

# 海洋大循環のシミュレーション研究 — 過去・現在・そして未来 —

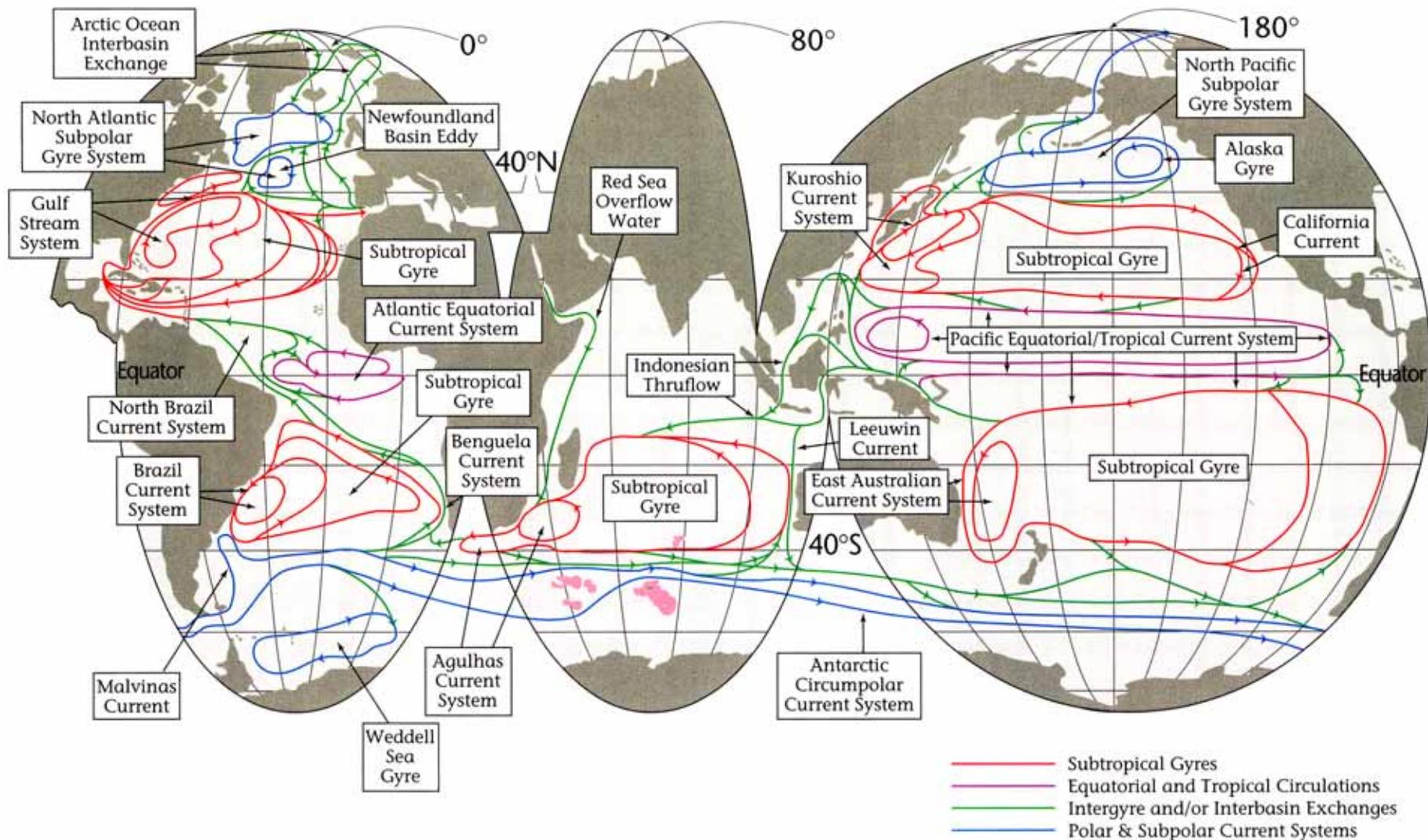
**鍵本 崇**

独立行政法人海洋研究開発機構  
地球環境フロンティア研究センター

# もくじ

- 海洋モデルの始まりと全球海洋循環シミュレーションの歴史
- 地球シミュレータと海洋シミュレーション
- これからの海洋シミュレーション

# 表層の海洋循環 (模式図)



Schmitz (1996)

# 海洋モデルの始まり

- K.Bryan (1963) : 順圧モデル
- K.Bryan (1969) : 多レベルモデル
- A.Sarkisyan (1955) : 診断モデル
- H.Friedrich (1967) : 多レベルモデル
- K.Takano (1974, 1975) : 多レベルモデル

# Sarkisyan and Ivanov (1971)の診断モデルの結果

## 平坦な海底地形を考慮した地形・成層を考慮

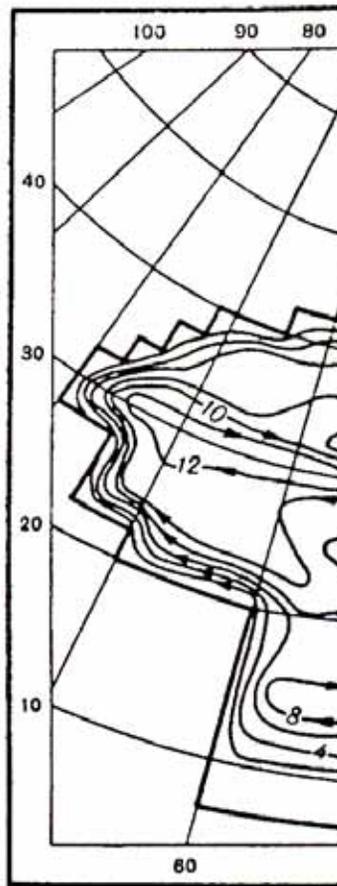


Fig. 2. Total flow function  $\psi \cdot 10^{-6}$  (m<sup>3</sup>/sec) of a homogeneous sea water model.

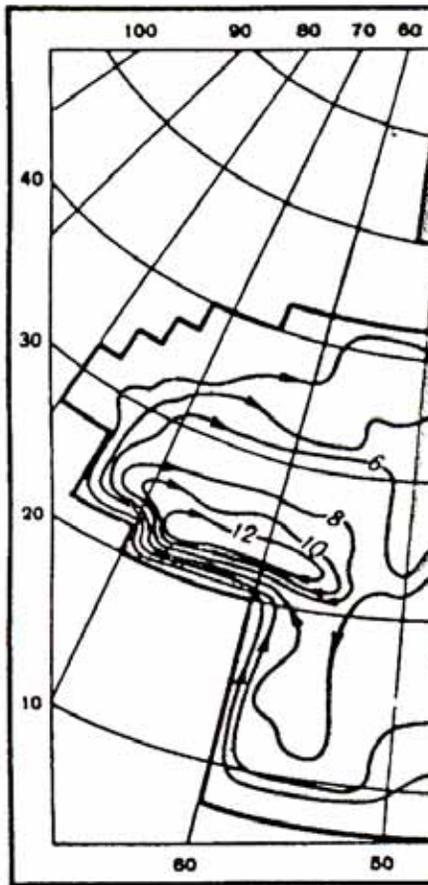


Fig. 3. Total flow function  $\psi \cdot 10^{-6}$  (m<sup>3</sup>/sec) of a homogeneous sea water model with bottom relief taken into account.

