

2007.01.26

The 4th Cray HPC Conference 2007

気候変動の高精度予測シミュレーションに向けて

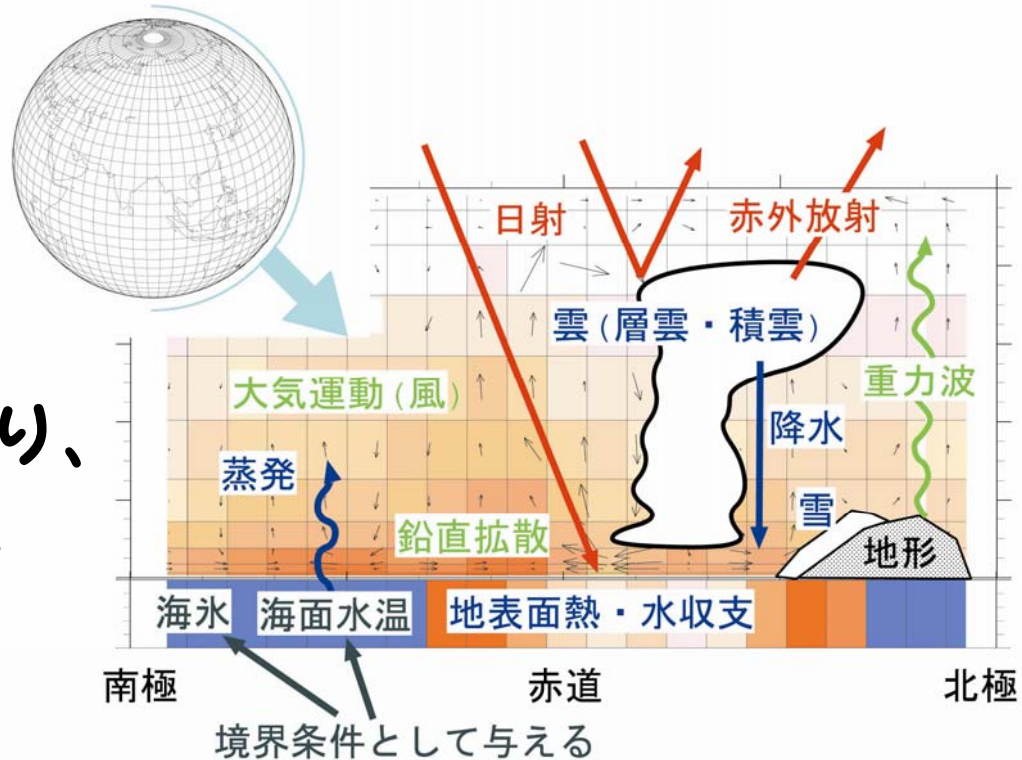
羽角博康

東京大学気候システム研究センター

気候変動(予測)シミュレーション

大気大循環モデル

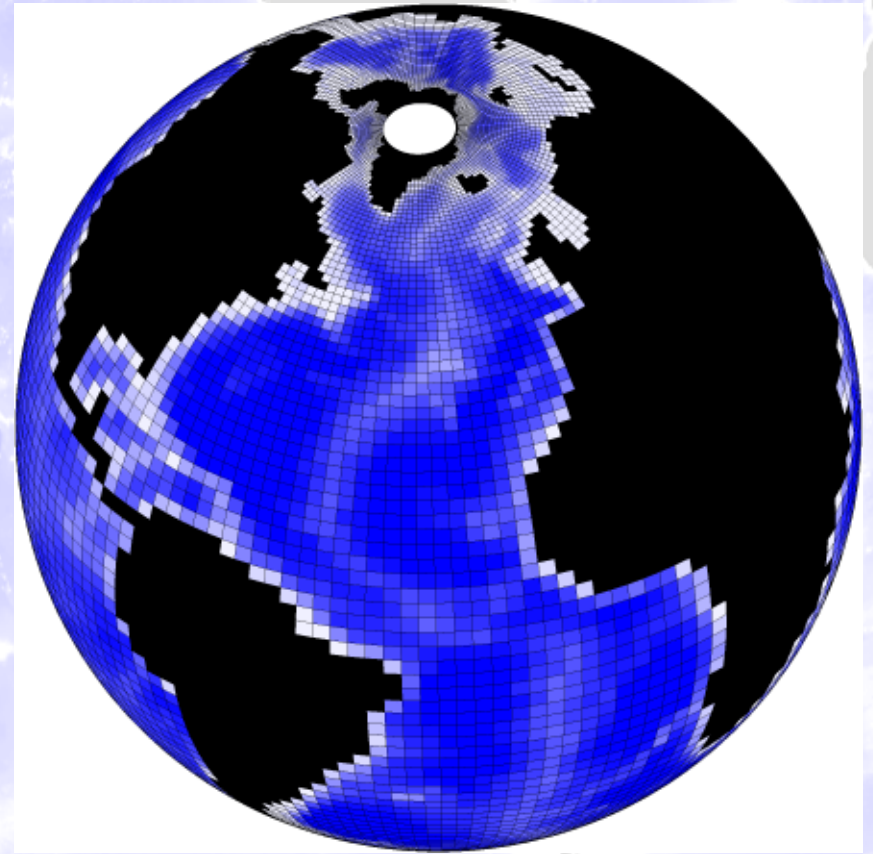
- 天気予報にも用いられる、大気の数値モデル
- 大気組成・海面水温・入射太陽光を与えて大気の状態をシミュレート
- 全球大気を有限の大きさを持つ"格子"に区切り、各格子点での温度・風速等を、一定の時間間隔ごとに計算



気候変動(予測)シミュレーション

海洋大循環モデル

- 海上大気の状態(気温・湿度・風速等)を与えて海洋内部の状態をシミュレート
