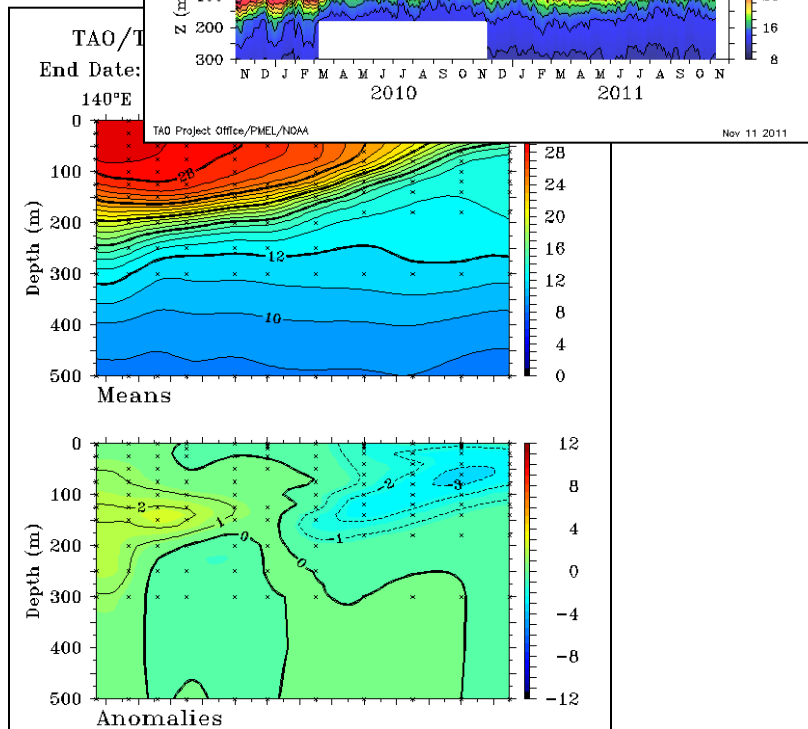
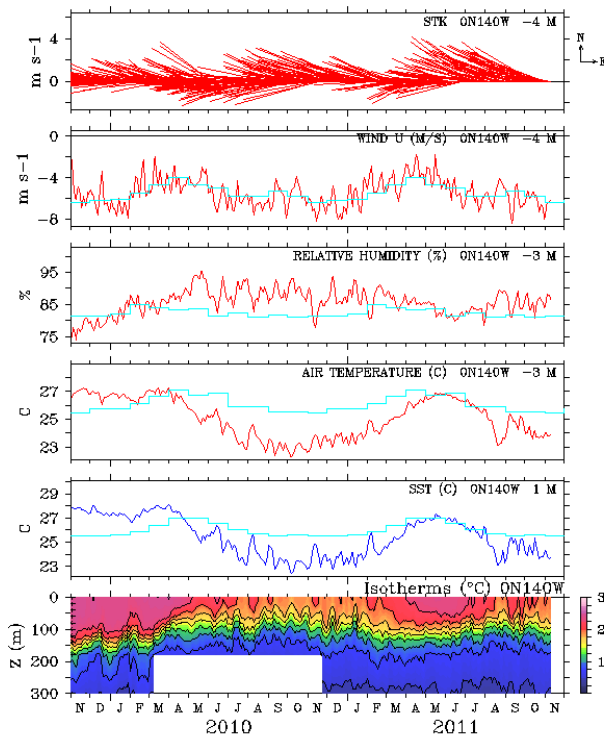
[Troubleshooting](#)

[Non JavaScript version](#)

[Home](#) | [Project overview](#) | [Data display](#) | [Data delivery](#) | [El Niño & La Niña](#) | [Site map](#)

TAO Project Office
 NOAA | Pacific Marine Environmental Laboratory
 7600 Sand Point Way NE