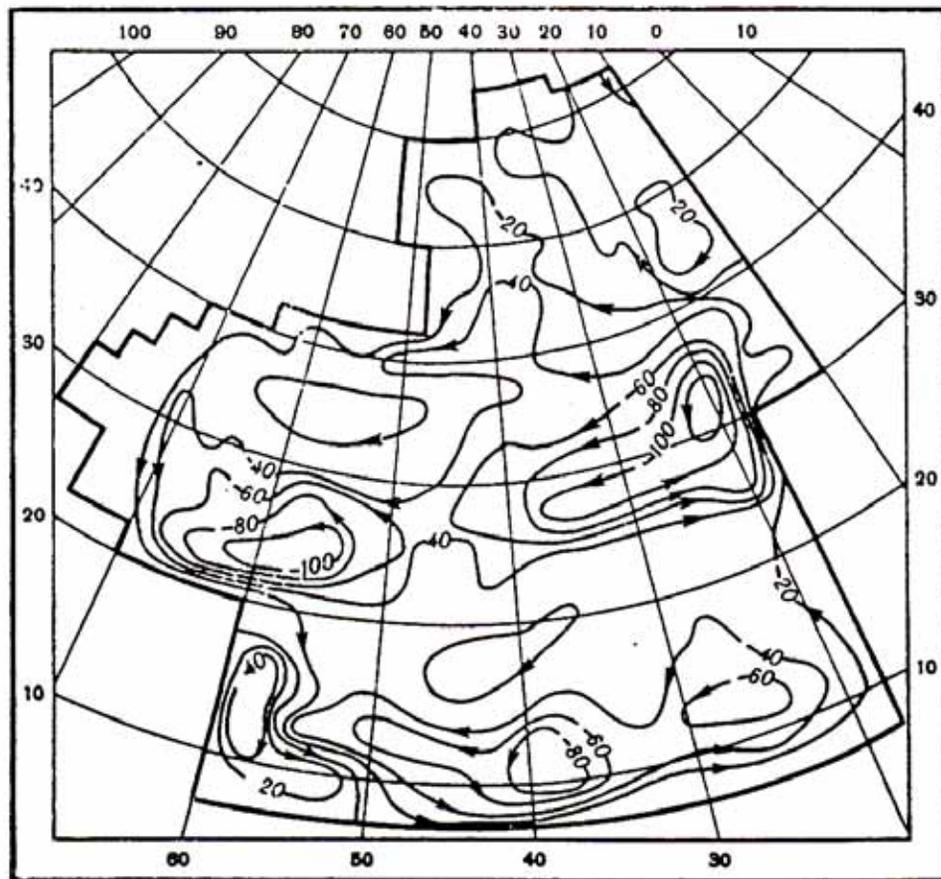


Fig. 4. Total flow function  $\psi \cdot 10^{-6}$  (m<sup>3</sup>/sec) when the joint effect of bottom relief and baroclinicity of the sea water are taken into account.

# K.Bryan (1963)の順圧モデルによる 西岸境界流の数値実験

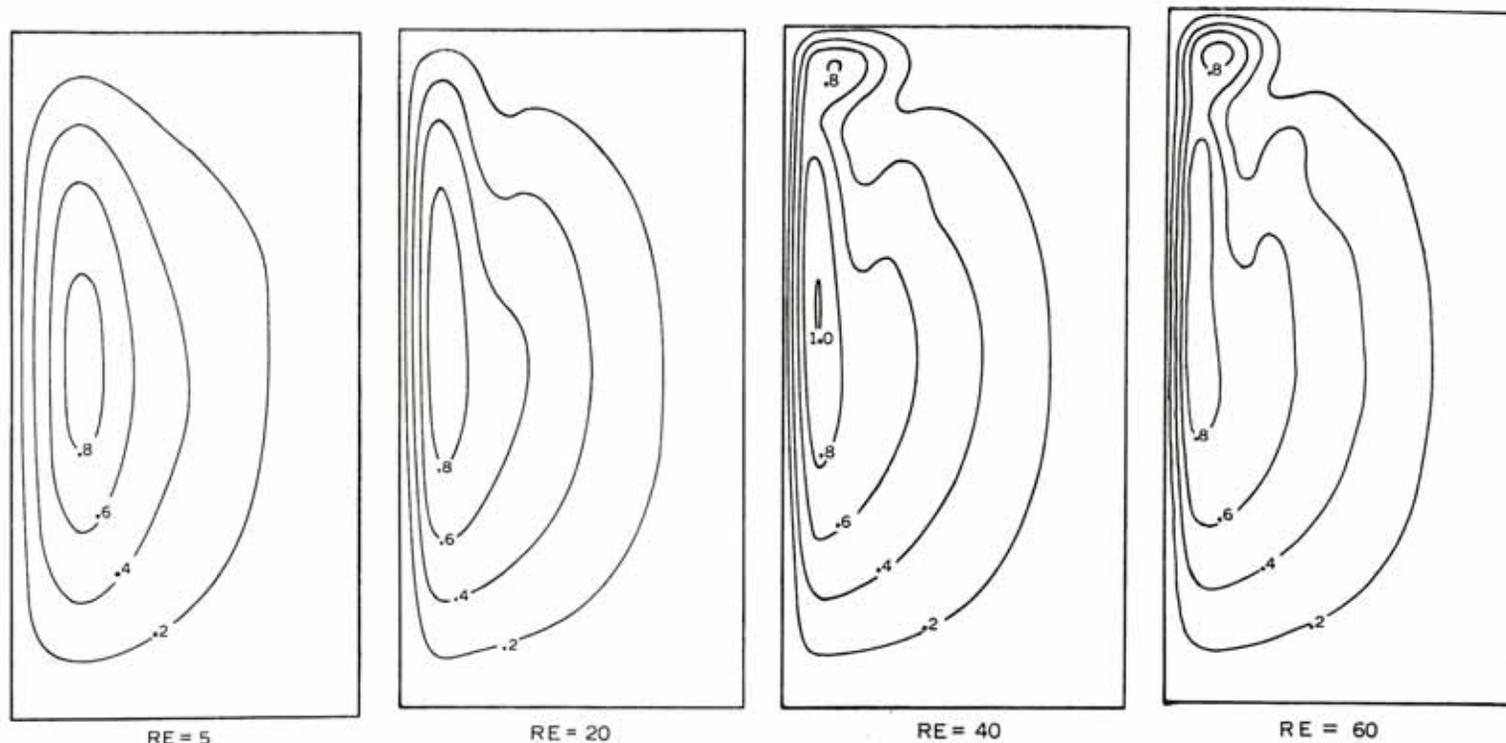
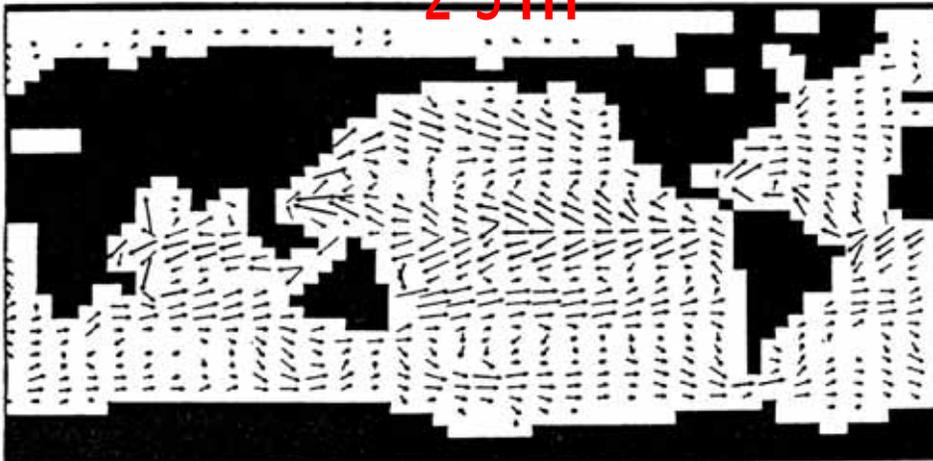


FIG. 4. Patterns of the transport stream function,  $\Psi'$ , obtained from a time average of solutions with  $\epsilon=1.28 \times 10^{-3}$  and 4 values of Re. For the cases Re=5 and 20 the finite difference interval was  $\Delta S=1/20$ , for Re=40 and 60,  $\Delta S=1/40$ .