- 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



気候変動(予測)シミュレーション

大気海洋結合大循環モデル

-大気大循環モデルと海洋大循環モデルを組み合わせて、**入射太陽光と大気組成**を与えるだけで**大気・海洋の状態**をシミュレート

地球温暖化（気候の強制変動）

大気中の温室効果気体（二酸化炭素など）濃度増加に起因する地表付近温度の上昇

→ 将来の温室効果気体濃度が予測できるならば、気候モデルによって温暖化予測が可能に

cf.) エルニーニョ予測など（気候の自然変動）

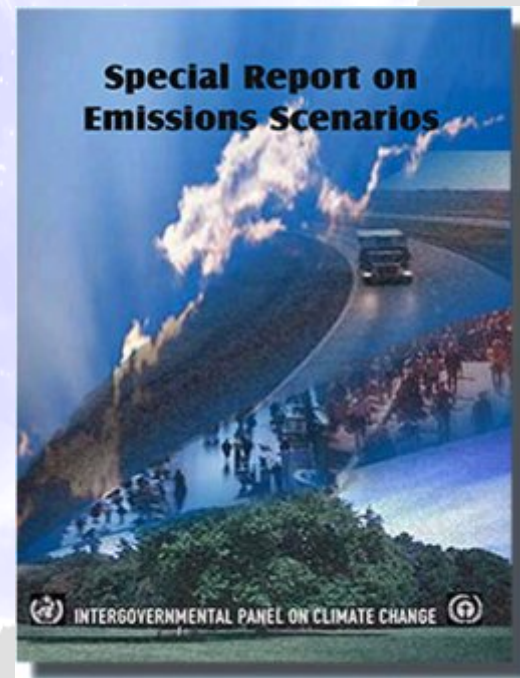
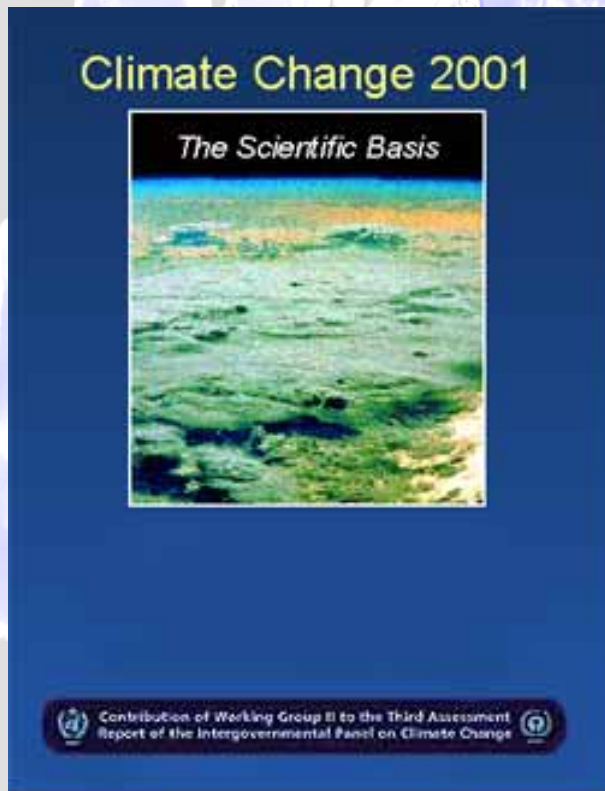
...本日はお話ししません