Five-Day Data

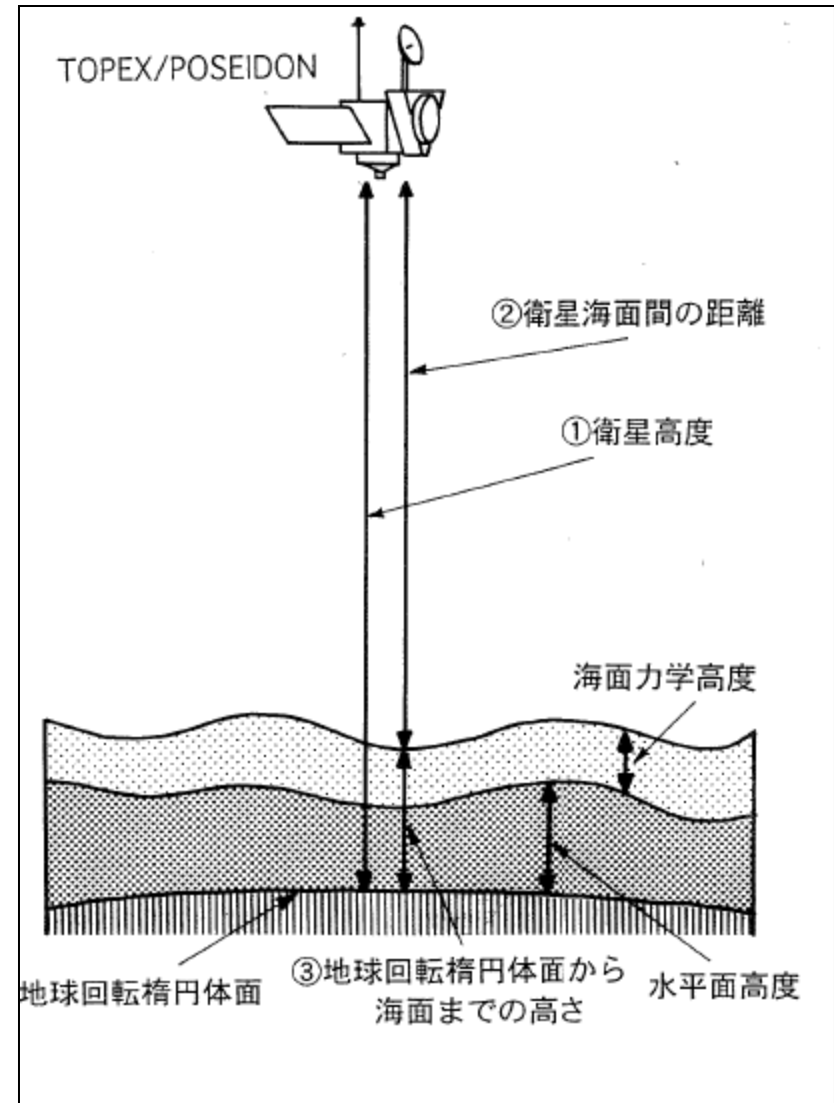
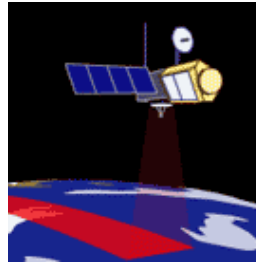


観測ツールの多様化・高度化 ②海面高度計

TOPEX/POSEIDON 1992-2005

JASON-1 2002—

JASON-2 2008—



The second component of the ocean height measurement is the range from the satellite to the ocean surface. Each spacecraft carries a radar altimeter that provides this information: the CNES Poseidon-3 instrument, the latest model on OSTM/Jason-2, emits microwave pulses at frequencies of 13.6 and 5.3 GHz.. To take a measurement, the onboard altimeter bounces these pulses off the ocean surface and measures the time it takes the pulses to return to the spacecraft. This measurement, multiplied by the speed of light, gives the range from the satellite to the ocean surface. After correction for atmospheric and instrumental effects, the range measurements are accurate to less than 3 centimeters. The range measurements are subtracted from POD-derived estimates of the satellite orbital height, resulting in ocean height measurements that are good to 3 centimeters (just over 1 inch) relative to the center of the Earth.

Ocean Surface Topography From Space

Search Go

Home

Overview

Science

Science Objectives
El Niño/La Niña & PDO

- Latest El Niño/La Niña Watch Data
- Historical El Niño/La Niña Watch
- Learn More About El Niño/La Niña & PDO
- Pacific Decadal Oscillation (PDO)
- PDO in the Press - News Items
- El Niño/La Niña & PDO Links

Societal Benefits
Literature Database
OST Science Team
Monthly Time Series
The Tandem Mission