# Bryan et al. (1975) の結合モデルの結果

25 m



169 m

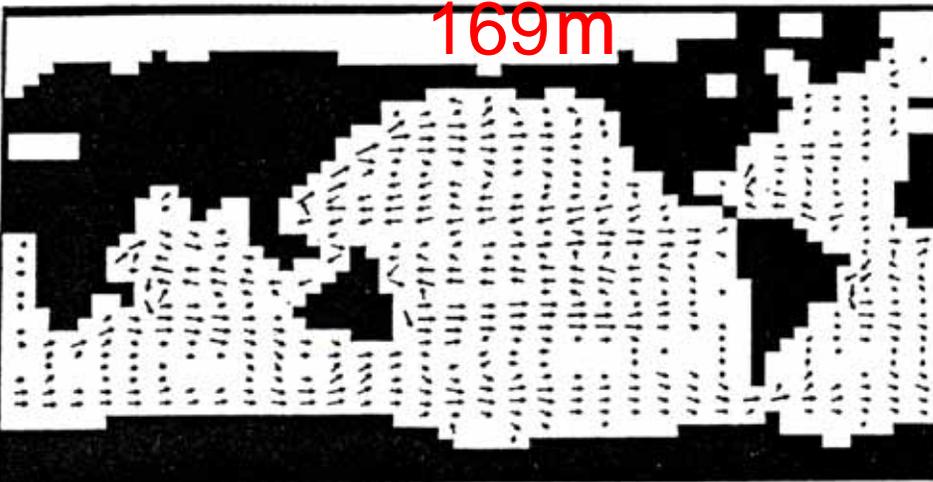
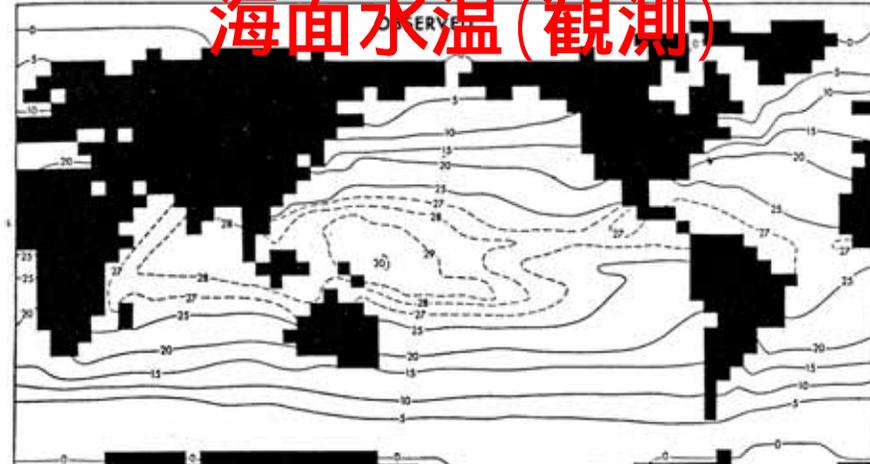


FIG. 6b. Velocity vectors at 25 m (top) and 169 m (bottom) in the model. Maximum currents in the Kuroshio are  $30 \text{ cm s}^{-1}$ . Heavy arrows represent currents of twice the velocity relative to thin arrows of the same length.

海面水温 (観測)



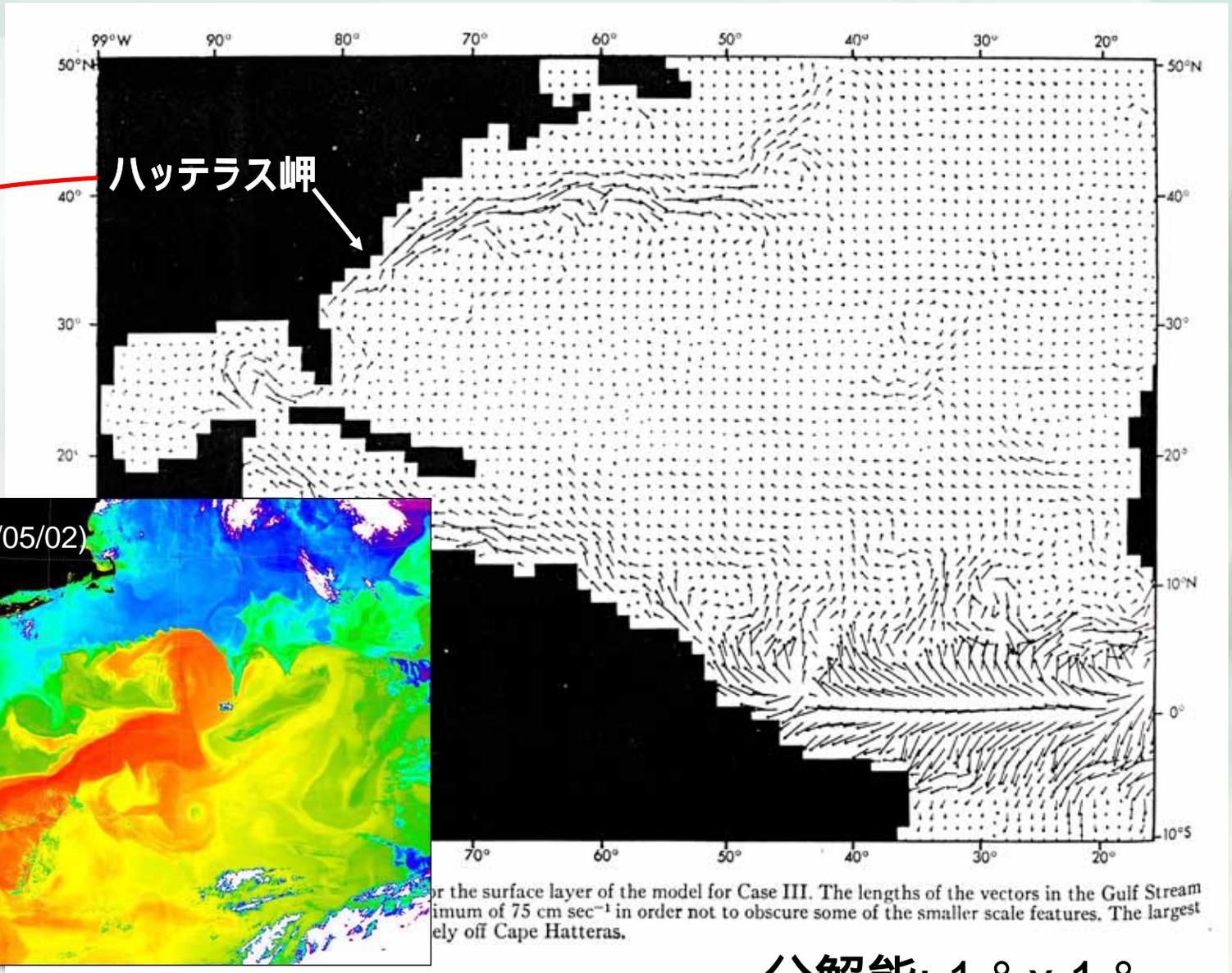
海面水温 (計算)



FIG. 7. Observed (a) and model computed (b) annual averaged surface temperatures.

分解能:  $5.625^\circ \times 5^\circ$

# Holland and Hirschman (1971) の領域モデル



# 大循環モデルの整備

(1980年代から現在まで)

## z座標系モデル

Bryan-Semtner-Cox model (MOM)

OPA

HOPE

COCO

座標系 (鉛直境界適合格子系)

Princeton Ocean Model (POM)

SPEM SCRUM ROMS/TOMS

## 密度座標系

OPYC 消滅?

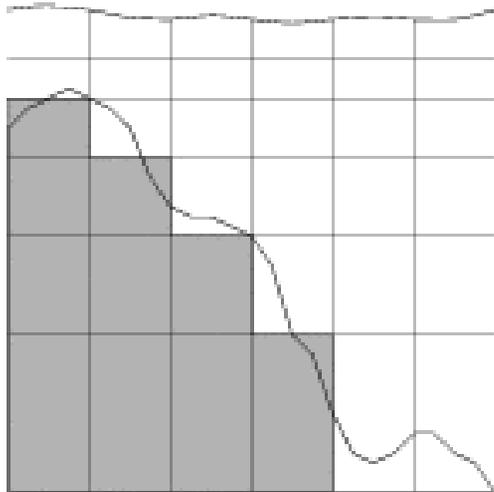
MICOM HYCOM

Hallberg Isopycnal Model (HIM)

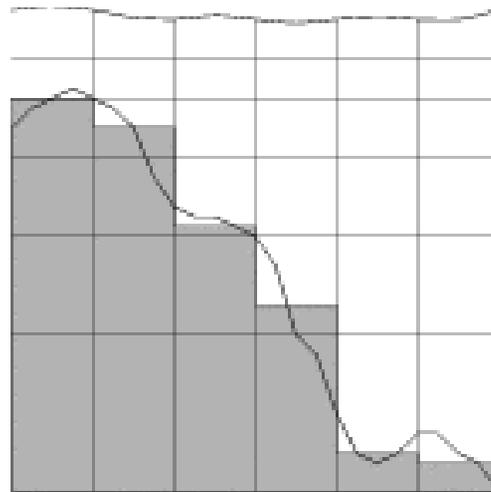
NLOM

# 鉛直座標系

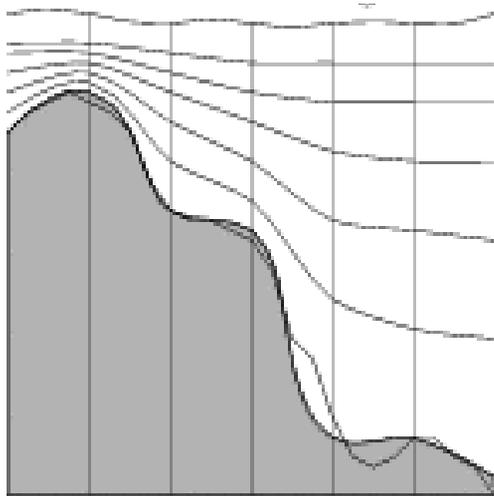
z-coordinate (step)