温暖化予測シミュレーション

気候変動に関する政府間パネル (IPCC)

第3次報告書: 2001年, 第4次報告書: 2007年, ...

排出シナリオに関する特別報告書 (SRES)



温暖化予測シミュレーション

SRES シナリオ

政策・産業活動に関する様々な将来予測に基づいた、
21世紀の温室効果気体排出量に関する予測

→ 全部で 40 種類

代表的シナリオ

A1B: 経済活動優先 → 720 ppm CO₂ at 2100

B1: 比較的強い排出抑制 → 550 ppm CO₂ at 2100

cf.) 2000年現在 370 ppm, 産業化以前 285 ppm

以下、A1Bシナリオの結果

(一般に温暖化予測結果として世に出るのがA1B)

温暖化予測シミュレーション

CCSR/NIES/FRCGC の予測モデル

IPCC第4次報告書に結果を提出したモデルの中で最高の解像度

大気水平格子: ~100 km

海洋水平格子: ~20 km

一般的なモデル解像度

大気水平格子: 200-300 km

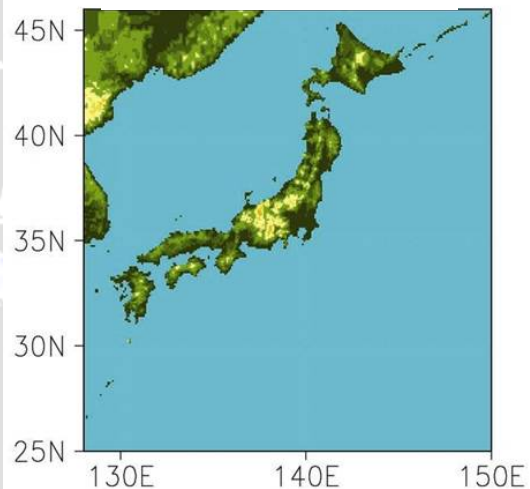
海洋水平格子: ~100 km

CCSR: 東京大学気候システム研究センター

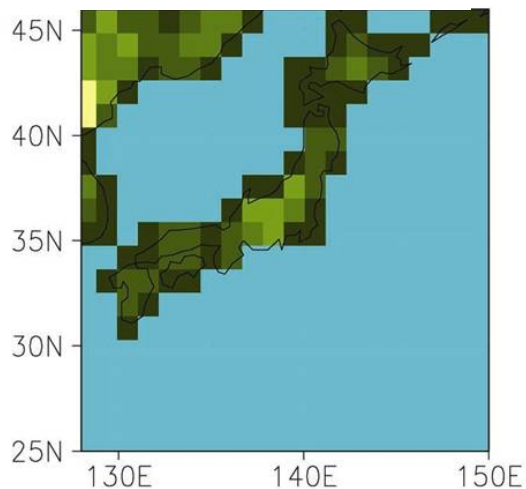
NIES: 国立環境研究所

FRCGC: 海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター

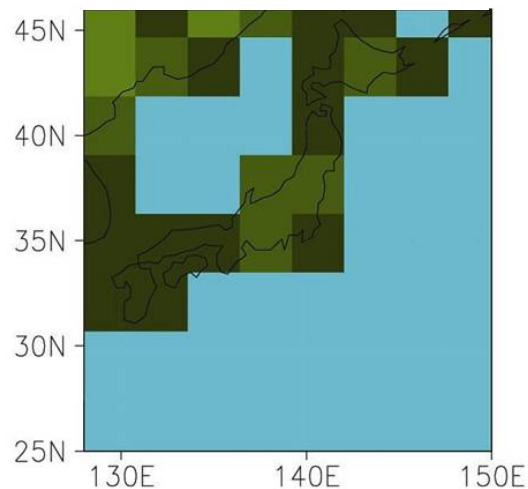
10 km 格子



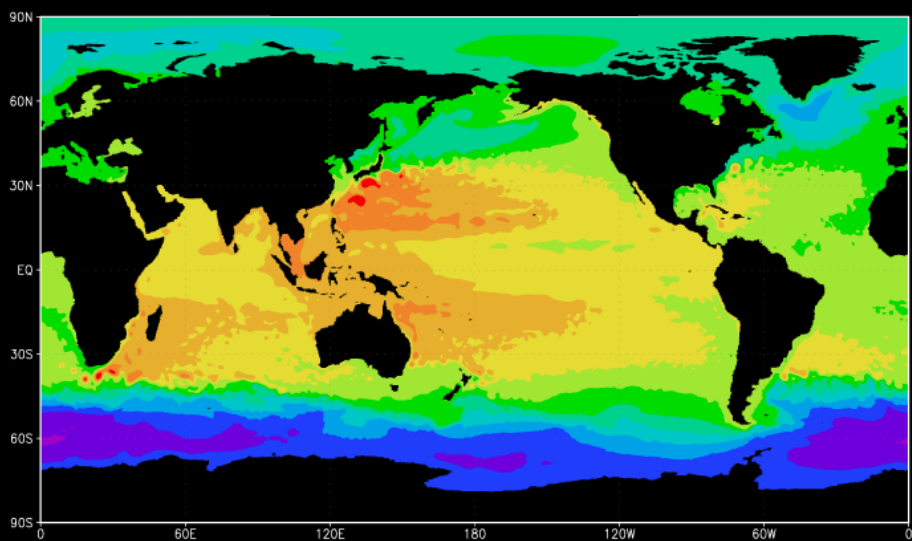
100 km 格子



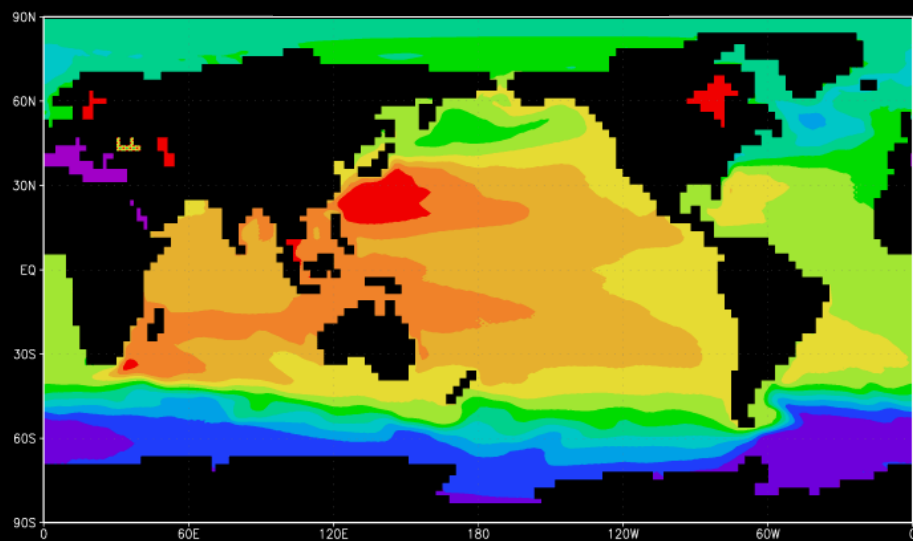
300 km 格子



20 km 格子



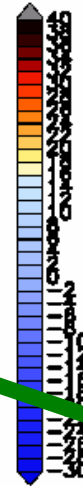
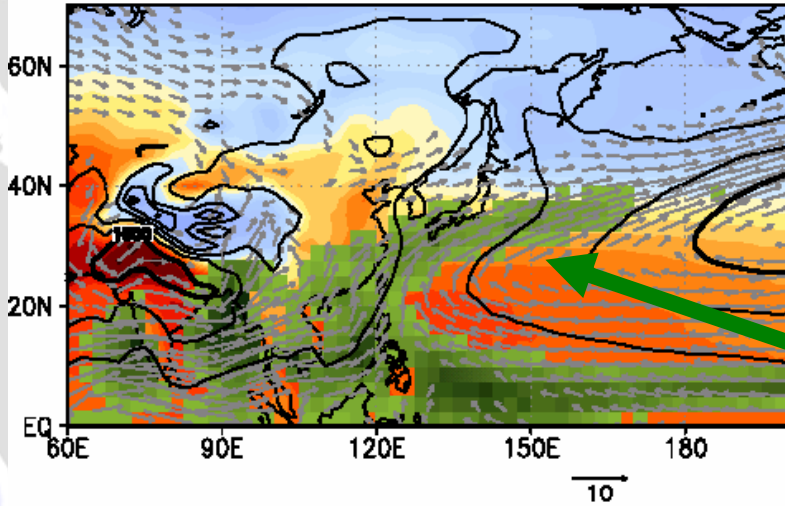
100 km 格子