Technology

Missions

Newsroom

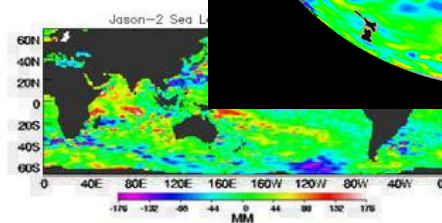
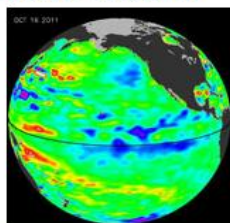
Education

Gallery

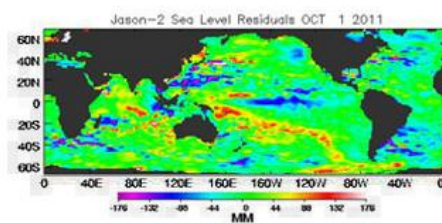
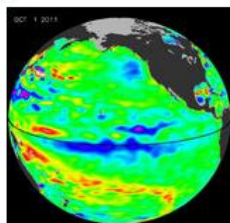
SCIENCE

Latest El Niño/La Niña Watch Data

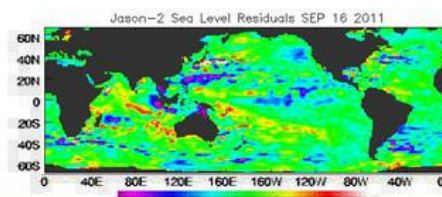
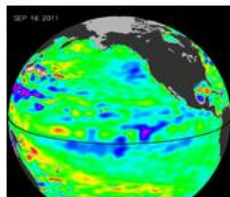
LATEST IMAGES - 10/16/2011