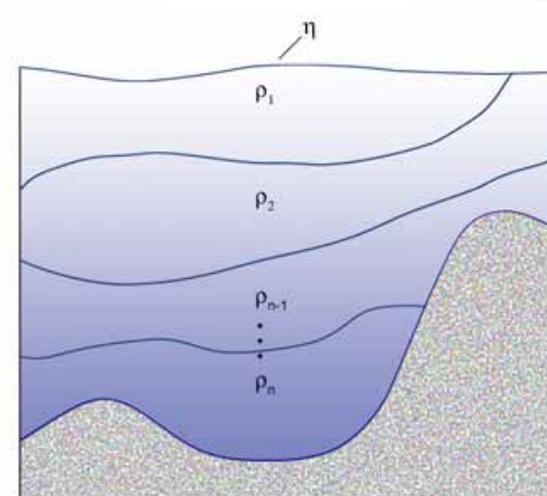
z-coordinate (partial cell)



terrain-following



isopycnal



# 数値計算研究の方向性

- 全球規模の海洋を対象、粗い(300 ~ 500km)格子
- 大西洋、太平洋のbasinを対象、中程度(50 ~ 200km)の格子
- 外洋の一部(沿岸付近)、湾などを対象、細かい(1 ~ 25km)格子
- 格子点数はいずれも $O(10^4 \sim 10^6)$ 程度

# 全球海洋大循環シミュレーションの飛躍

- Cox (1975)  
2° × 2°, 9レベル, 2.3年積分
- Semtner and Chervin (1988, 1992)  
½° × ½°, 20レベル, 32.5年積分  
Cray X-MP/4で250hrs (最初の20年積分) Y-MP
- Stammer et al. (1996)  
0.4° × 0.4° (赤道) ~ 0.1° (75° NS), 20レベル(?),  
1986-1989 (monthly forcing), 1987-1994 (daily forcing)  
Cray Y-MP/8
- Maltrud et al. (1998)  
0.28° × 0.28° (赤道) ~ 0.06° (75° NS), 20レベル  
1985-1995 (3-day forcing)

# Semtner and Chervin (1988)の結果

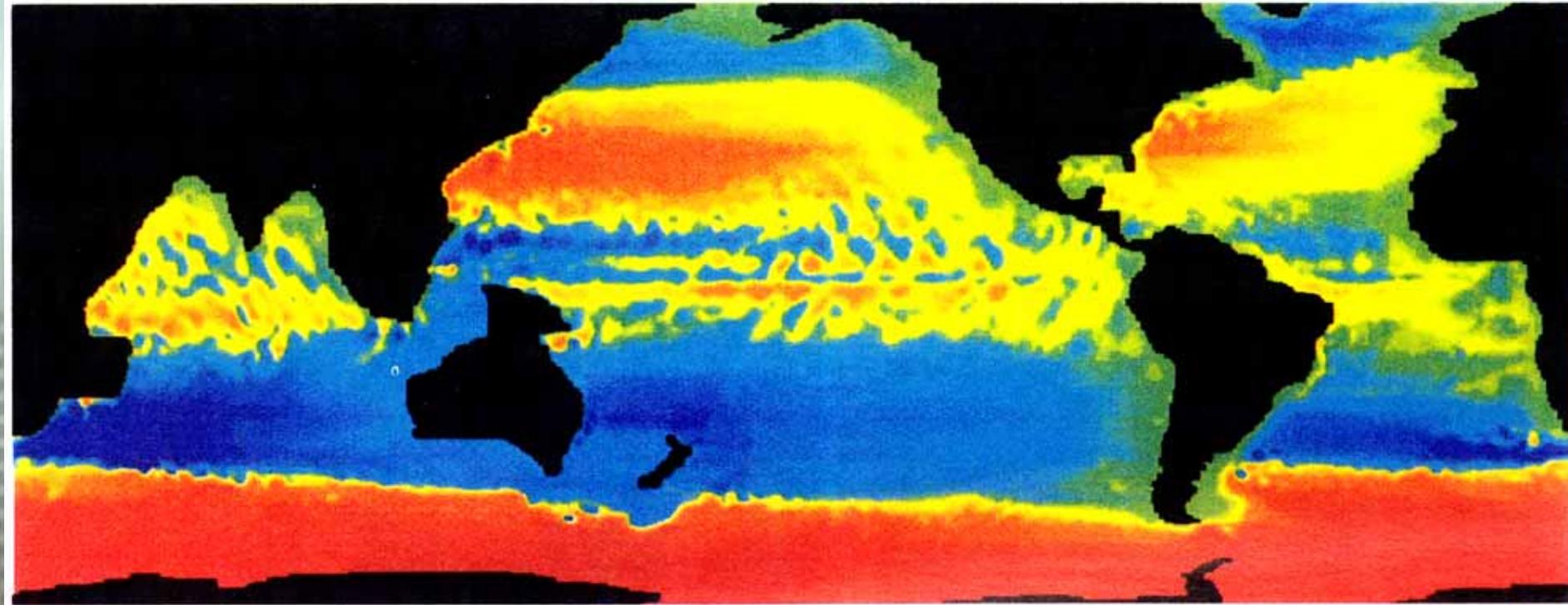
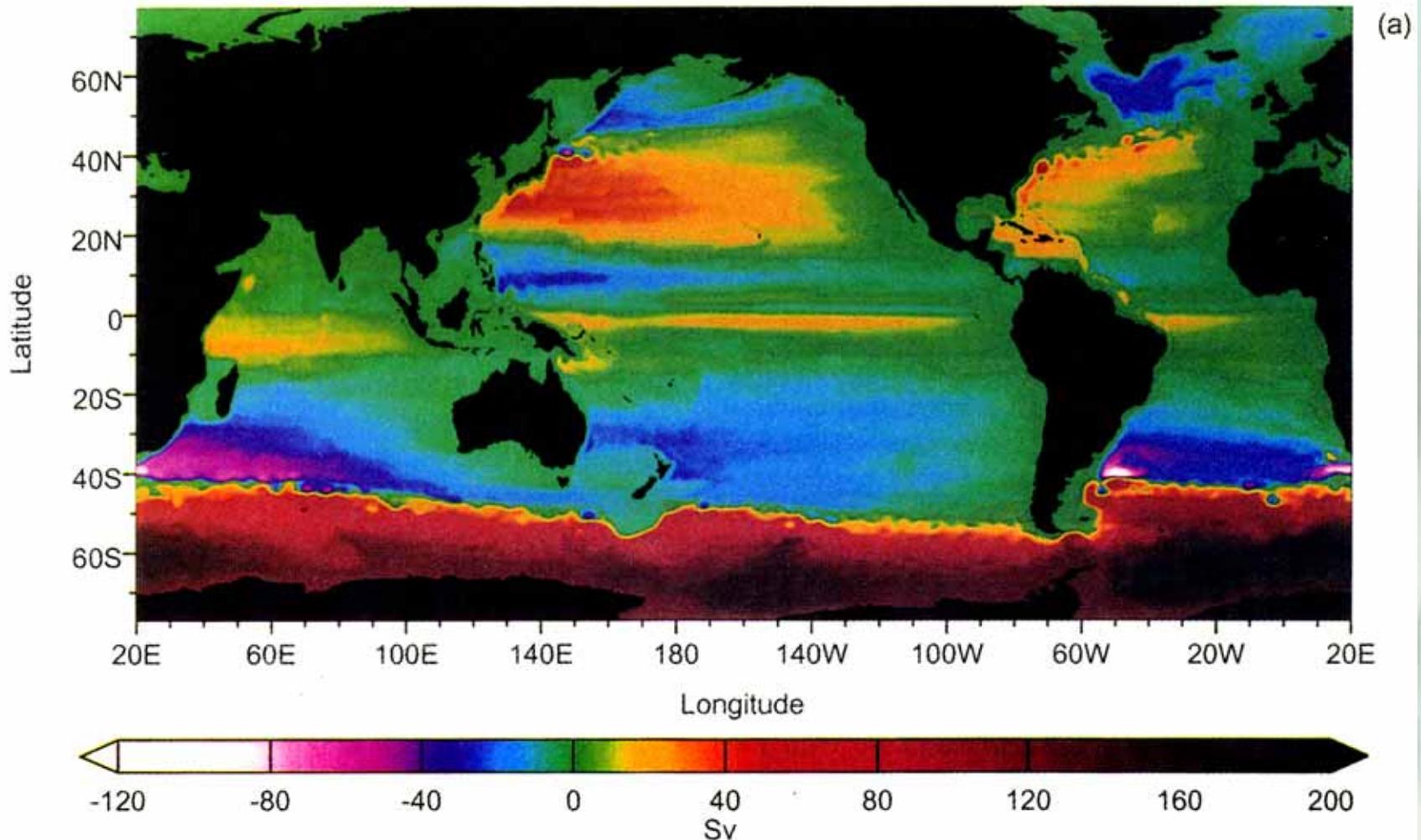


Plate 12 [Semtner and Chervin]. (top) Global temperature at 160-m depth and (bottom) global volume transport stream function. The interconnectivity of the thermocline warm water masses of the global ocean through eddy and mean currents is apparent.