温暖化予測シミュレーション

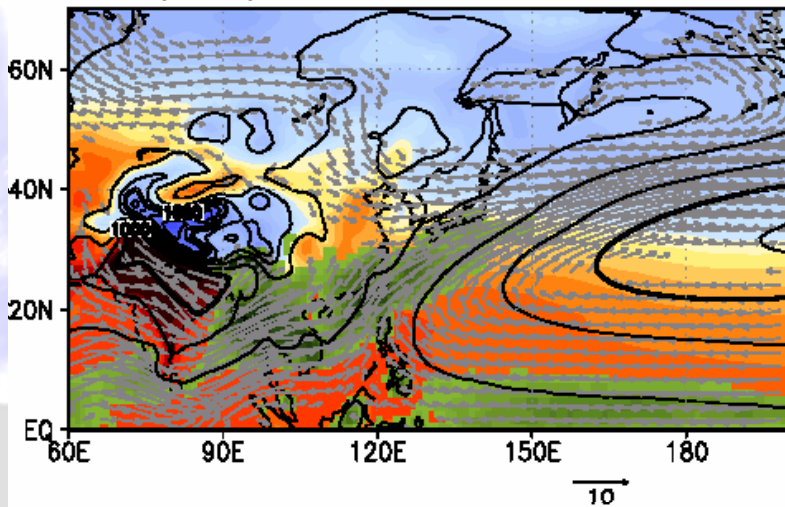
現在気候(6月)
の再現実験

T2/SLP/V850 1xCO2 Obs. Jun

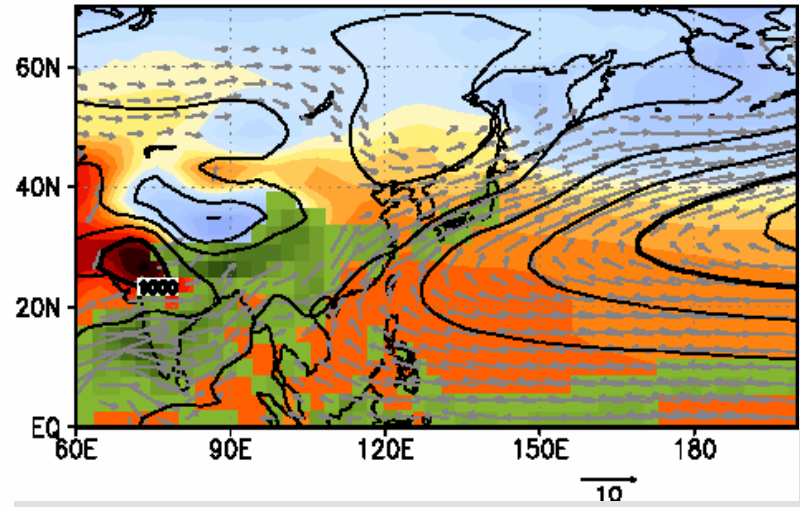


梅雨前線