10/01/2011

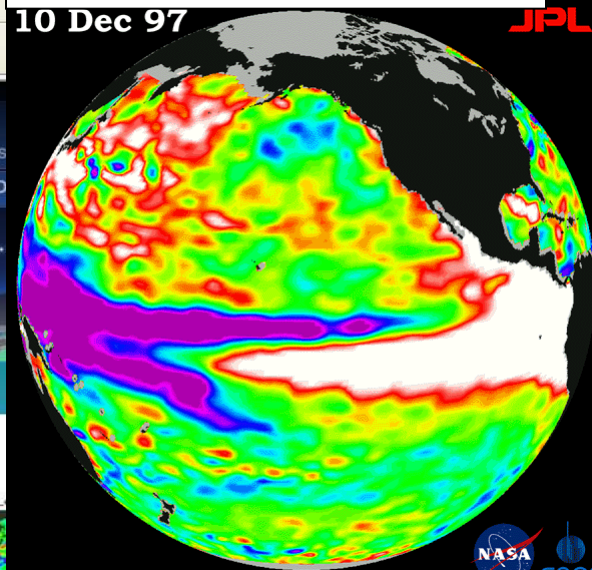


09/16/2011



観測史上最大の97/98エル
ニーニョ最盛期

10 Dec 97



海面水位偏差(彩色)と風応力偏差(ベクトル)の推移

・季節内振動にともなう

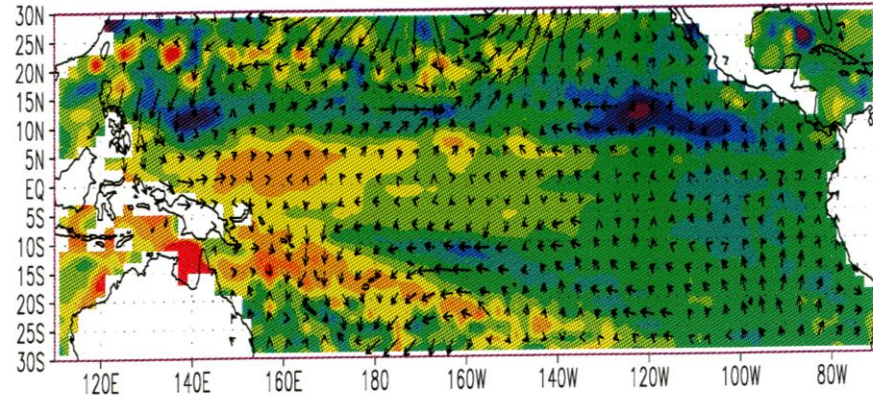
西風偏差

→

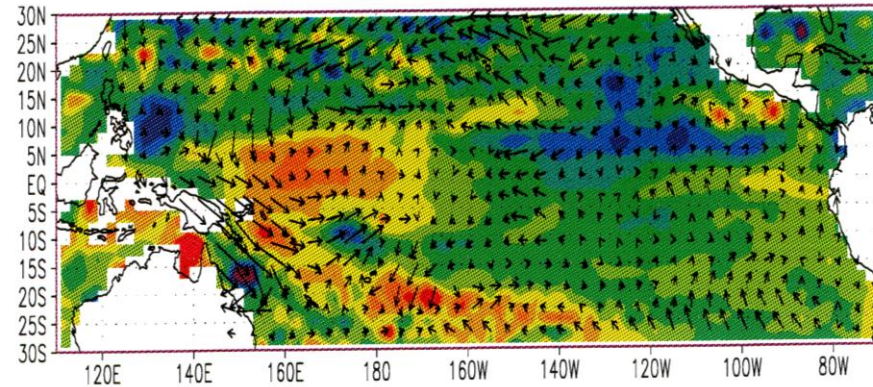
