

2012.03.17

スーパーコンピュータ「京」を知る集い

見えない海の今と将来を見せる 海洋シミュレーション

羽角 博康

東京大学 大気海洋研究所

気候における海の役割

気候

人の生活環境

= 地表付近大気の状態: 温度・風・降水・...

↑

大気・海洋・雪氷・植生など、様々な要素の相互作用の結果



気候における海の役割

大気・海洋

気候を決める要素の中でも、顕著に「動く」



大規模な循環によって、太陽から受け取ったエネルギーを空間的に再配分

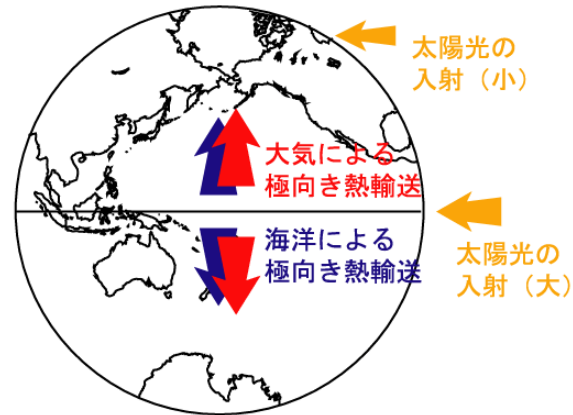


高緯度と低緯度の温度差を緩和し、地球上の大部分を居住可能な環境に

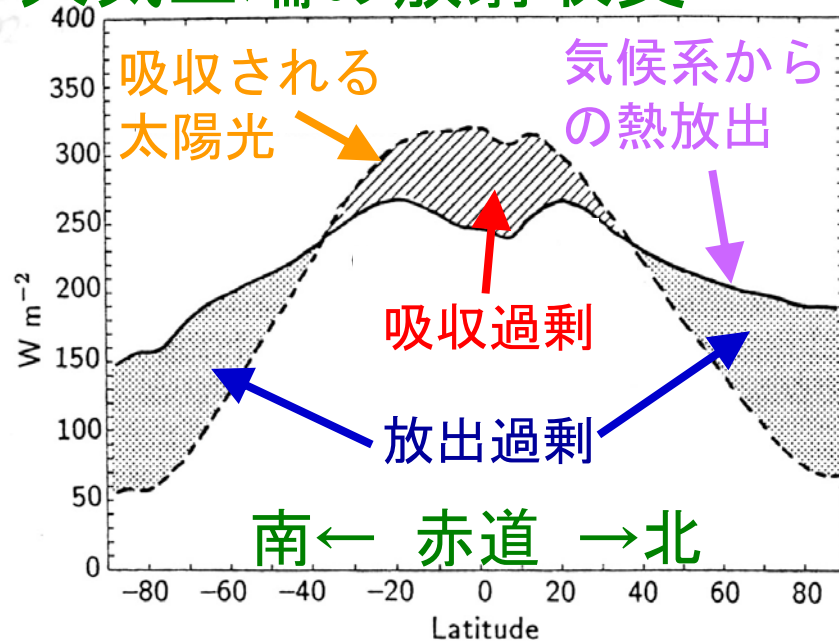


気候における海の役割

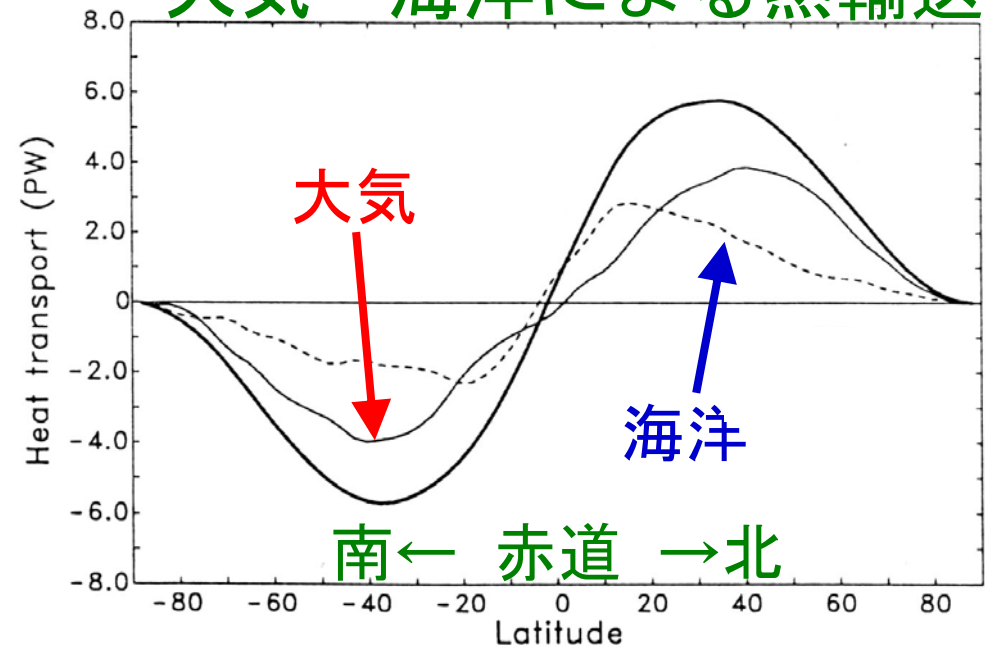
気候系の熱収支と熱輸送



大気上端の放射収支



大気・海洋による熱輸送



気候における海の役割

海による熱輸送の特徴

- 大きな熱量(質量)を緩やかな流れで輸送

大気: 全質量 5×10^{18} kg, 代表的風速 10 m/s

海洋: 全質量 1.4×10^{21} kg, 代表的流速 0.1 m/s



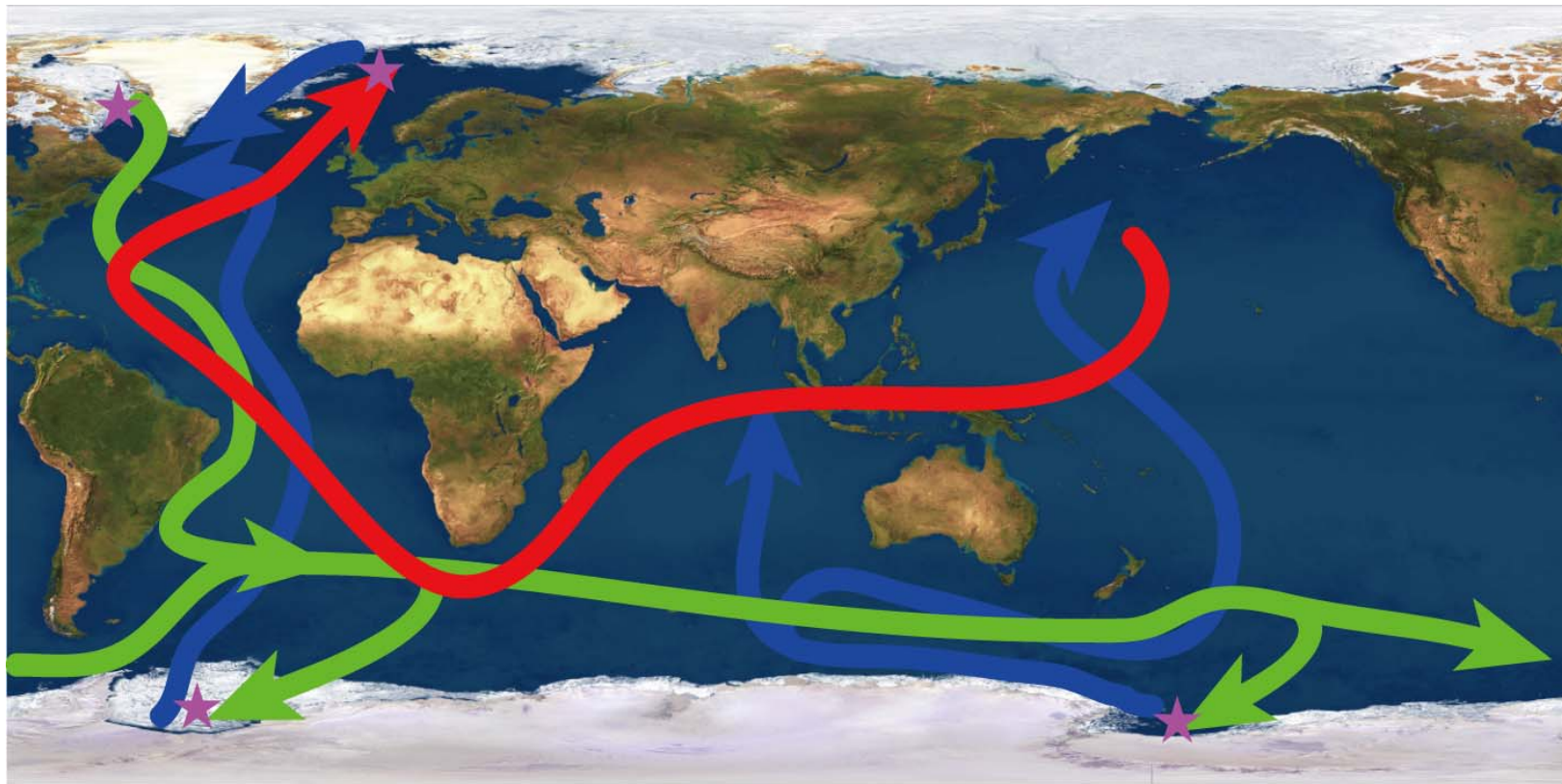
気候の状態を安定化

気候の長期変動をコントロール

- 深層流が熱輸送にとって重要

気候における海の役割

海洋の大規模循環



→
表層流
(海面付近)