T2/SLP/V850 1xCO2 Hi-CGCM Jun



T2/SLP/V850 1xCO2 Mid-CGCM Jun

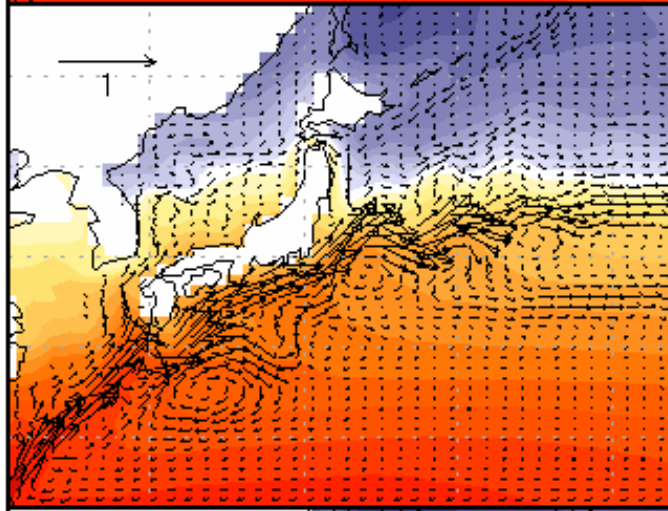
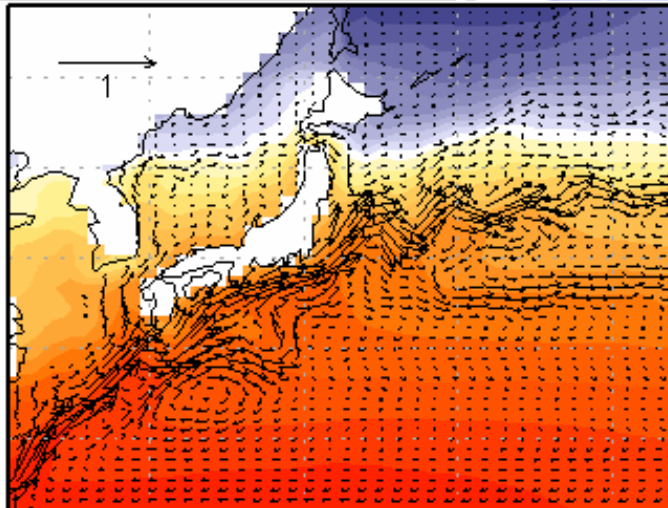