・表層水温の正偏差の

発生と東進

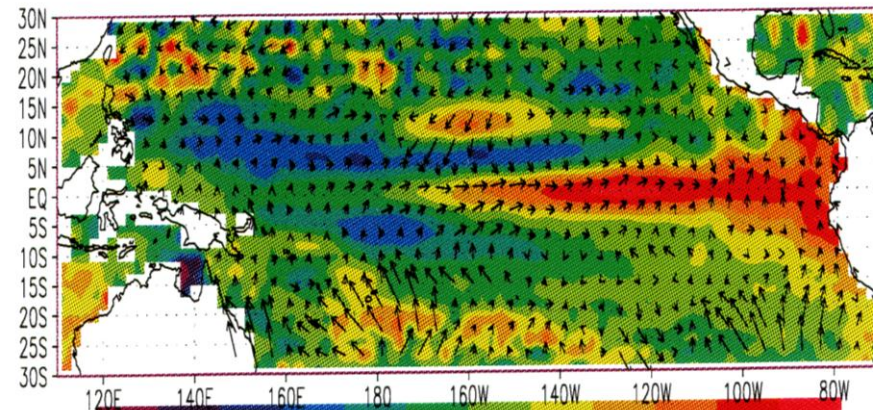
1996年
12月



1997年
3月



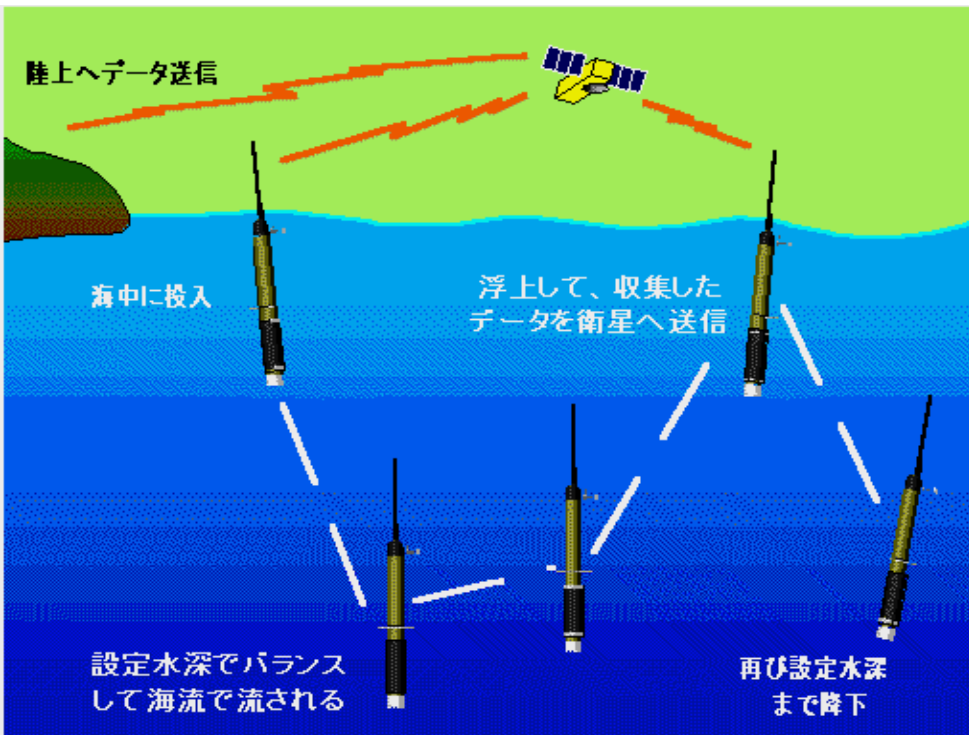
1997年
6月



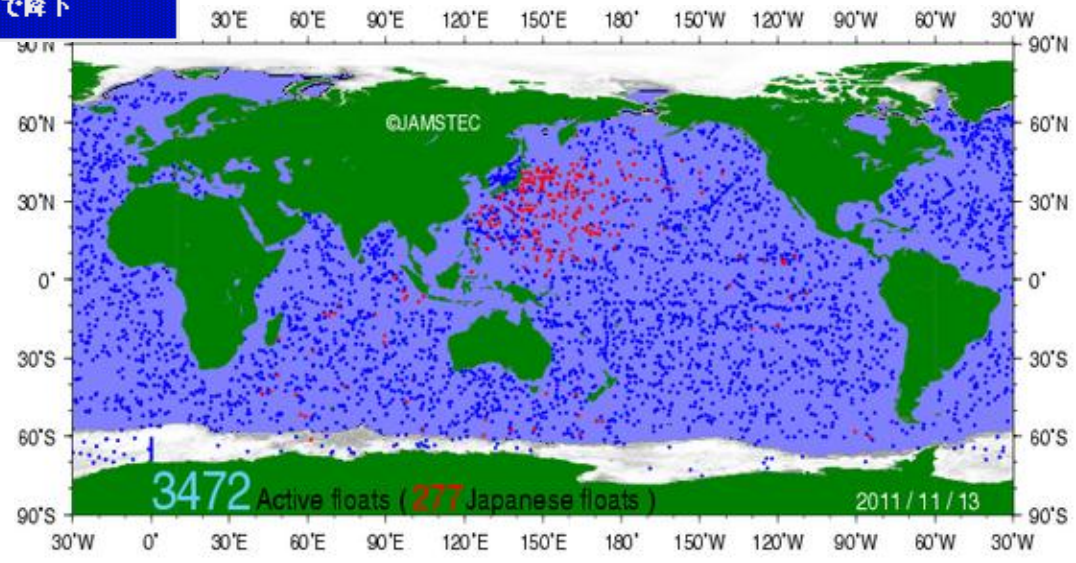
-25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25