# Multrad et al. (1998)の結果

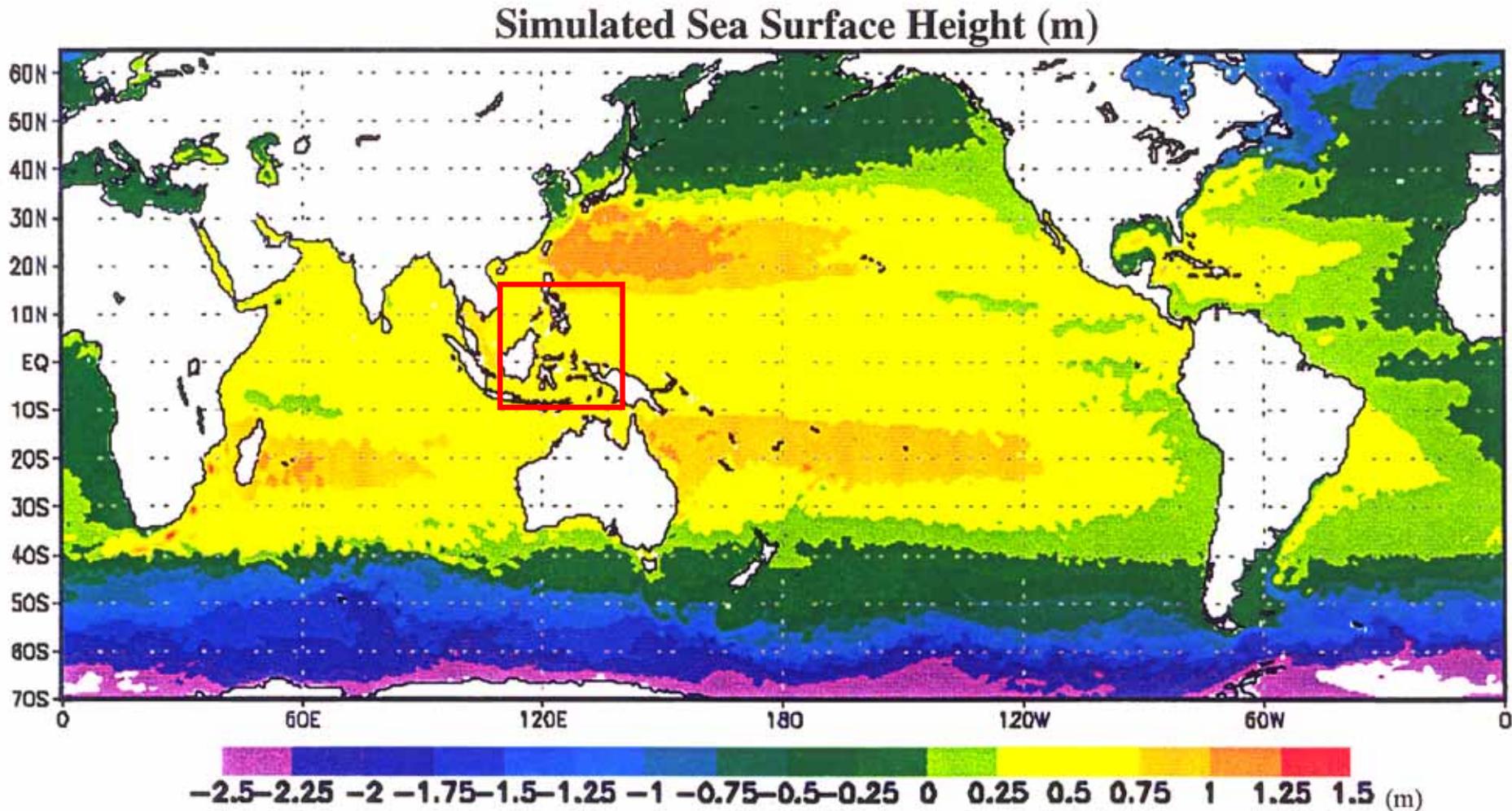


**Plate 2.** (a) The diagnosed barotropic transport stream function from POP11. (b) The transport stream function implied by the Sverdrup balance ( $\beta \mathbf{V} = \mathbf{k} \cdot \nabla \times \boldsymbol{\tau}$ , where  $\boldsymbol{\tau}$  is the windstress and  $\mathbf{V}$  is the vertically integrated velocity) obtained by integrating the curl of the wind stress westward from the eastern boundaries (except in the ACC region south of the South America, where it is not calculated).

# 全球海洋大循環シミュレーションの飛躍(続)

- Webb et al. (1998)  
1/4 ° × 1/4 ° , 36レベル, 12年積分
- Kagimoto et al.(1998)  
1/6 ° × 1/6 ° , 20レベル, 16年積分  
NWT(数値風洞) 64PEs

# 数値風洞を用いた Kagimoto et al.(1998) の結果



# 数値風洞を用いた Kagimoto et al.(1998) の結果

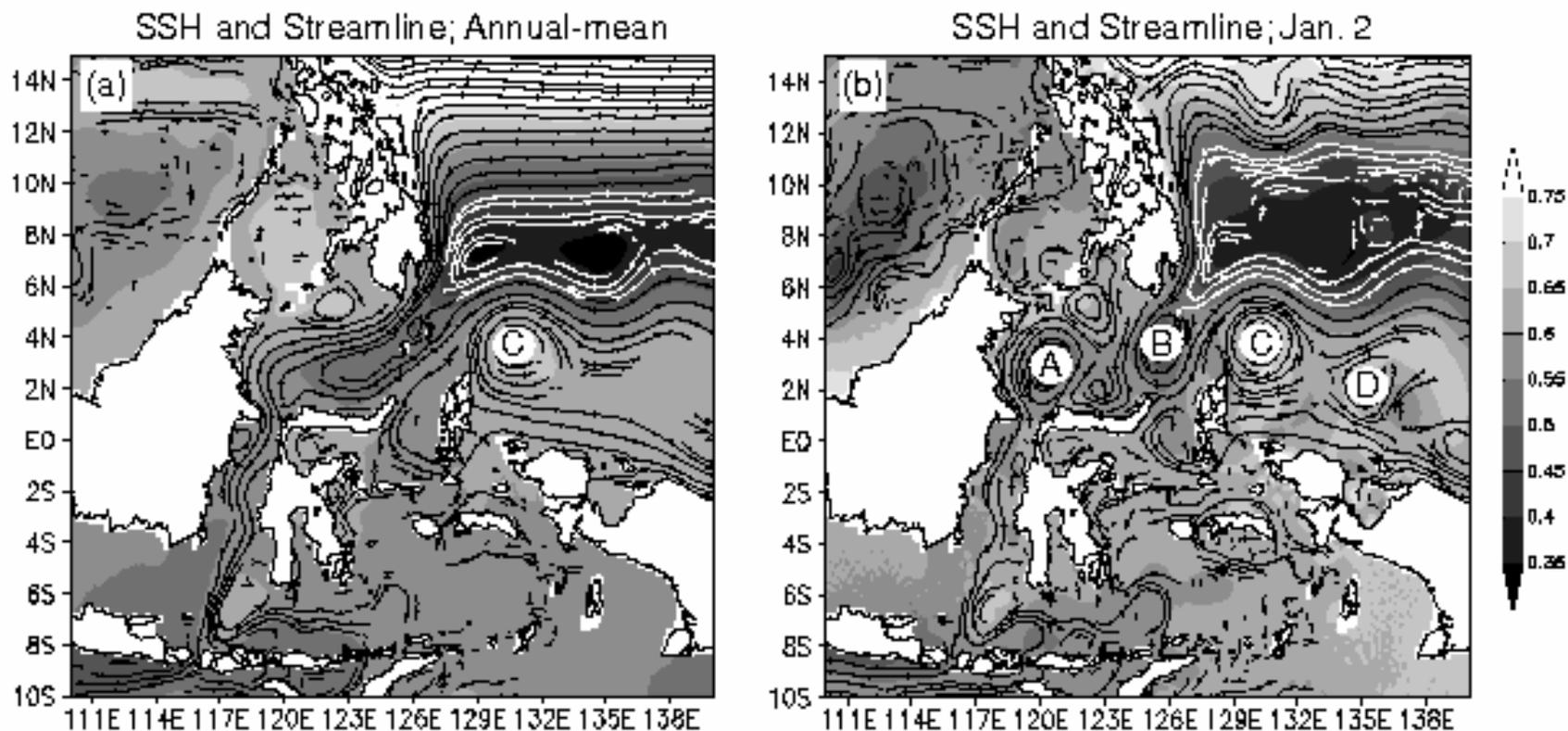


図3 : 1/6度全球モデルにより得られた西部熱帯太平洋とインドネシア海域における海面高度偏差および海面での流れの分布。(a) 年平均場および (b) 1月2日の瞬間場。海面高度偏差の等値線は 0.05 m 毎。