温暖化予測シミュレーション

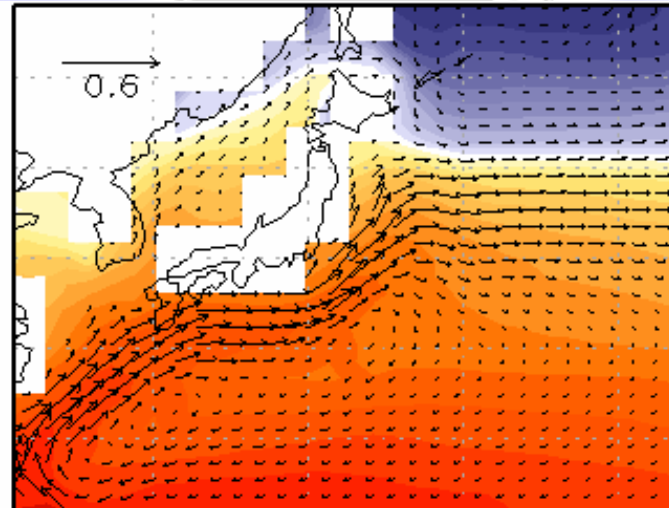
モデル解像度に伴う黒潮の表現の違い

大気
300 km
格子

大気
100 km
格子

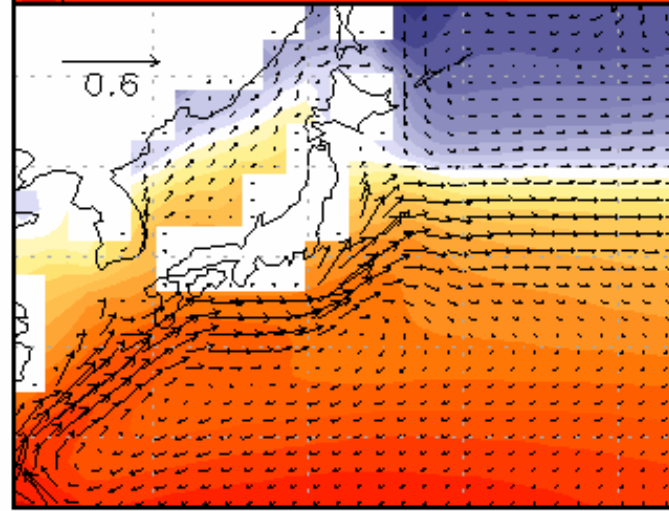


海洋 20 km 格子

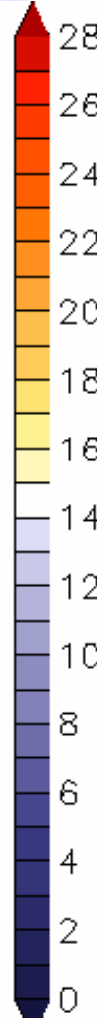


mAmO

hAmO



海洋 100 km 格子



温暖化予測シミュレーション

CCSR/NIES/FRCGC の予測モデル

必要な計算資源

...例えば **100 年分の温暖化予測実験**のために

CPU: 地球シミュレータ 86 ノード(理論性能 5.4 TFLOPS, 実効性能 1.6 TFLOPS)で数十日

→ 実際のところは、**確保できた CPU 資源で数百年分の計算が可能**なようにモデル解像度を決定

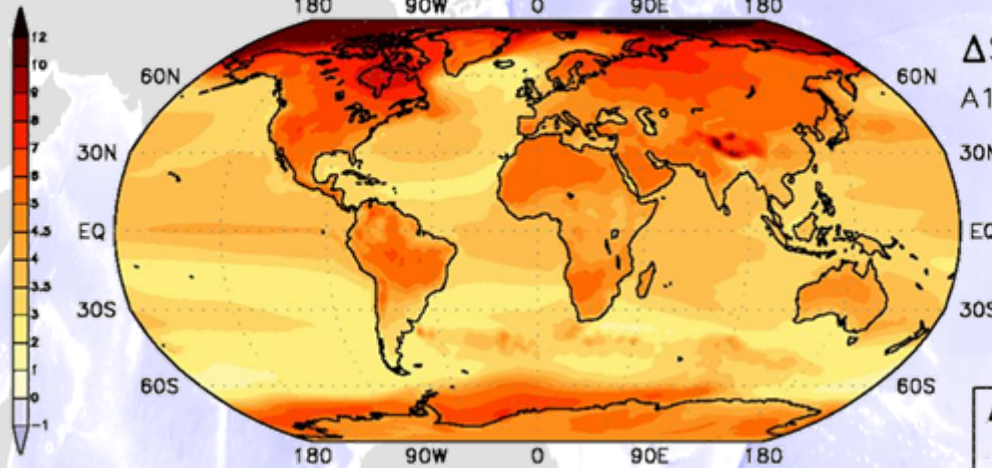
Memory: ~10 GB

Storage: ~5 TB (海洋の主要変数を月平均、大気的主要変数を日平均で出力した場合 ...控えめな見積り)