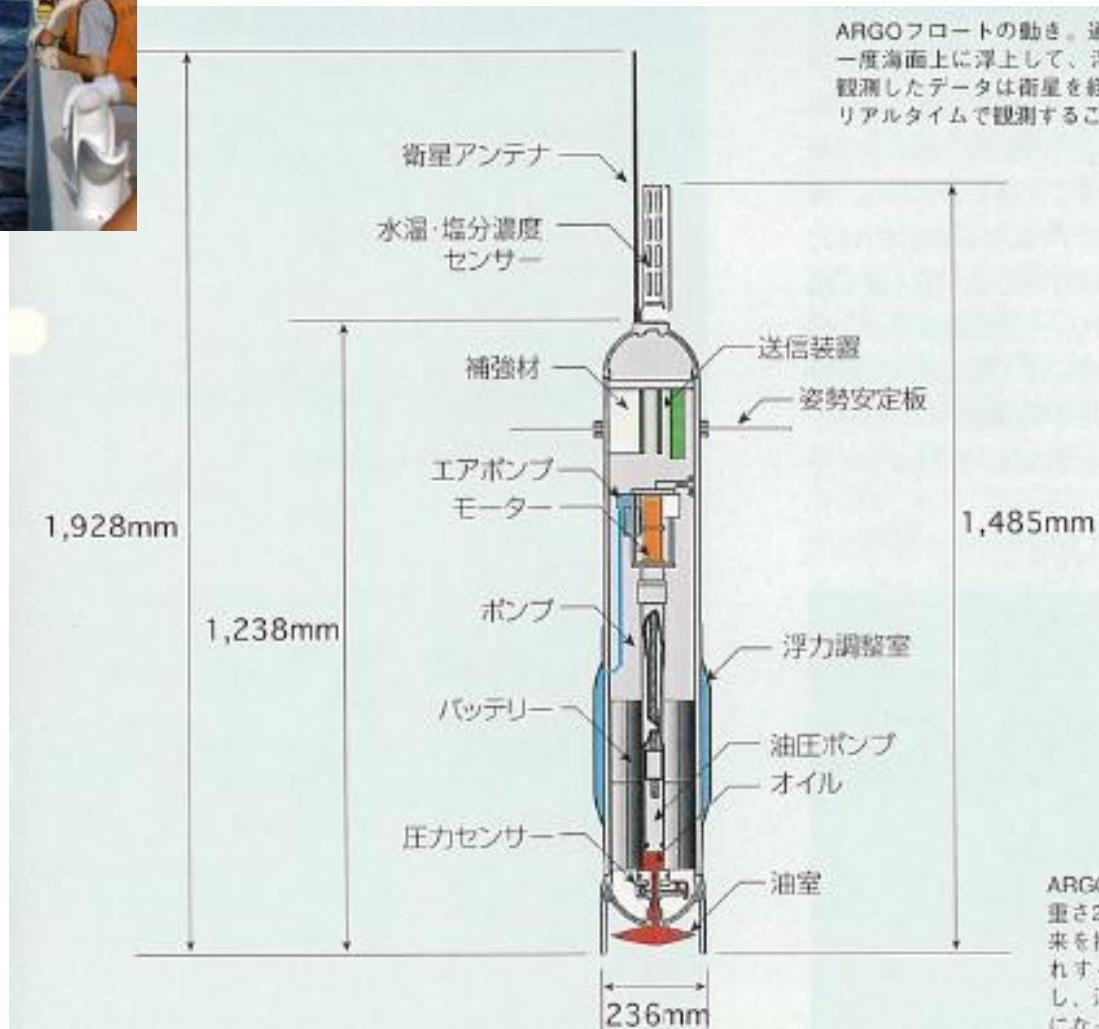
観測ツールの多様化・高度化 ③Argoフロート

A Global Array for Temperature/Salinity Profiling Floats



水温・塩分のリアルタイム観測
 3000個 (300kmx300kmに1基)
 漂流深度(1000m)、10日に1度観測

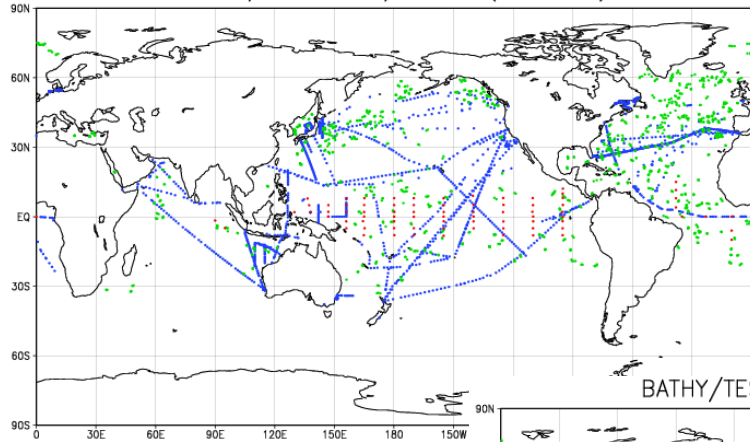




ARGOフロートの動き。通常は水深2,000mを漂流し、10日に一度海面上に浮上して、浮上中に水温・塩分濃度を観測する。観測したデータは衛星を経由して入手。全世界の海洋データをリアルタイムで観測することができる画期的な観測システムだ

ARGOフロートの構造断面図。全長約2m、重さ20kgのこのフロートが海洋観測の未来を担う。油室にポンプでオイルを出し入れすることによりフロートの体積が変化し、浮力が変化して浮上・沈降する仕組みになっている。