# 地球シミュレータの登場

稼動開始: 2002年2月

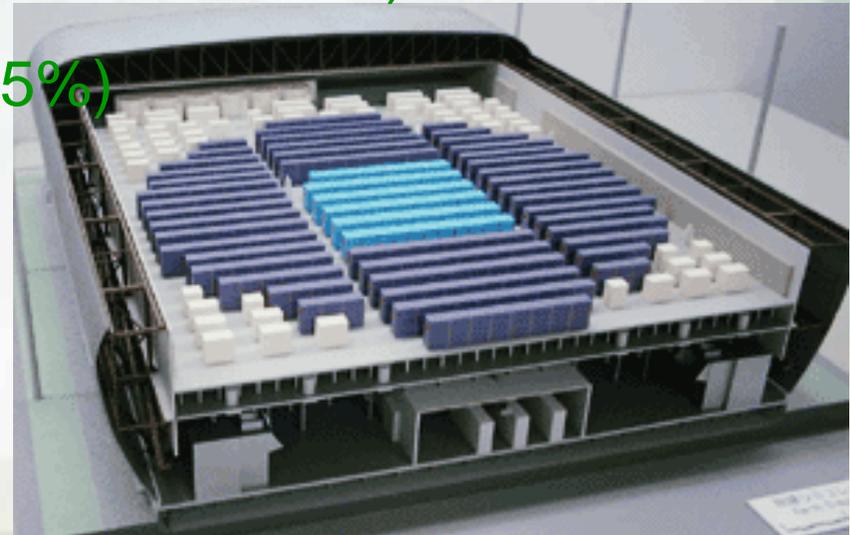
CPU数: 5120

ピーク性能: 40TF(8GF × 5120)

主記憶: 10TB (16GB × 640ノード)

LINPACK性能: 35860GF (現在TOP500の7位)

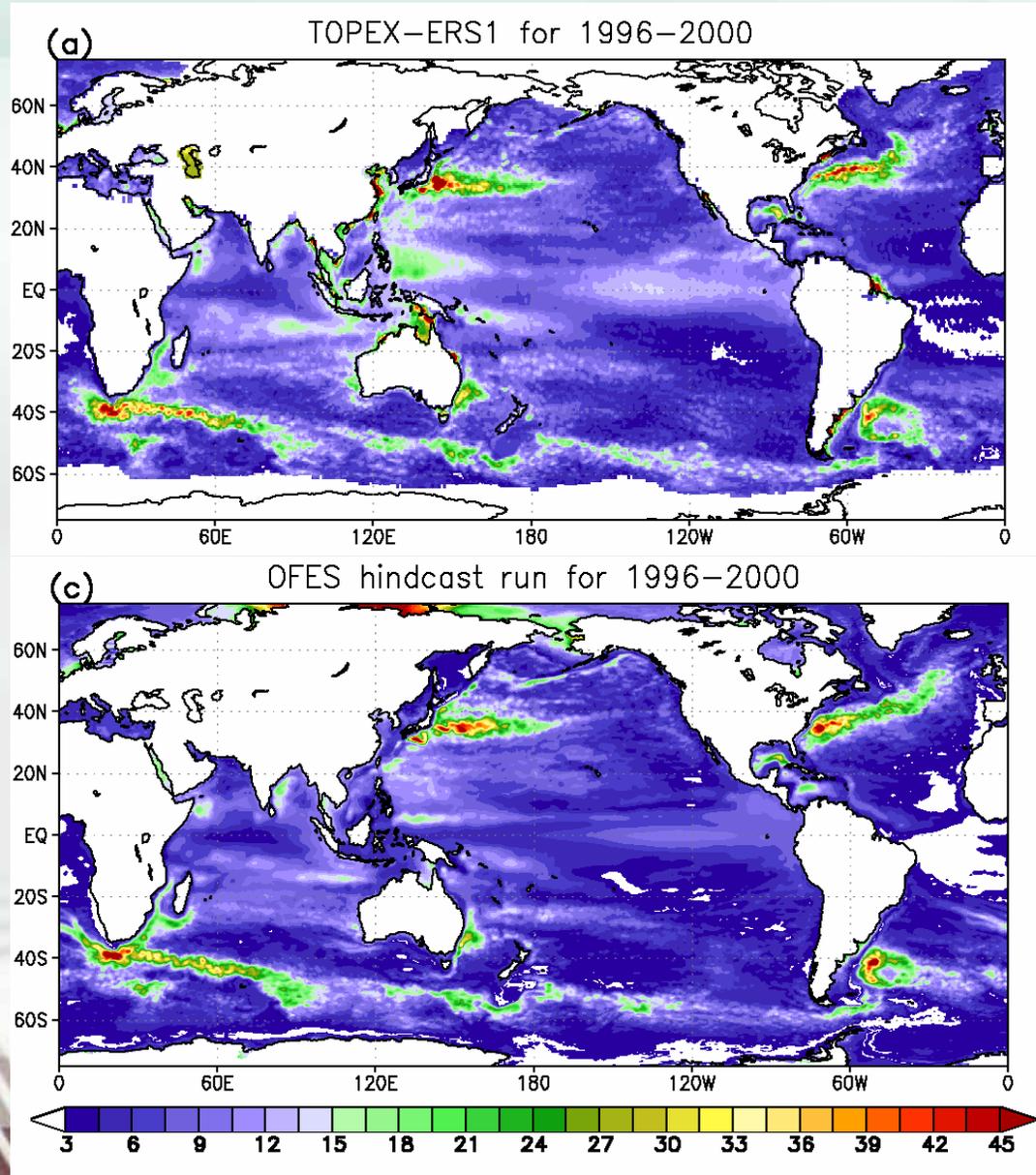
AFES性能: 26580GF (ピーク比65%)



# 地球シミュレータにおける 渦解像全球海洋循環シミュレーション

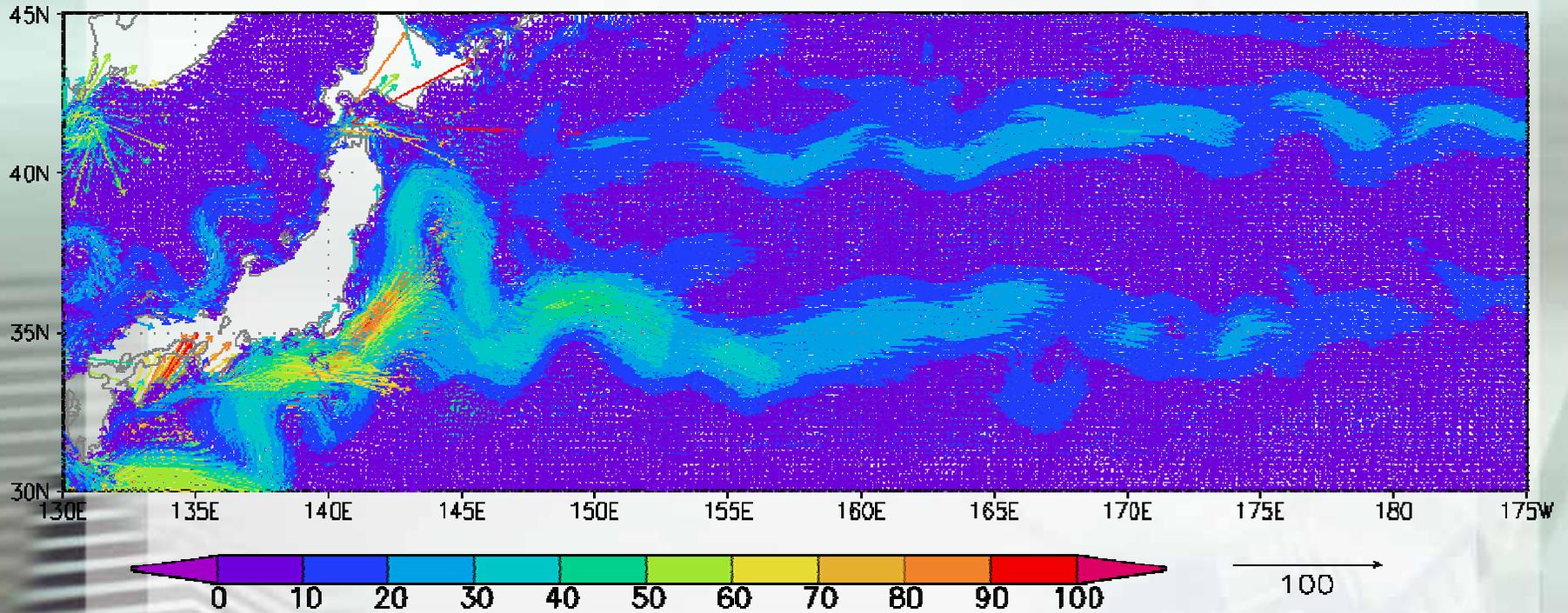
- ESC+FRCGC+IPRC  
OFES  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , 54レベル
- NCAR+電中研  
POP  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , 40レベル