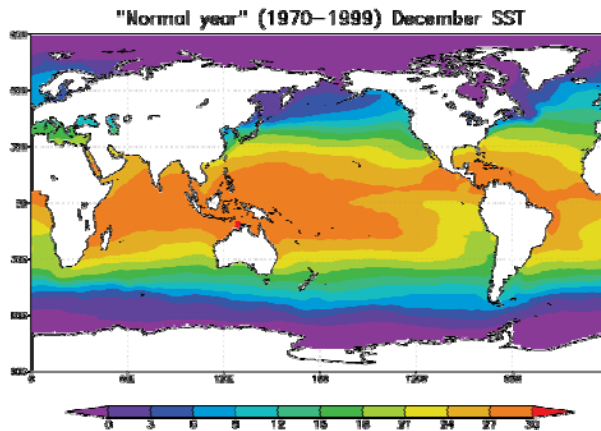
→
深層流
(~3000 m)

→
底層流
(~5000 m)

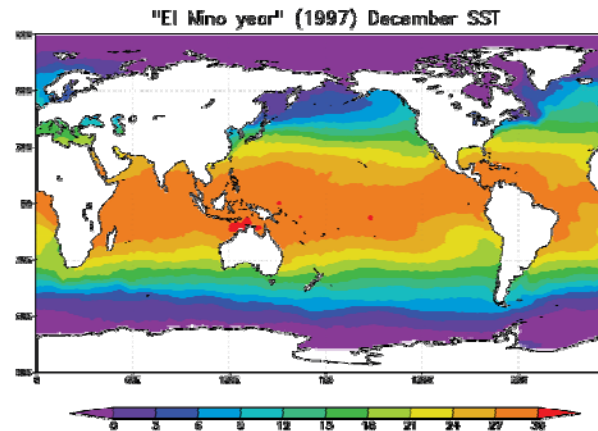
★
深層水形成

気候における海の役割

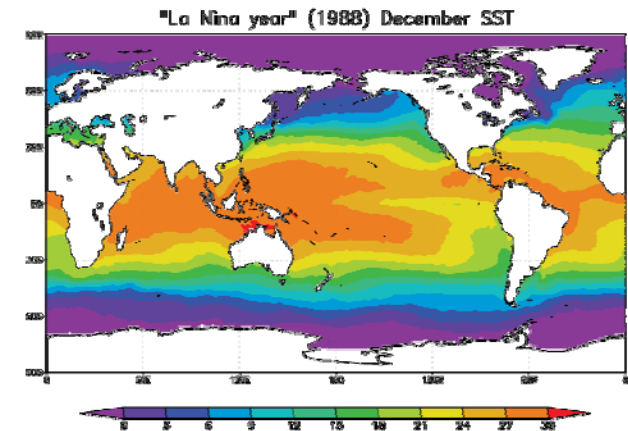
短期(数年~数十年周期)気候変動と海: ENSO



平年

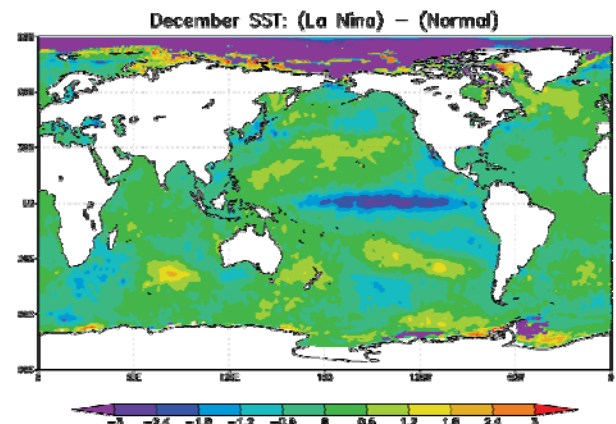
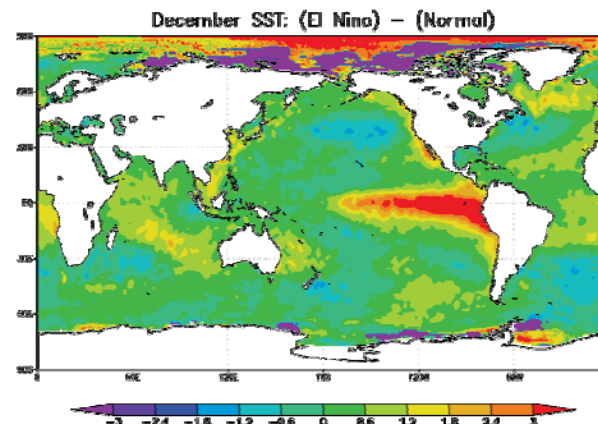