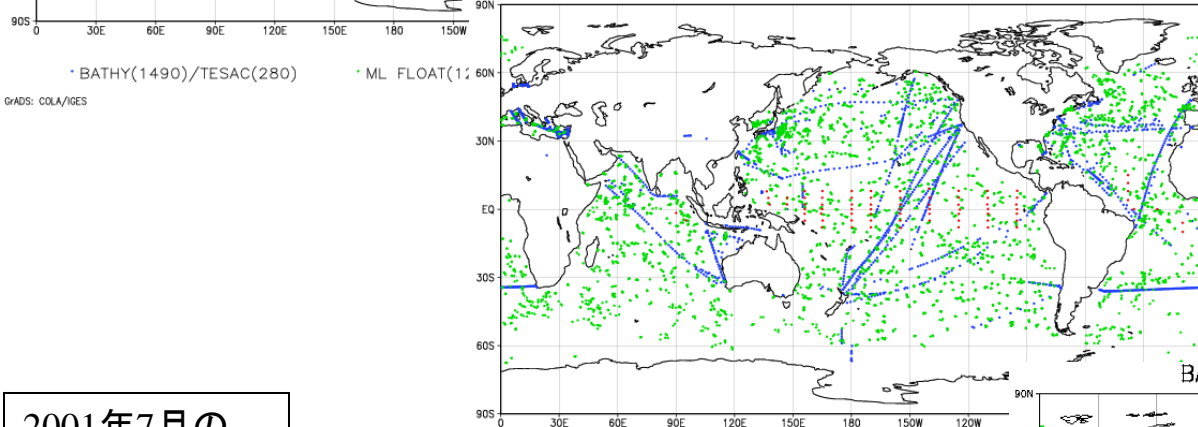
BATHY/TESAC TAO/TRITON (DEC2001)



準リアルタイムの表層水温データの増加

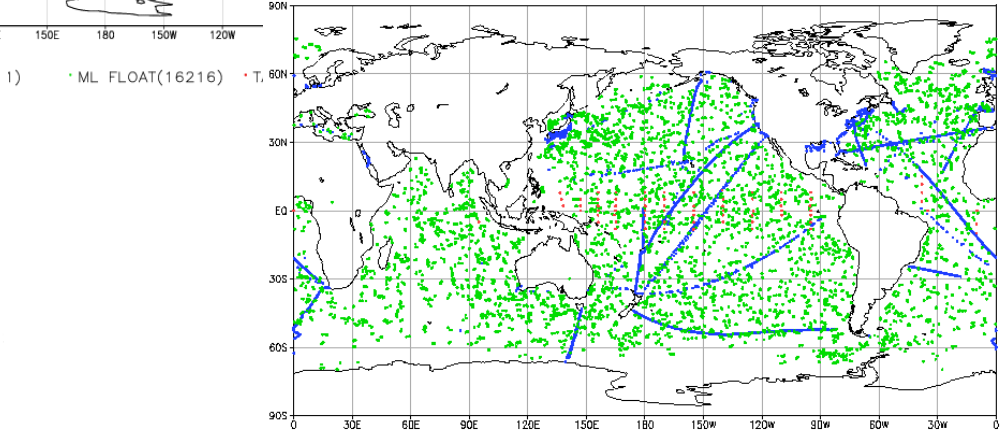
- ・エルニーニョ予測
- ・貯熱量監視

BATHY/TESAC TAO/TRITON (DEC2004)



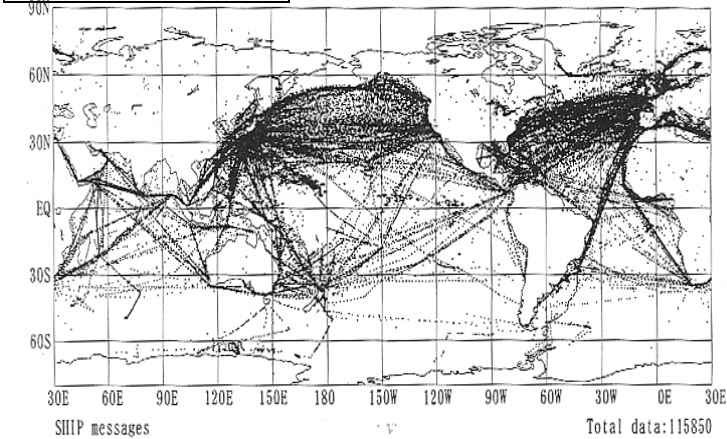
BATHY(1490)/TESAC(280) ML FLOAT(11216)

BATHY/TESAC TAO/TRITON (DEC2007)



1) ML FLOAT(16216) TESAC(112803) TAO/TRITON(34929)