# OFESの結果



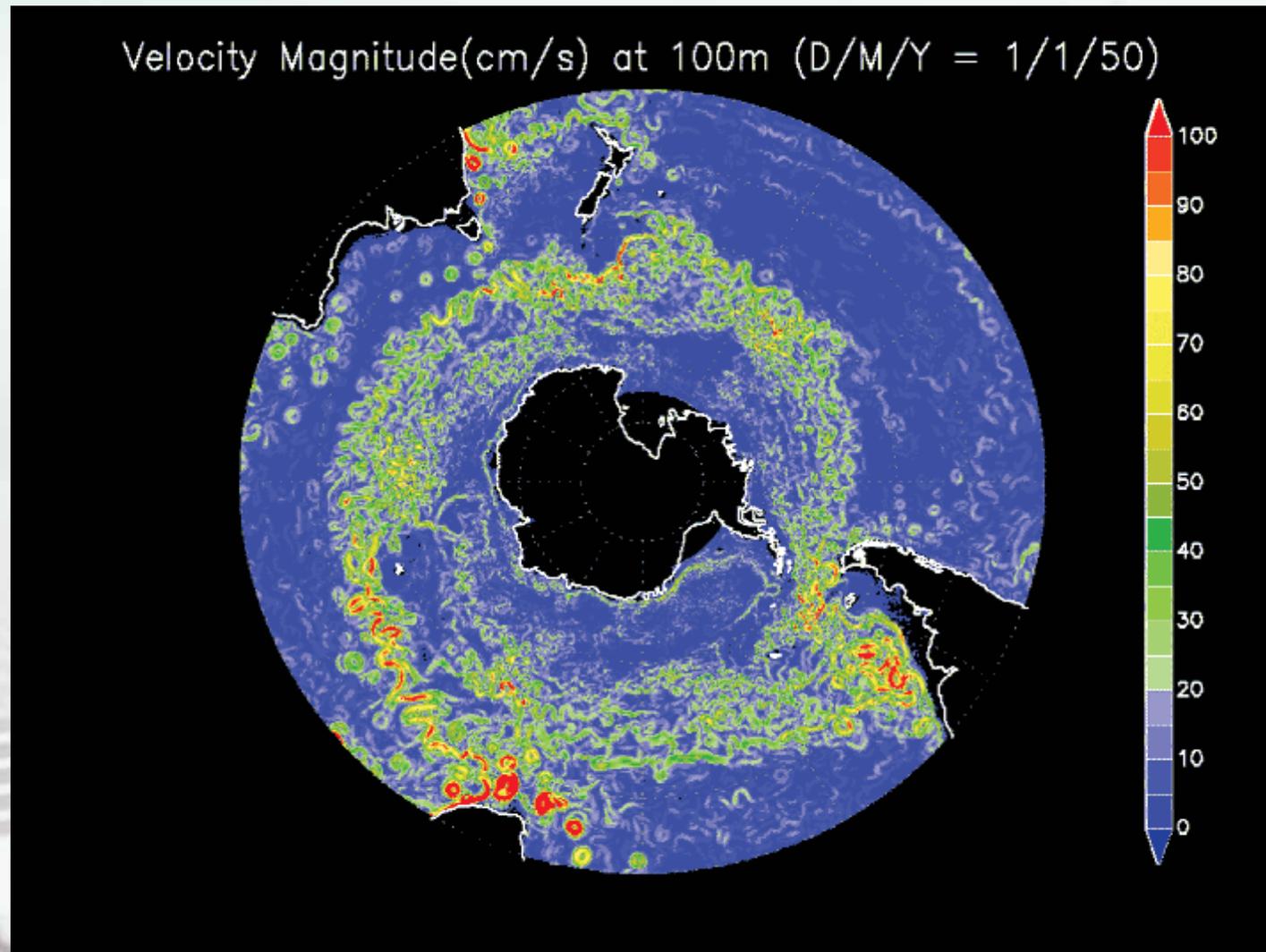
# OFESの結果

1/10° × 1/10° の OFES



Kagimoto (1999)

# OFESの結果



## これまででは

- 計算機性能の向上により、全球規模の海洋のシミュレーションであっても、分解能を非常に高めた精緻な数値計算が可能となった
- 特に水平分解能10km程度(中規模渦を十分分解できる分解能)にできたことは、海洋のシミュレーション研究を大きく進展させた(黒潮、湾流、南極周極流の再現性、中規模渦の表現)

# これからの海洋シミュレーション研究 もし現在の1000倍の性能の計算機が登場したら...

- 従来通り、リソースをフルに活用するような数値計算をする場合、水平・鉛直約5.6倍の分解能(水平2km程度)の全球海洋の数値計算が可能
- 水平分解能10km前後で見られた計算結果の大改善が見られるのか不明
- 科学的成果は出るかもしれないが、社会貢献に繋がる研究成果が直接得られるか疑問
- シミュレーションの基礎研究として留めるべきか？

# 社会貢献が期待できる海洋の数値計算研究 をするには？

- **季節変化、エルニーニョ、インド洋ダイポールモード、黒潮大蛇行などの予測可能性研究を推進するべき**  
(既に地球環境フロンティアではJCOPEという活動を通して、黒潮流路の予測及びデータの提供を行い、釣り業界などから注目を浴びている。また漁業や海運への利用可能性研究を現在行っている)