エルニーニョ時
↓ 平年からの差



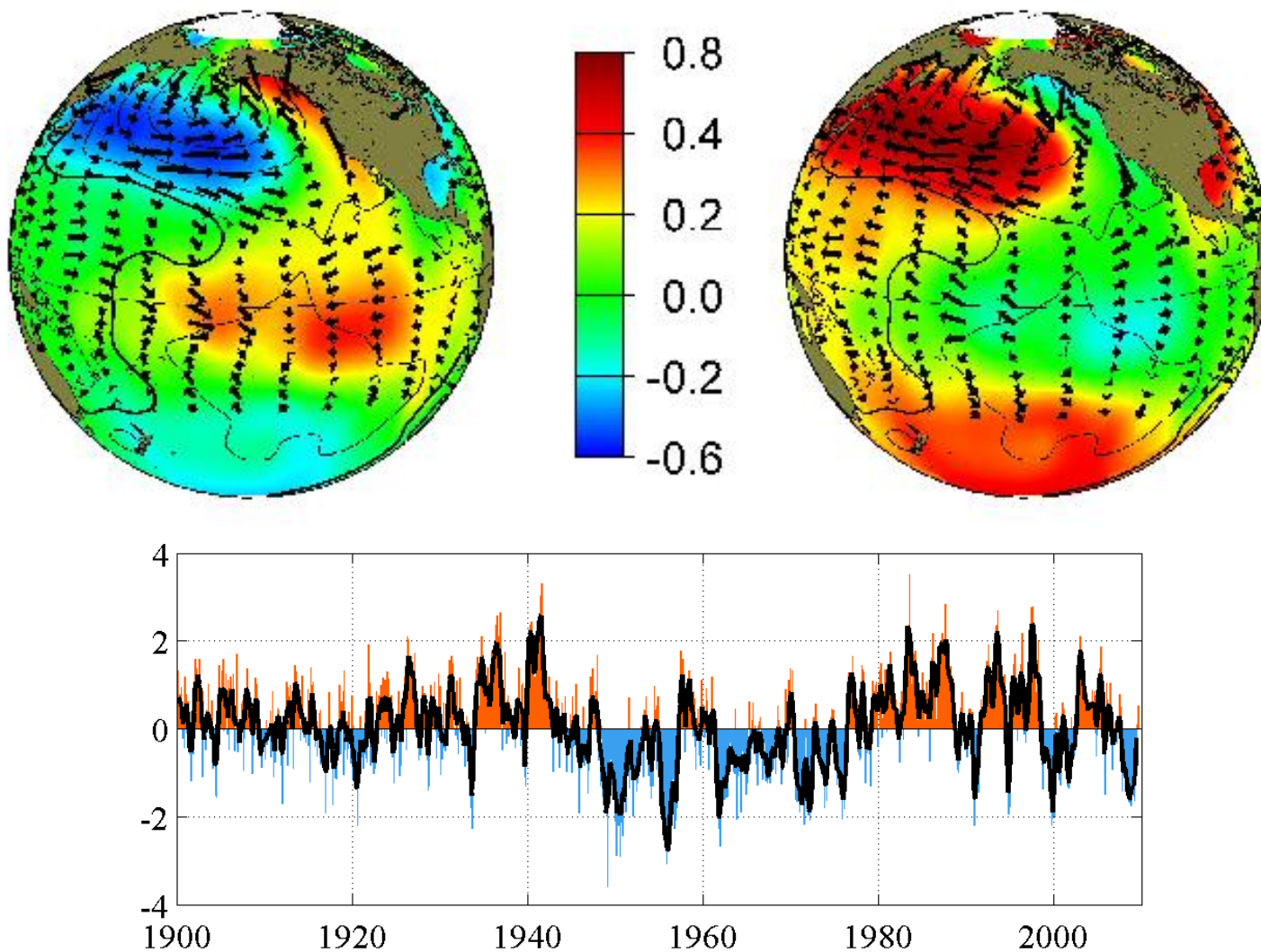
ラニーニャ時
↓ 平年からの差

12月海面水温



気候における海の役割

短期(数年~数十年周期)気候変動と海: PDO



気候における海の役割

短期(数年~数十年周期)気候変動と海

→ 上層(海面~数百m)海洋の特性が重要

海面水温に「異常」値



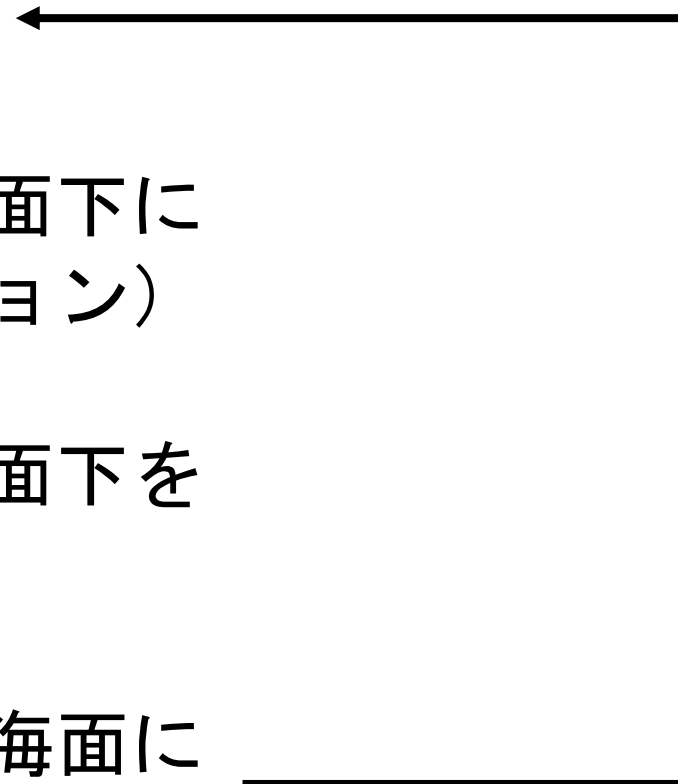
異常値をもった海水が海面下にもぐりこむ（サブダクション）



異常値を保持しながら海面下を循環



時間をおいて別の場所の海面に現れ、大気に影響

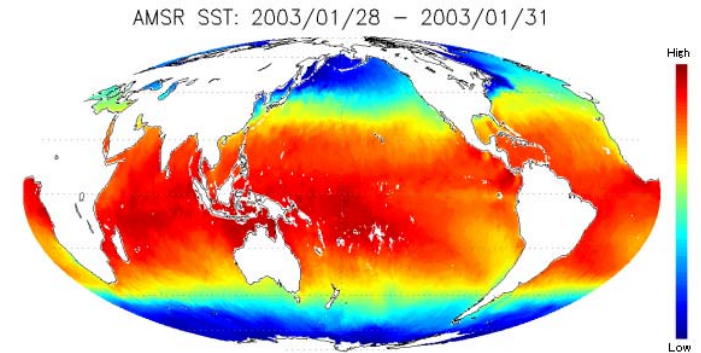


海の実態と観測

水温

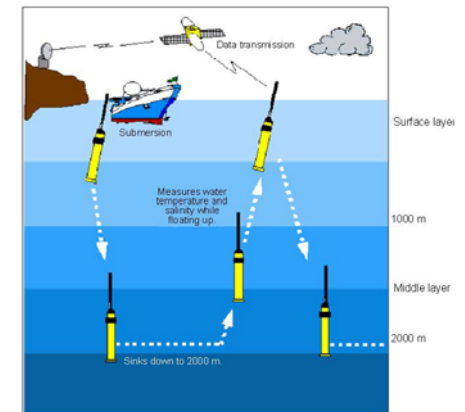
-海面

人工衛星でほぼリアルタイムの高解像度情報が得られる



-表層～中層 (~1000 m)

Argo等の観測システム整備で変動の観測が可能になってきた



-深層

船舶観測が中心で、変動を知ることは難しい（深層の変動は穏やかだと言われてきたが...）

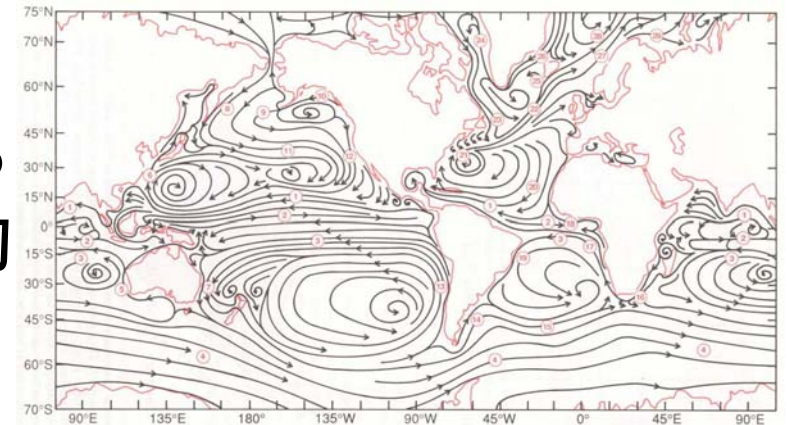


海の実態と観測

流れ・循環

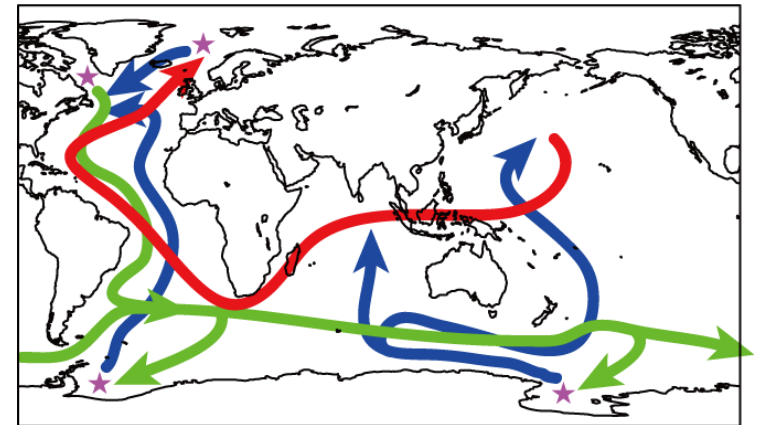
-海面付近

人工衛星や浮遊ブイなどから得られる情報により、比較的よくわかっている



-それ以外

流速計による観測に依存するところが大きく、十分な観測からは程遠い



海の実態と観測

観測に基づく実態把握は、特に

- 深層

- 氷海域

- (海面付近以外の)短時間／小規模の変動

に関して不明な部分がまだまだ多い



計算機とシミュレーション技術の急速な発達により、シミュレーションが観測の足りなさを補い、時には観測を越えて未知なる海洋現象を発見し、海洋の実態把握に主要な役割を果たせるようになってきた

海洋シミュレーションの原理と手続き

海洋の物理的状态

流れ ← 圧力、外部強制力(風)、海の形状

圧力 ← 密度 = 温度・塩分

温度・塩分 ← 流れ、外部強制力(海面における加熱・冷却および降水・蒸発等)

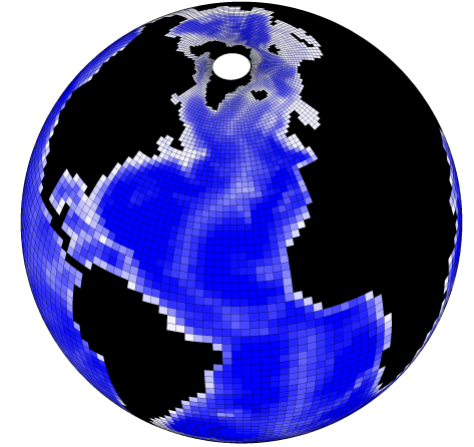
↓

これらは流体力学の運動方程式および輸送方程式として数式(微分方程式)で現される

↓

外部強制力が与えられれば、海洋全体の流れや温度分布がわかる ...はずなのだが、数式をそのまま(解析的に)解くことはできない

海洋シミュレーションの原理と手続き



数値シミュレーションの手続き

時間・空間を格子に分割（離散化）
→ とびとびの格子点での値を得る

元の数式を近似することにより、各格子点値は隣接する格子点値の加減乗除で表現される
→ 計算機で解くことができる

必然的に...

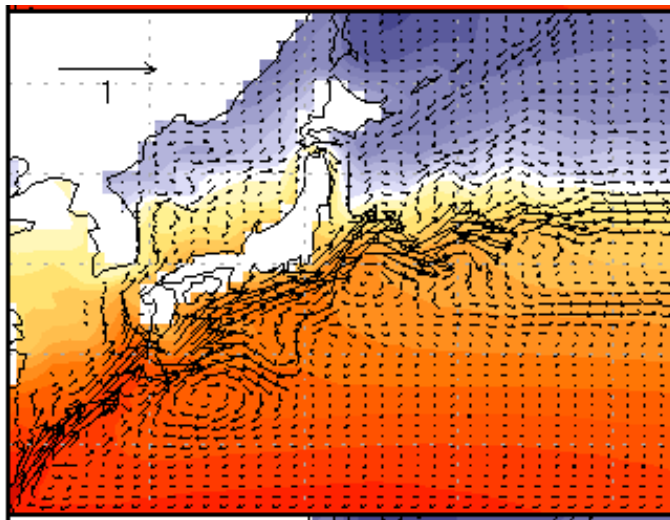
時間・空間的に細かい現象を見なければ細かい格子分割が必要で、計算量が増す

格子の目が粗いと数式の近似精度が落ちる

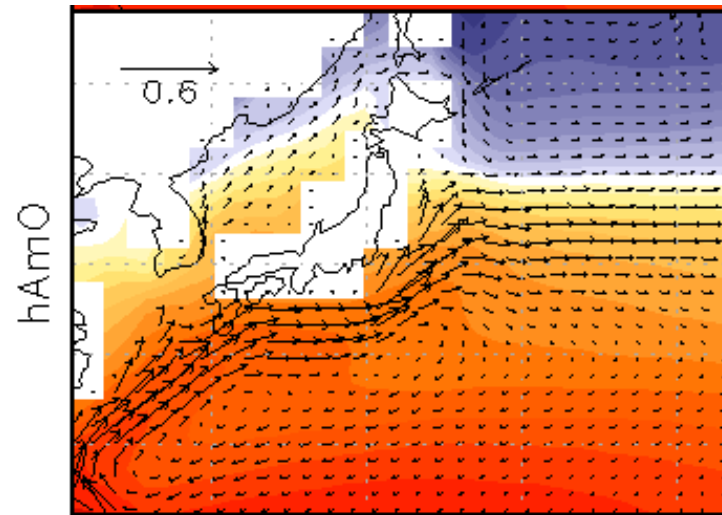
海洋シミュレーションの原理と手続き

たとえ興味の対象が大規模な流れでだけでも、それよりもずっと細かい格子サイズが必要とされる
(← 数式の近似精度が落ちる)