2001年7月の SST Ship報



SHIP messages Total data:115850

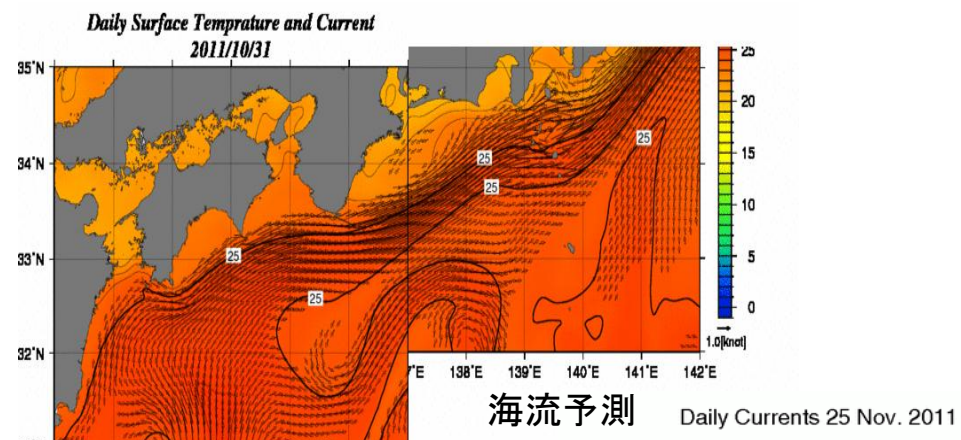
データ同化技術の高度化

Operational oceanography

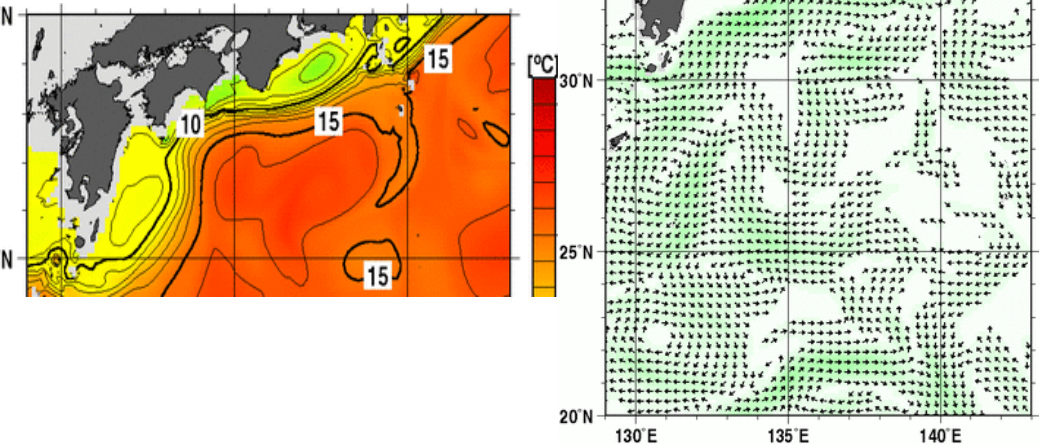
海の天気予報

熱帯海況の監視・予測

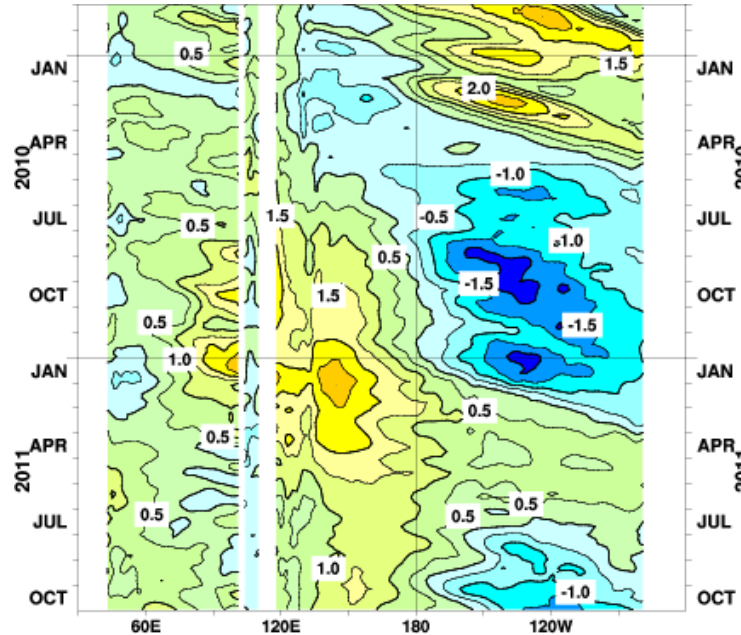
日本近海の海況情報



400m水温分布



300m平均水温東西時間変化



NINO3 SST