# より高次の気候情報を活用する社会の創成に向けて



## 気候変動予測システム

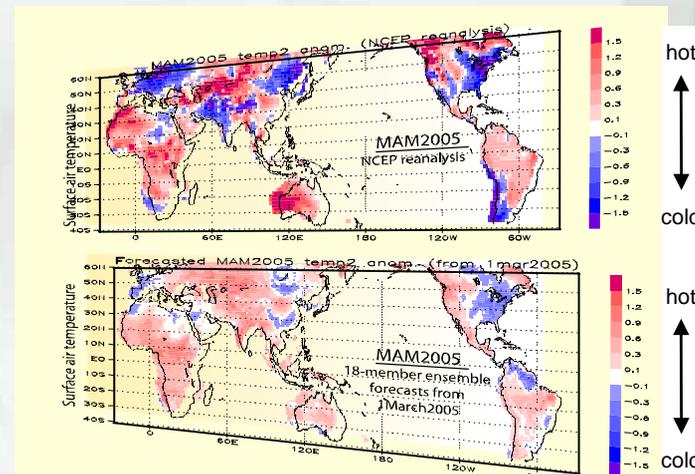


情報産業

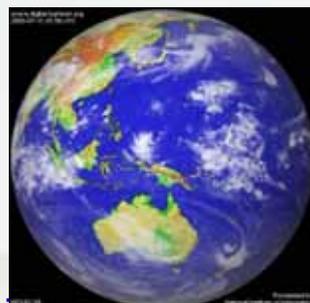
様々な加工データの提供



情報提供



農業



水管理・防災



保険業 天候デリバティブ



商工生産管理

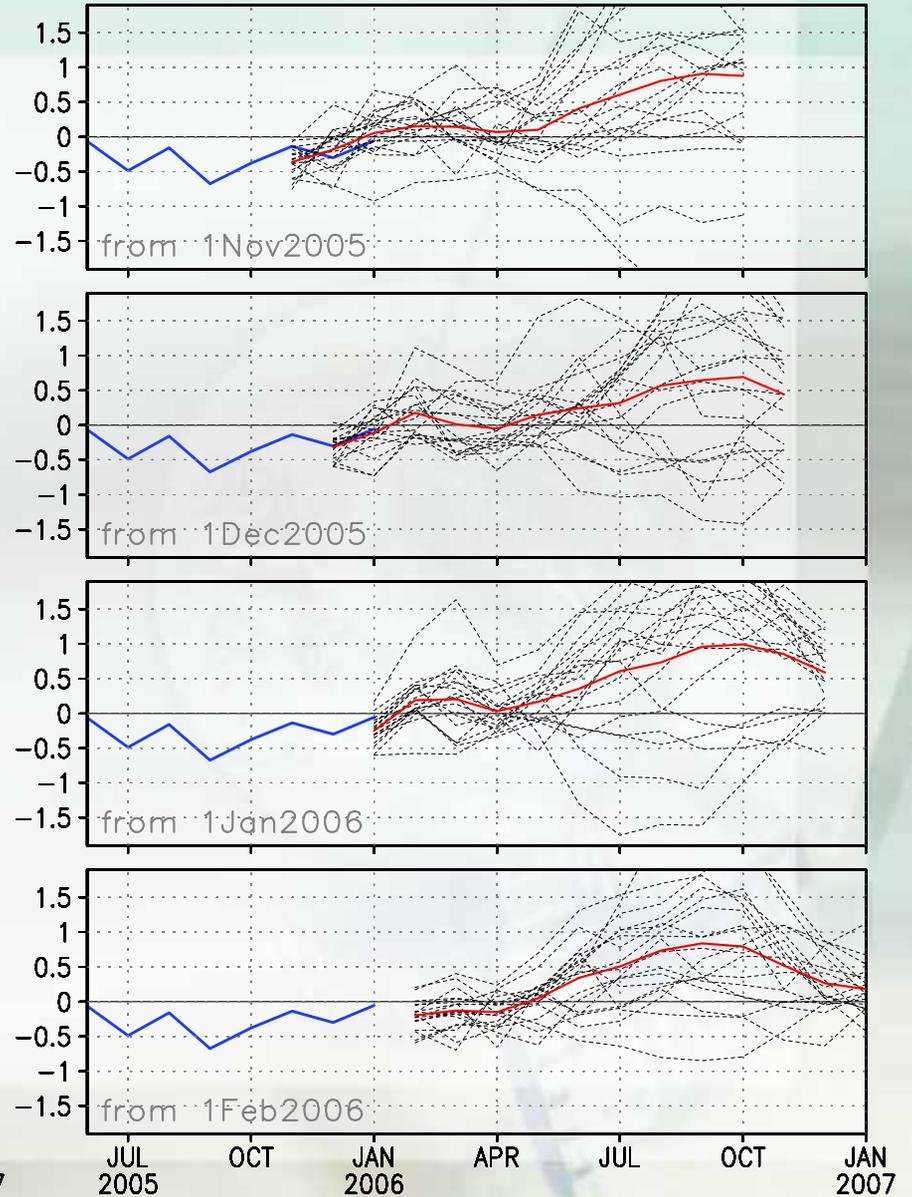
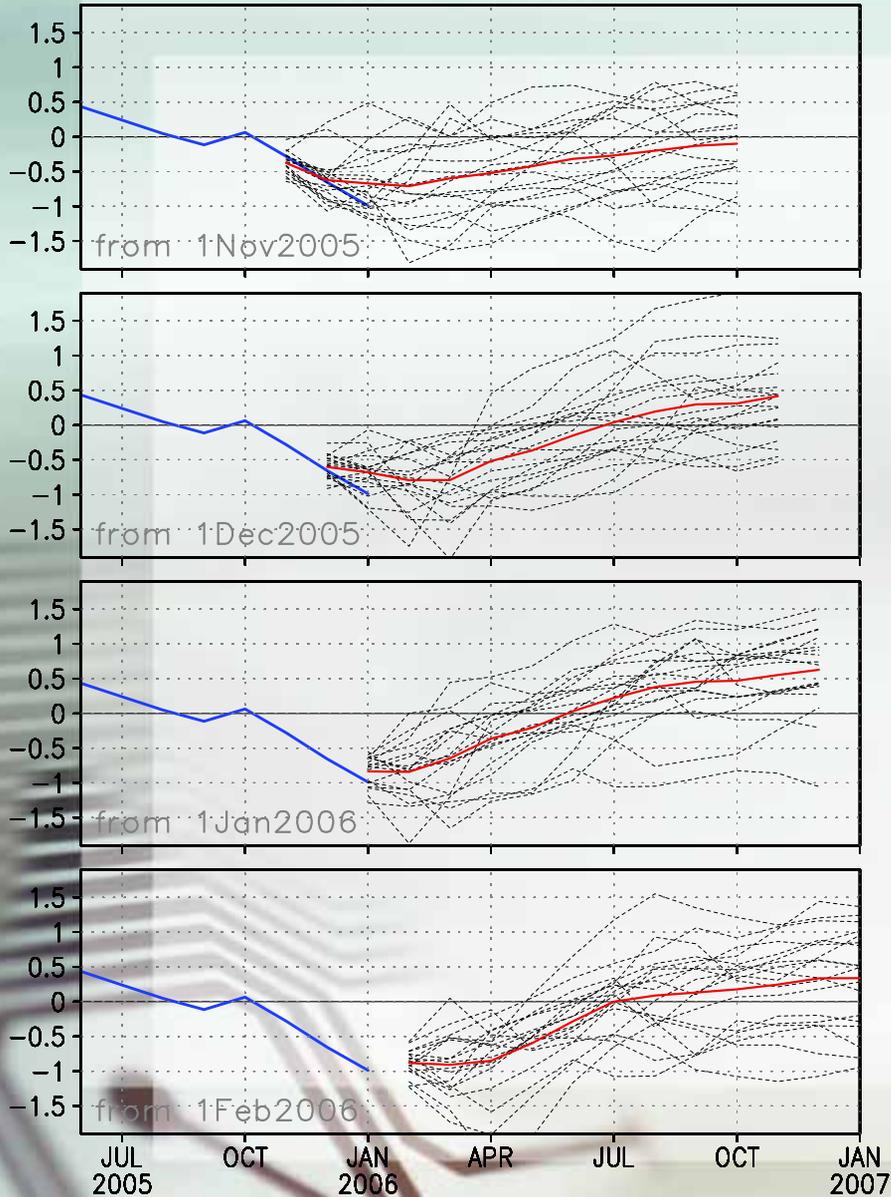
# 社会貢献が期待できる海洋の数値計算研究 をするには？

- 季節変化、エルニーニョ、インド洋ダイポールモード、黒潮大蛇行などの予測可能性研究を推進すべき  
(既に地球フロンティアではJCOPEという活動を通して、黒潮流路の予測及びデータの提供を行い、釣り業界などから注目を浴びている。また漁業や海運への利用可能性研究を現在行っている)
- 予測可能性研究(特に確率予報に基づくもの)にはアンサンブル実験が必要となる(必要なメンバー数は不明)

# アンサンブル予報例(18メンバー)

Nino3.4 SSTA forecasts

IOD index forecasts



# 社会貢献が期待できる海洋の数値計算研究 をするには？

- 季節変化、エルニーニョ、インド洋ダイポールモード、黒潮大蛇行などの予測可能性研究を推進すべき  
(既に地球フロンティアではJCOPEという活動を通して、黒潮流路の予測及びデータの提供を行い、釣り業界などから注目を浴びている。また漁業や海運への利用可能性研究を現在行っている)
- 予測可能性研究(特に確率予報に基づくもの)にはアンサンブル実験が必要となる(必要なメンバー数は不明)
- 1メンバーが要するリソースは小さい(capability computing指向の計算機では嫌われる傾向)が、メンバー数分の計算量が必要、しかも時々刻々予測結果を更新しなければならない 結果として大きな計算リソースを要する

# 計算機の構成についての提言

- 数値風洞や地球シミュレータは計算スピード向上にお金をかけたため、周辺機器(特にストレージ)が相対的に貧弱
- 大気・海洋・地震波伝播などの数値実験は非定常問題を扱うため、時間方向に逐次データを保存しなければならない
- 例えばOFESの計算結果(1950～2005年の歴史実験)を3日毎に保存すると**22TB**要している(陸地部分を取り除く圧縮を行っている)



**十分なストレージ容量を用意すべきである**

# おわり

# 深層の海洋循環(模式図)