日本付近の表層海流・水温



20 km 格子



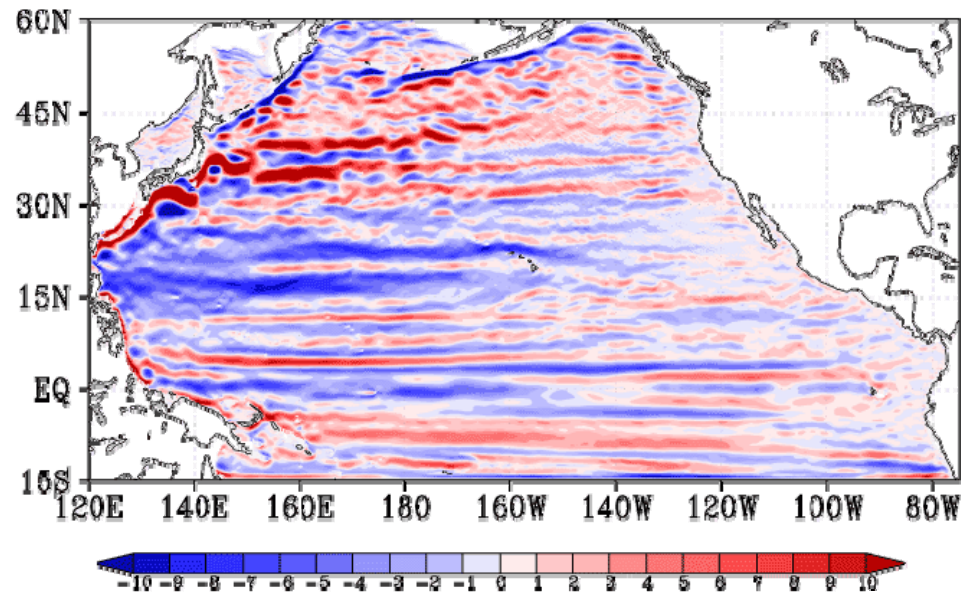
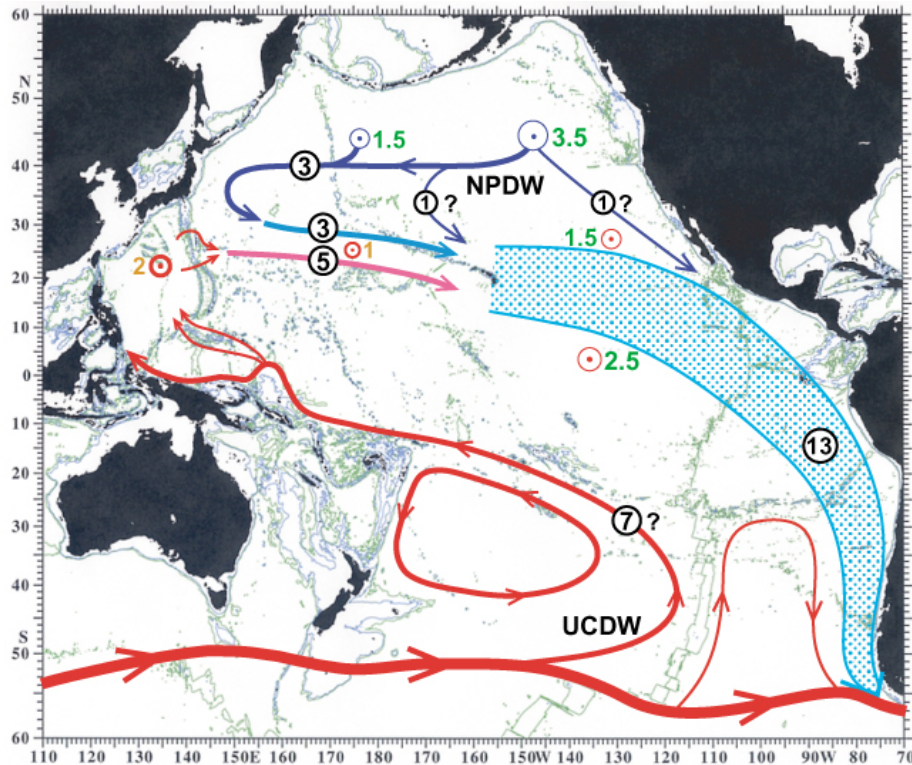
100 km 格子

計算機とシミュレーション技術の発達により、海洋の発見・予言的研究がまさに可能な情勢

深層海流のシミュレーション

深層海流: 観測による実態把握が十分でないものの
代表例

太平洋深層流

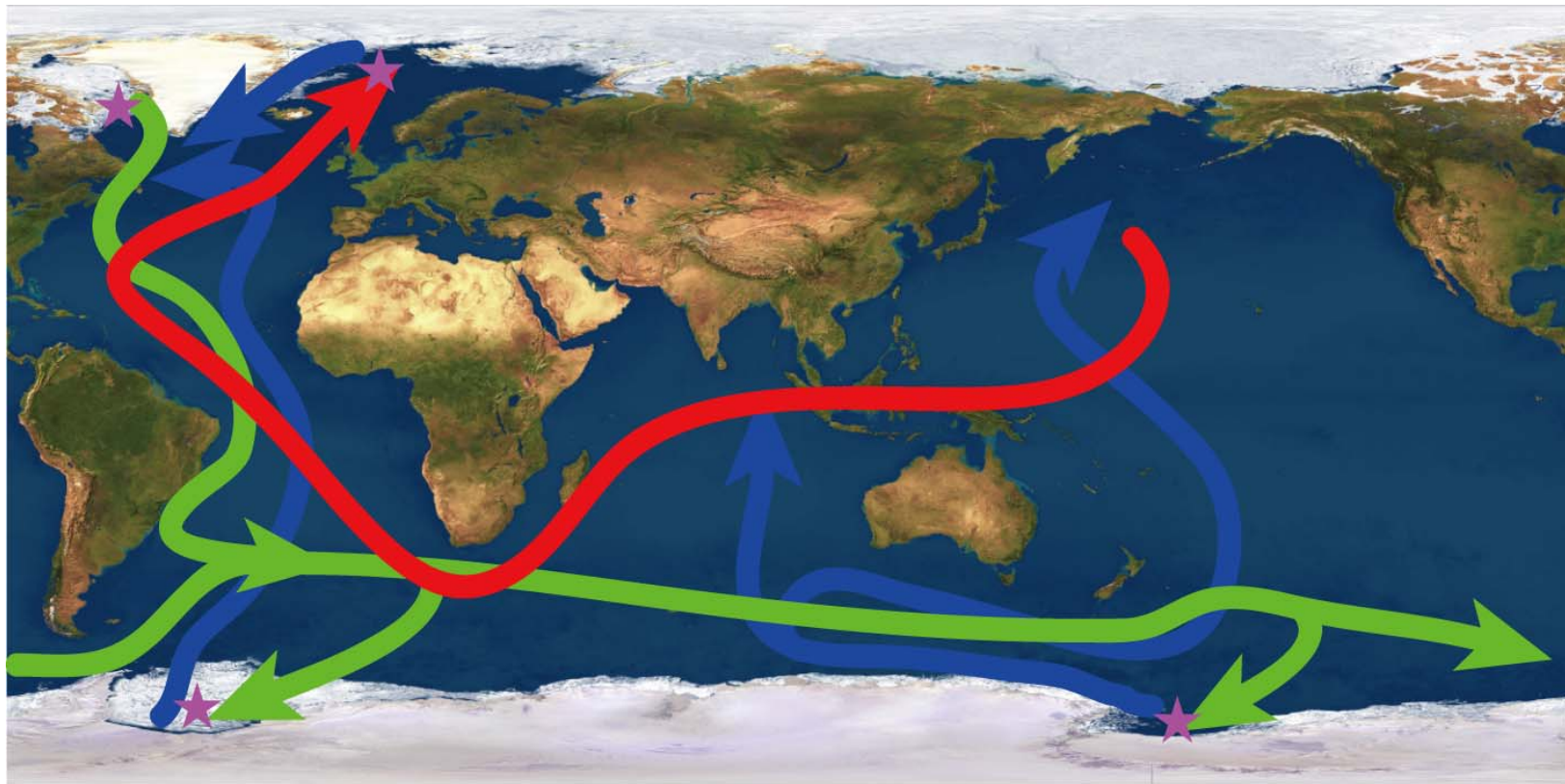


シミュレーション

様々な観測をまとめたイメージ

氷海域のシミュレーション

氷海域: やはり観測による実態把握が足りない代表例、かつ、深層循環との関わりが深い



→
表層流
(海面付近)

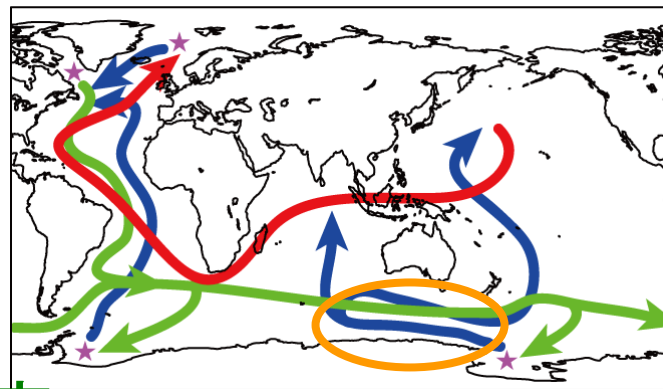
→
深層流
(~3000 m)

→
底層流
(~5000 m)

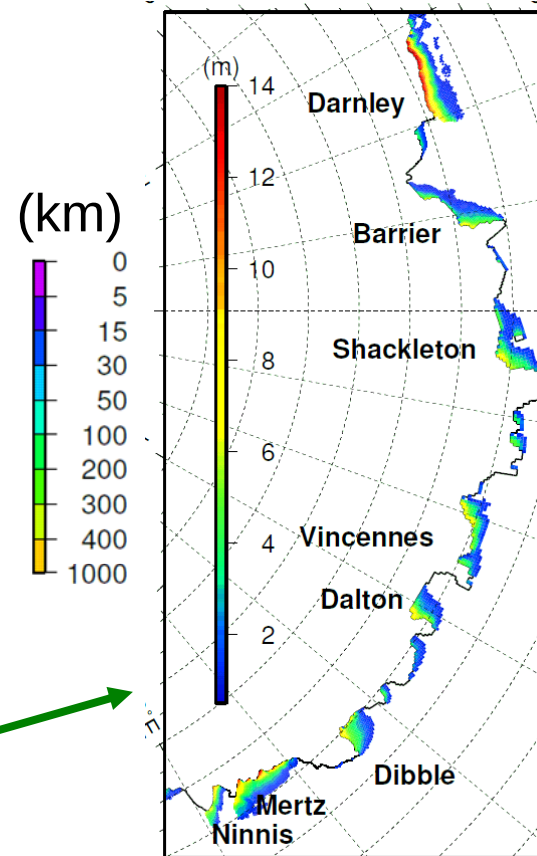
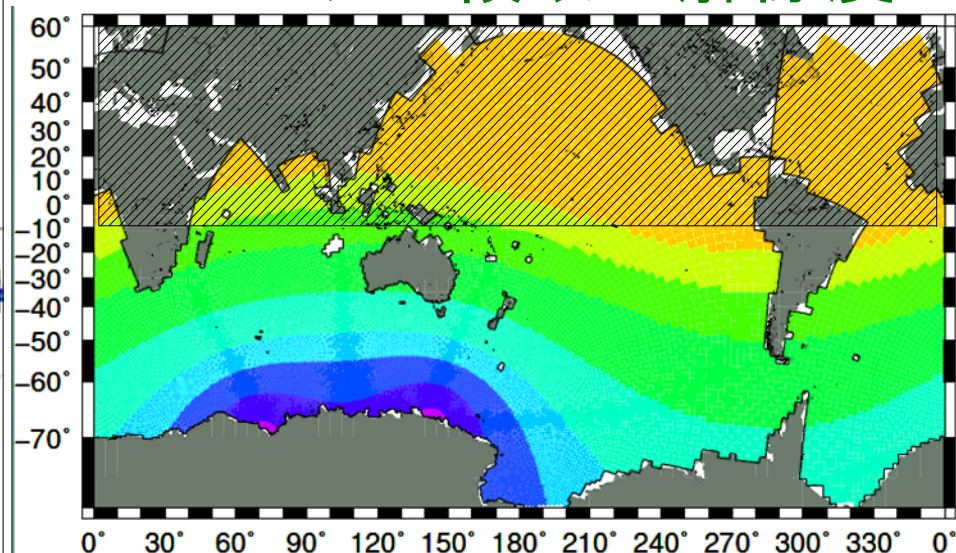
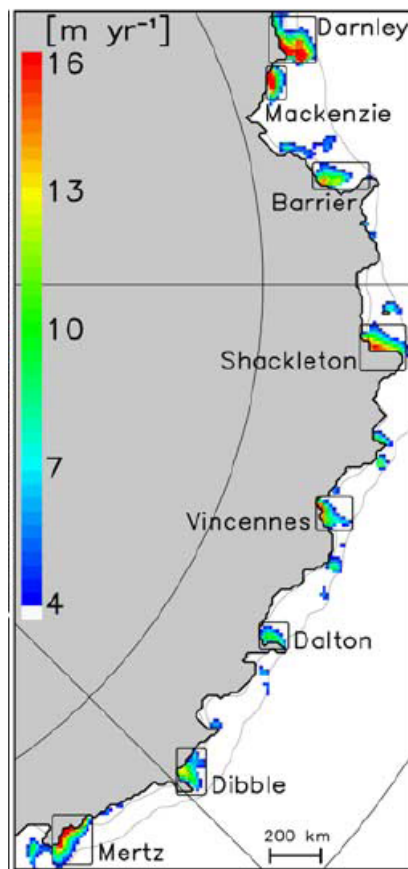
★
深層水形成

氷海域のシミュレーション

東南極の沿岸ポリニヤと海氷生産



モデル領域・解像度



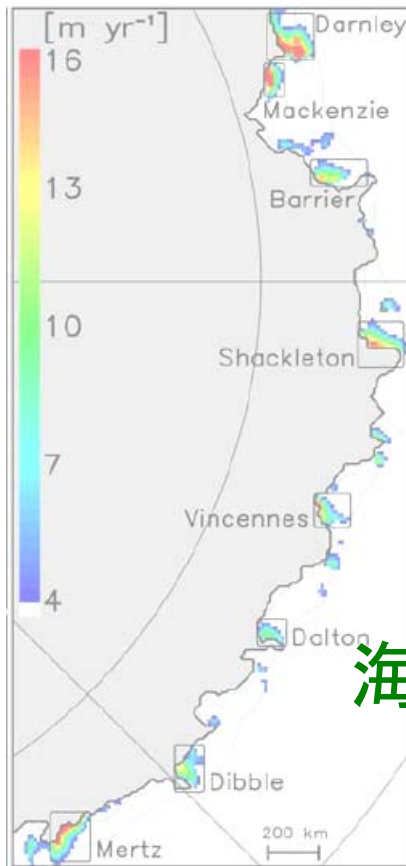
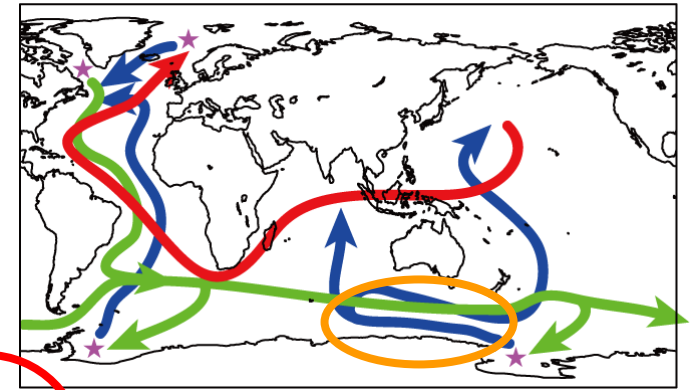
年間海氷生産量

観測
(人工衛星＋熱力学計算)

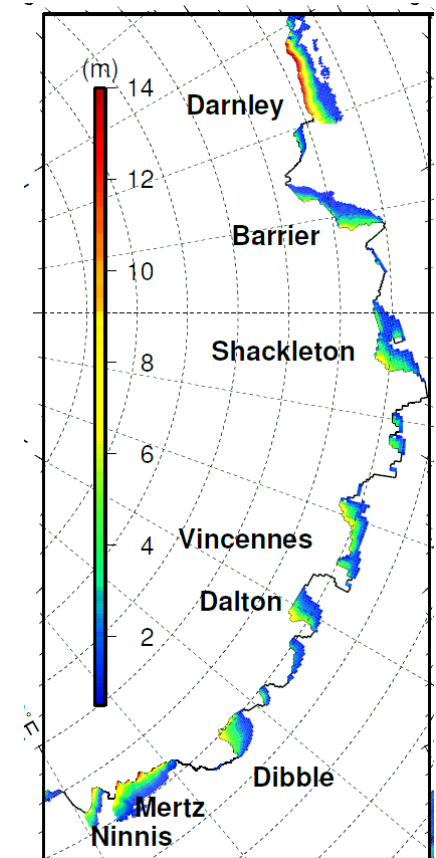
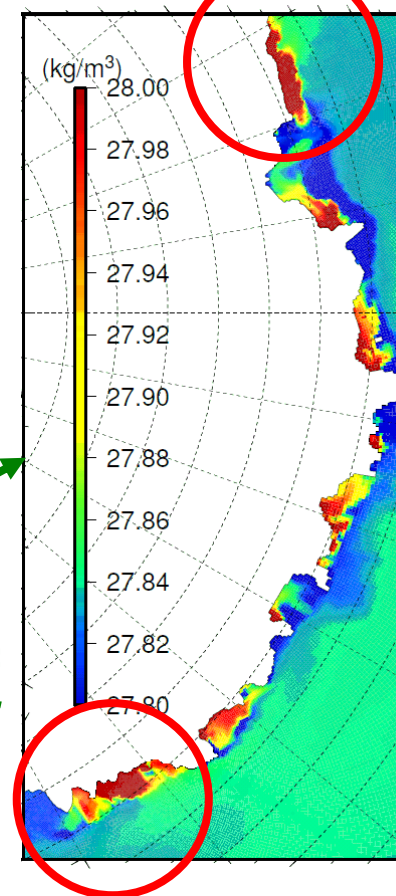
シミュレーション

氷海域のシミュレーション

沿岸ポリニャ下での高密度水形成

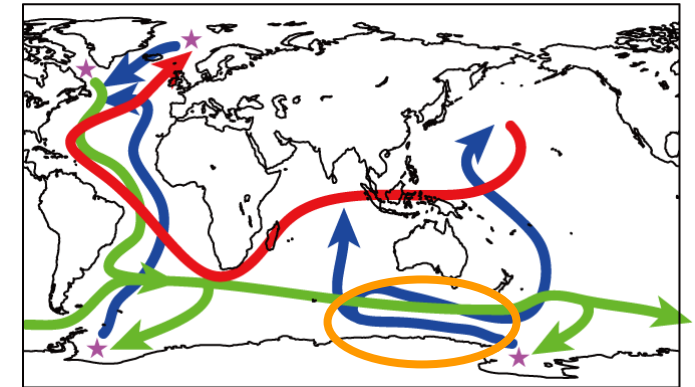


海底での海水密度

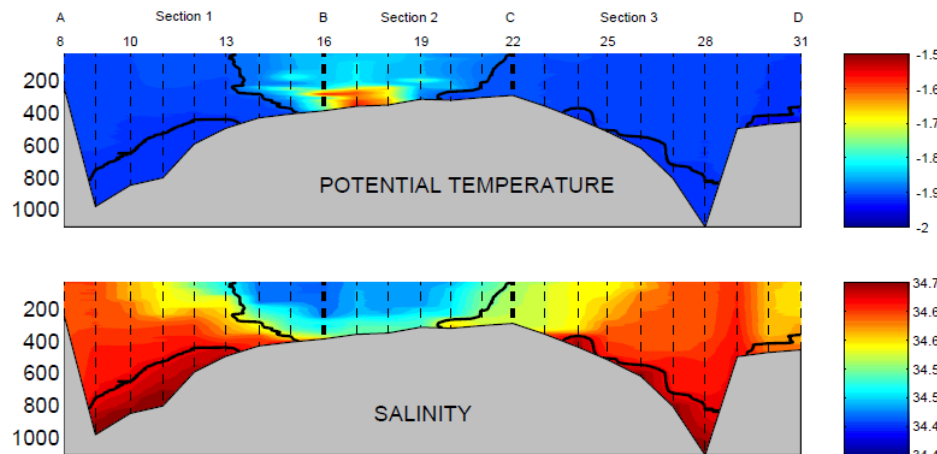
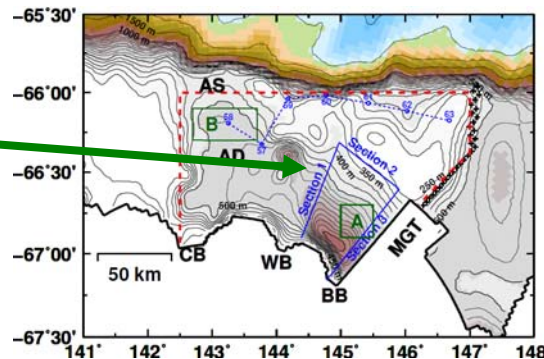


氷海域のシミュレーション

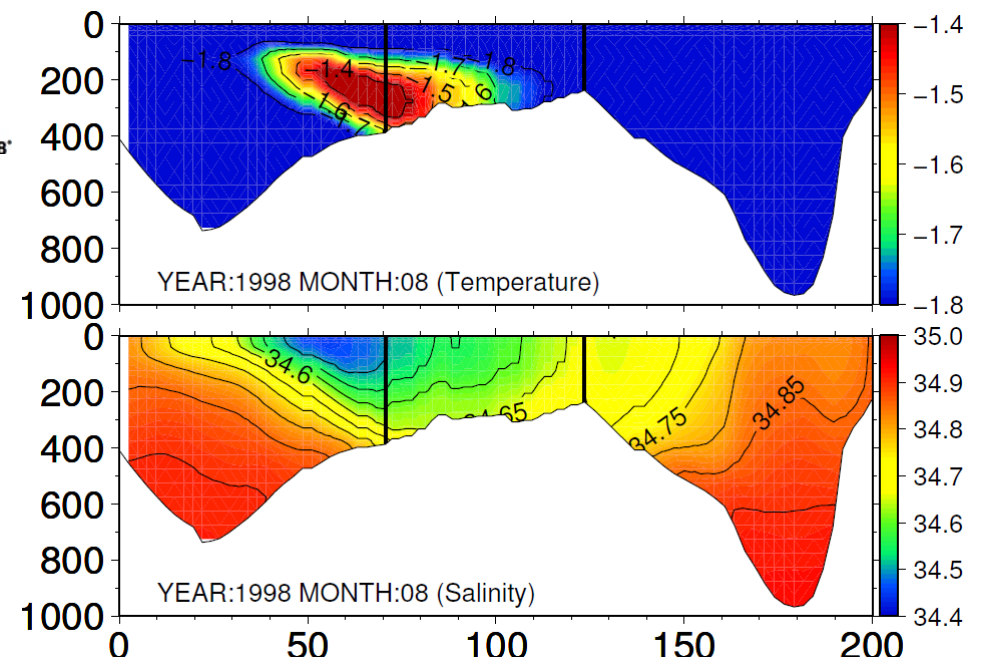
高密度水の輸送・外洋との交換



Sections
(blue lines)



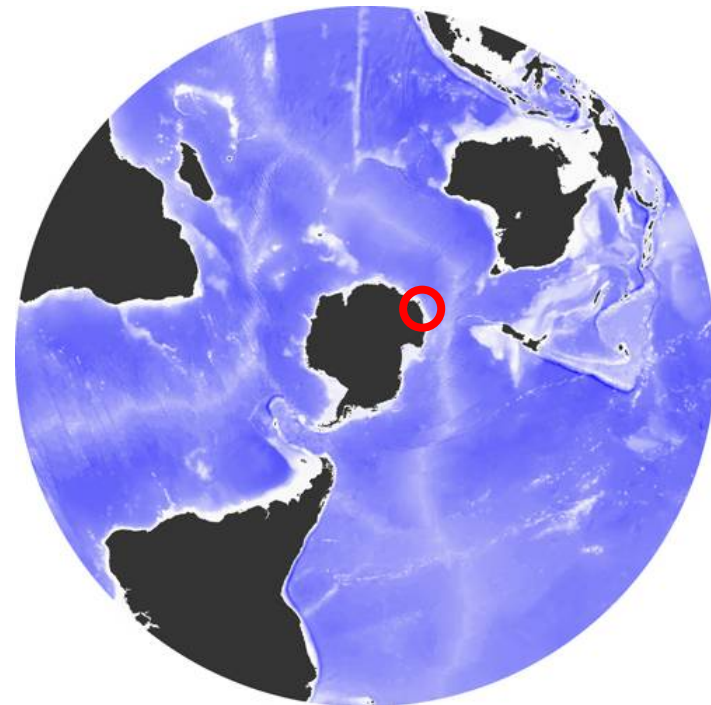
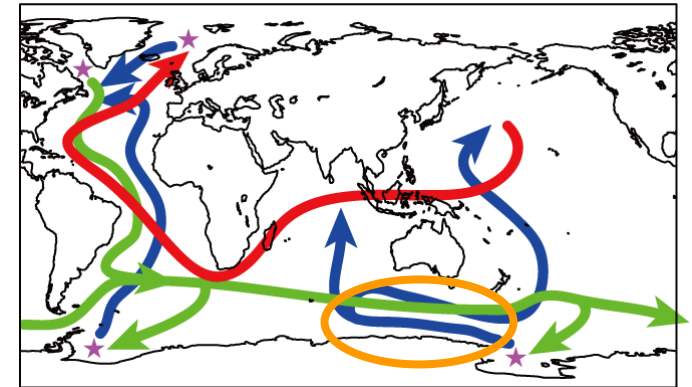
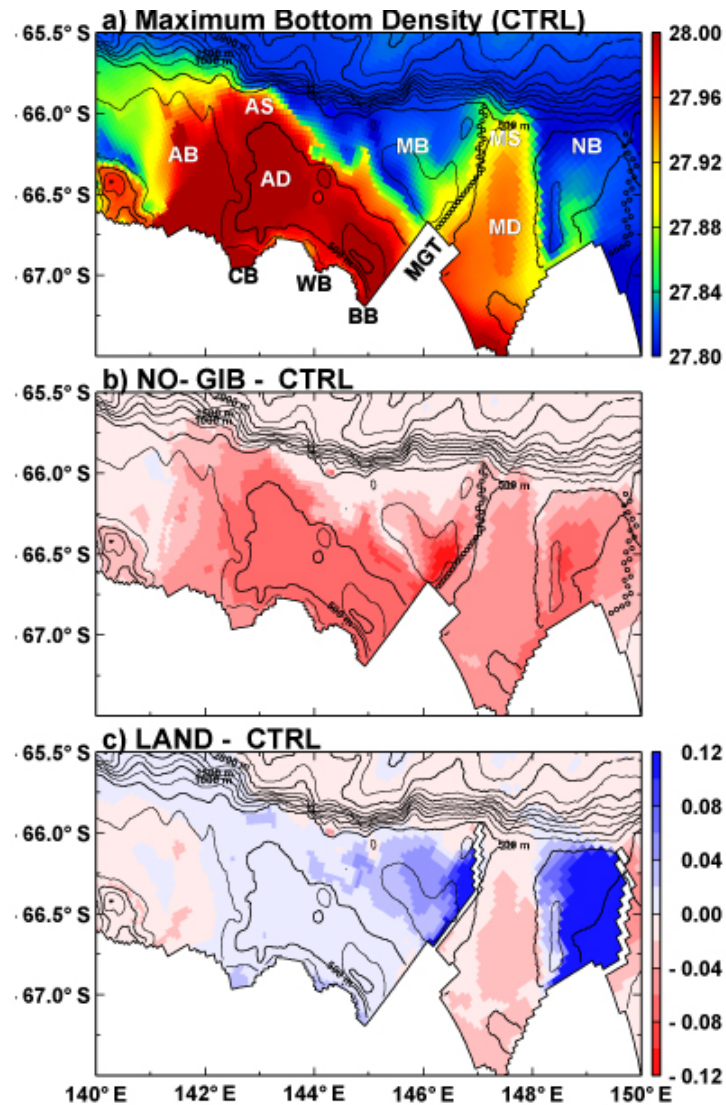
観測



シミュレーション

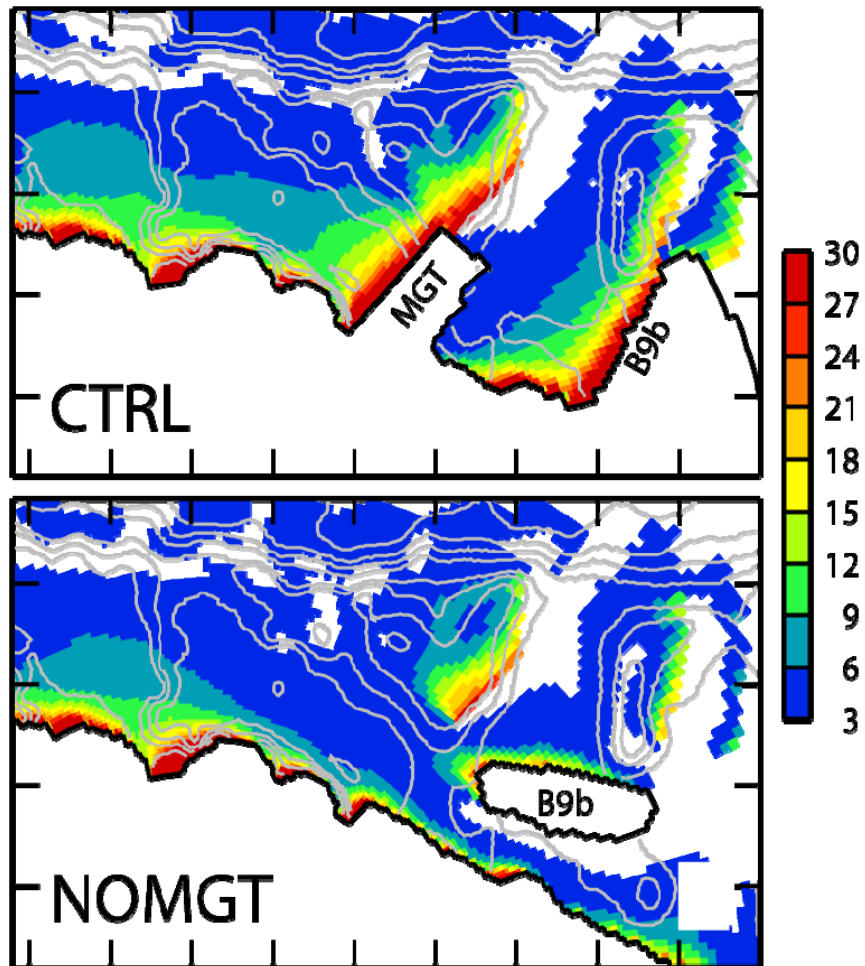
氷海域のシミュレーション

座礁氷山群の影響



氷海域のシミュレーション

Mertz 氷河舌の消失 (2010年2月)

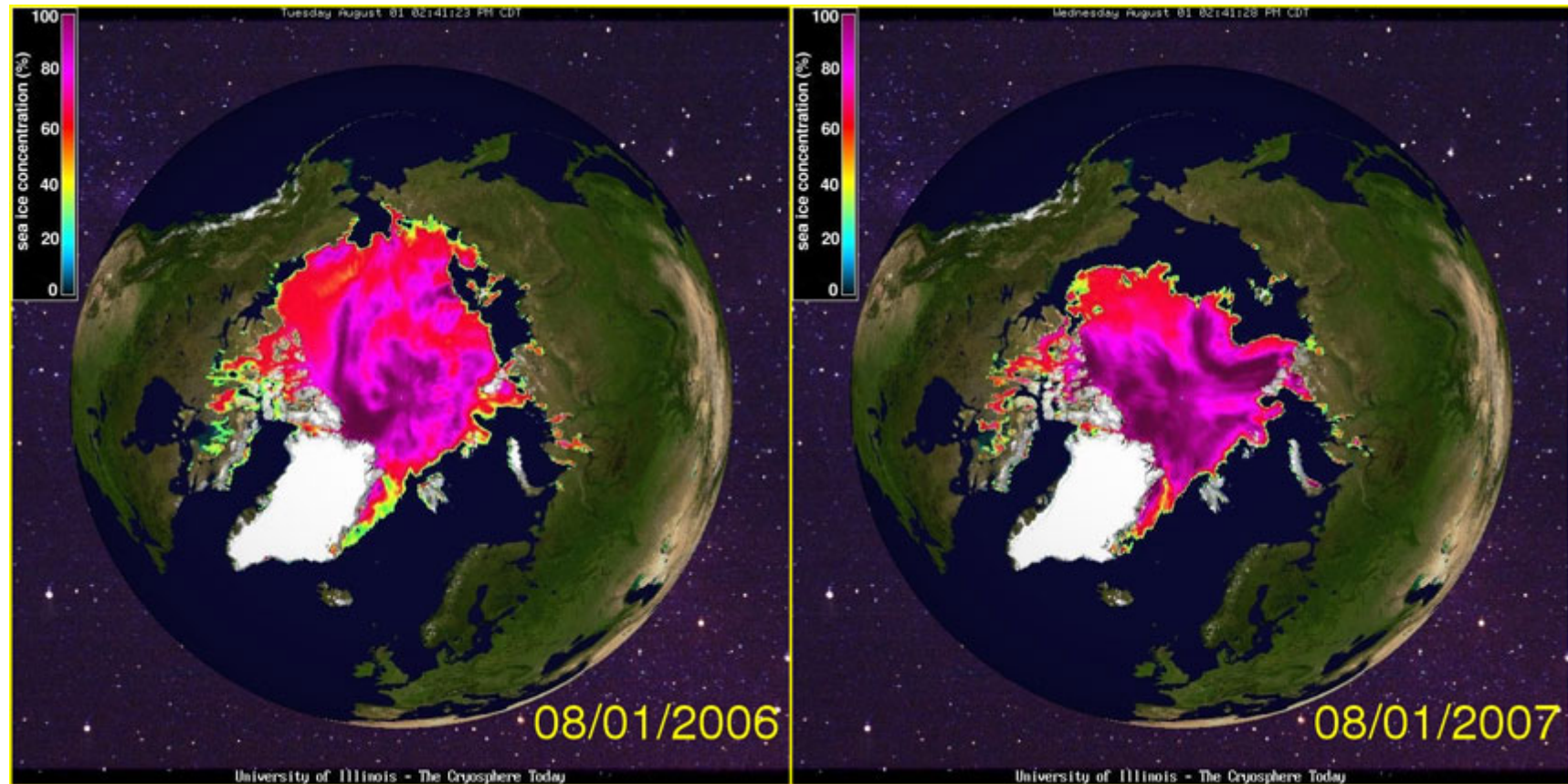


北極海のシミュレーション

北極海: 最も理解の遅れた海

→ シミュレーション研究の進展もまだまだ

海水の激減



温暖化予測シミュレーションにおける海洋

海洋シミュレーション:

当然、温暖化予測シミュレーションの一部だが...

全地球規模の数十年～数百年の気候変化を予測する
目的において、最先端の高精度海洋シミュレーションを適用することは不可能

→ 「京」コンピュータでも足りない

先述の南極周囲での深層水形成シミュレーション:

→ 水平 3 km 格子

最先端の温暖化予測シミュレーションにおける海洋:

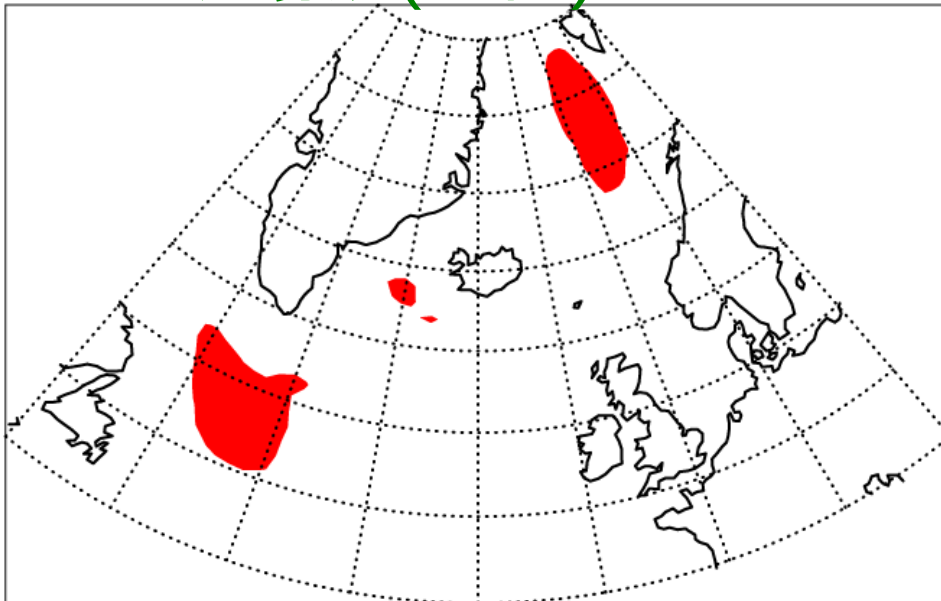
→ 水平 20 km 格子

温暖化予測シミュレーションにおける海洋

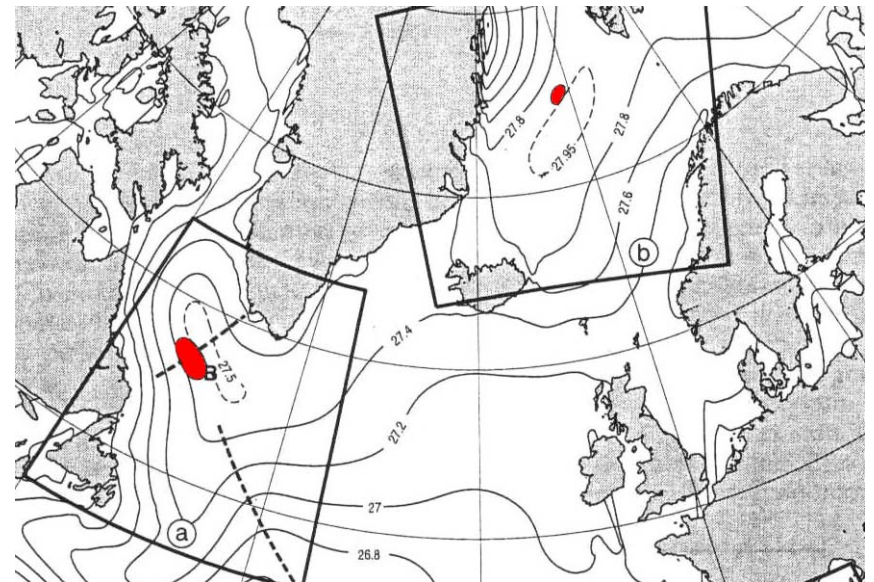
温暖化に伴う大西洋深層循環の弱化・停止が懸念されているが、その起源となる深層水形成は...

→ 領域がずれる、広すぎるなどの問題

気候モデルにおける深層水形成場所(一例)



観測による深層水形成場所



温暖化予測シミュレーションにおける海洋

温暖化に伴う大西洋深層循環の弱化・停止が懸念されているが、その起源となる深層水形成は...

→ 領域がずれる、広すぎるなどの問題

→ 予測結果には不確実性が残る

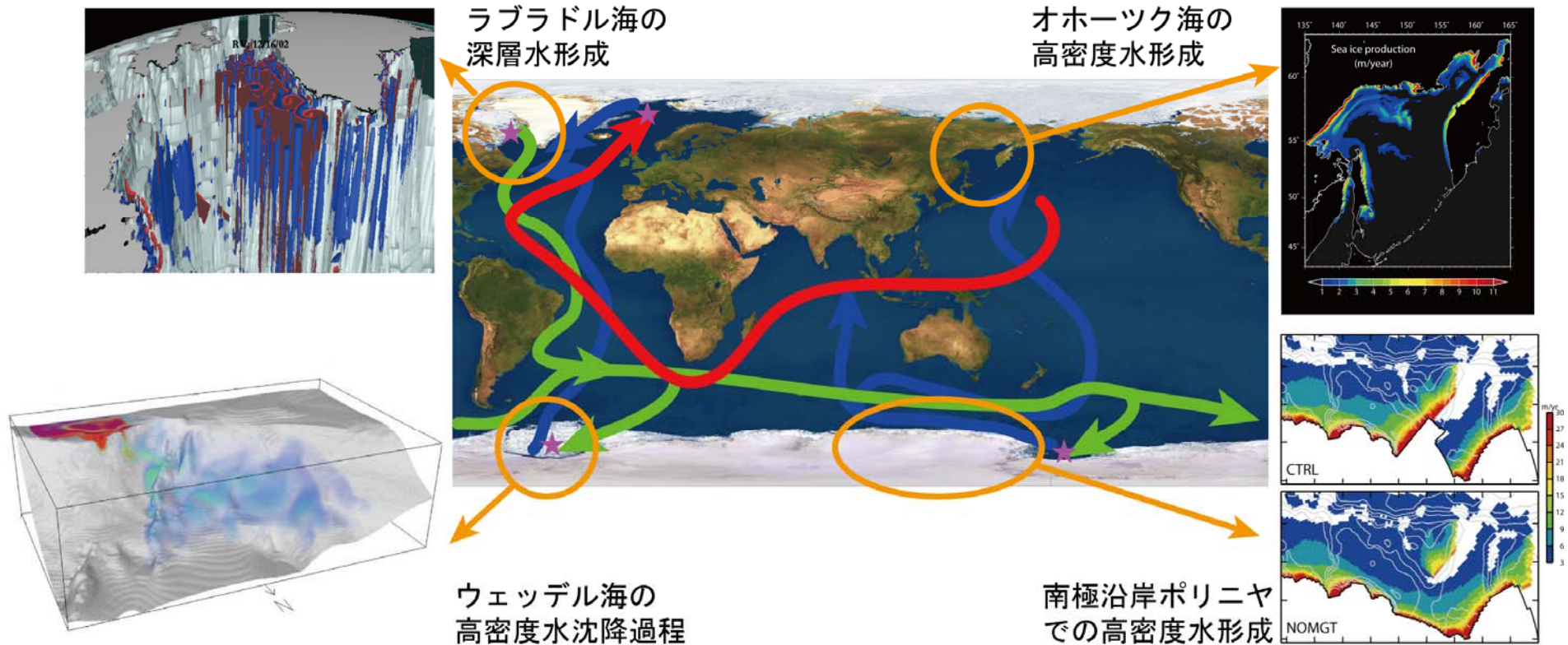


格子を細かくすることは解決につながるのだが、それもままならない



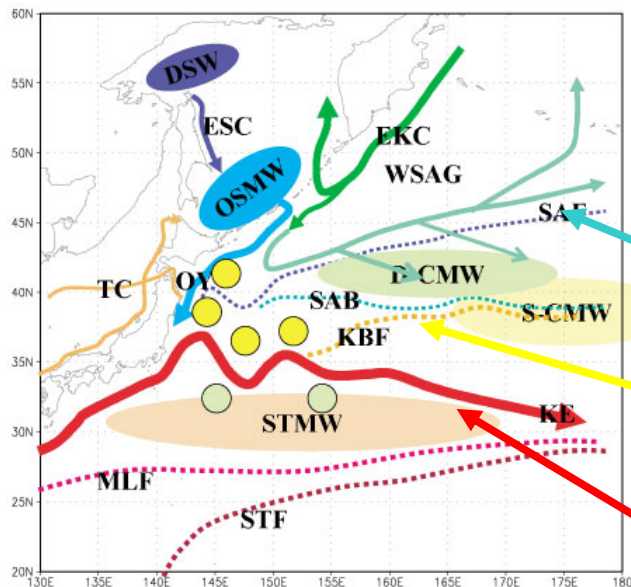
深層水形成領域だけの高精度シミュレーションを通して現象の特性を把握することにより、粗い格子でも近似精度を高めることが可能

温暖化予測シミュレーションにおける海洋



温暖化予測シミュレーションにおける海洋

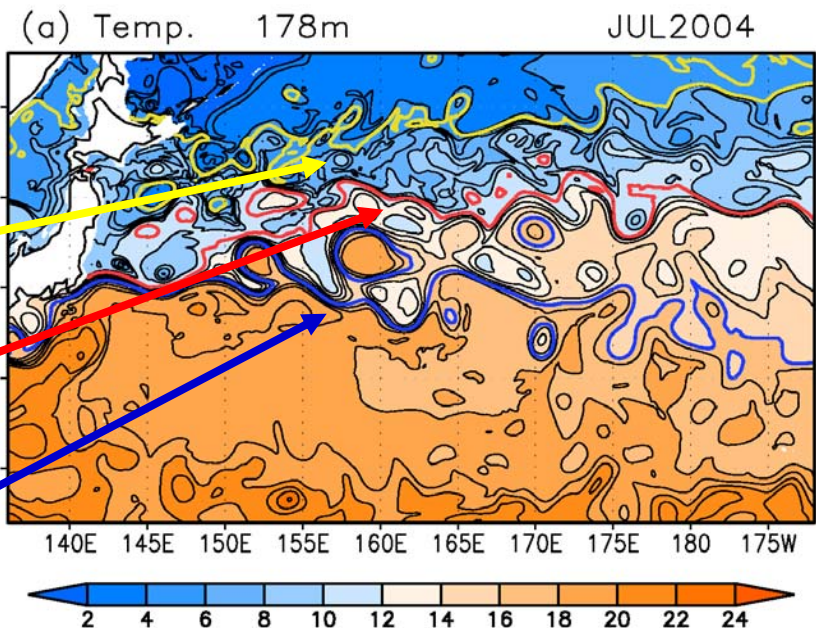
エルニーニョや十年規模変動の影響は、地域的・短期的には長期的・全球的温暖化傾向を凌駕し得る
→ そのシミュレーションには亜表層の海洋構造・循環を正しく表現することが必要だが...



亜寒帯前線

黒潮分岐前線

黒潮続流前線



観測に基づく概念図

水平 6 km 格子 亜表層水温

温暖化予測シミュレーションにおける海洋

エルニーニョや十年規模変動の影響は、地域的・短期的には長期的・全球的温暖化傾向を凌駕し得る

→ そのシミュレーションには亜表層の海洋構造・循環を正しく表現することが必要だが...



そのためには格子サイズが数 km 程度まで必要
(現状で全くダメということはないが、やはり不確実性が残る)



どこもかしこも、というわけにはいかないが、ターゲット・領域を絞って細かく表現することがあってもよいか

科学と実学としての海洋シミュレーション

科学的な見地から...

計算機の発達とともに、科学の手法としてのシミュレーションの可能性はますます広がる

温暖化予測という実学的な見地から...

最先端の海洋シミュレーションでも未知の部分があるのに、それを適用することもままならない

いずれにおいても...

計算機の発達をただ待てばよいのではない
シミュレーションを通じた科学的理解をシミュレーション技術向上に活かすことが不可欠