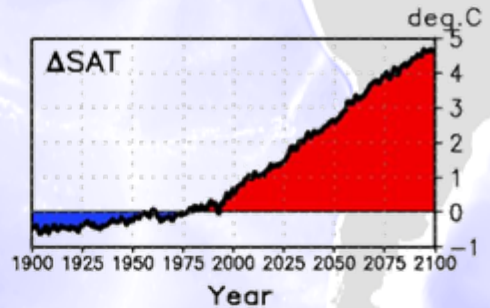
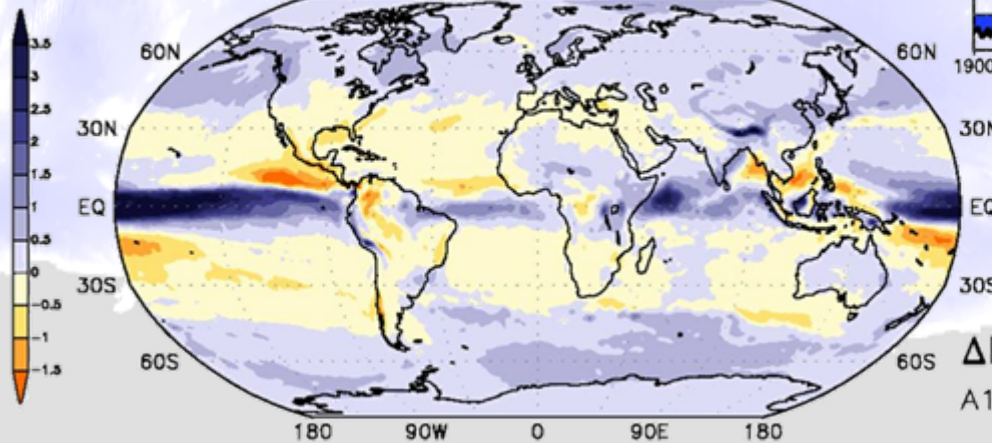
温暖化予測シミュレーション

CCSR/NIES/FRCGC による A1B シナリオ実験結果

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



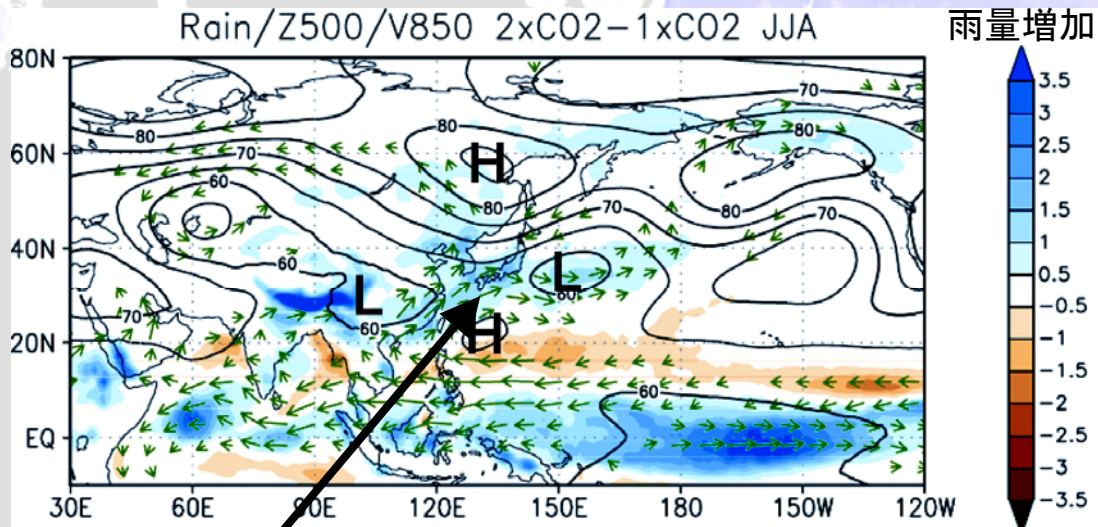
Δ SAT
A1b(2071-2100)
-20C3M(1971-2000)



Δ Rain
A1b(2071-2100)
-20C3M(1971-2000)

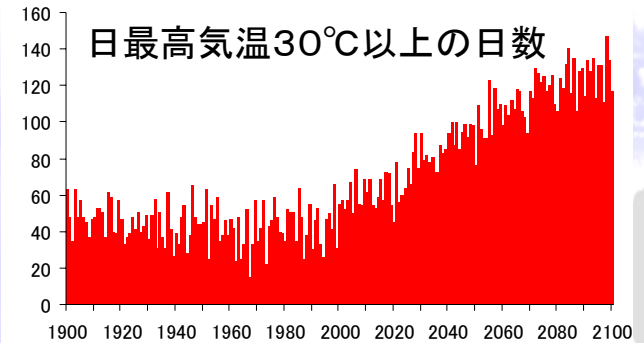
温暖化により日本の夏はどうなるか？ 「地球シミュレータ」による最新の予測結果

温暖化による気圧と雨量の変化(約70年後)

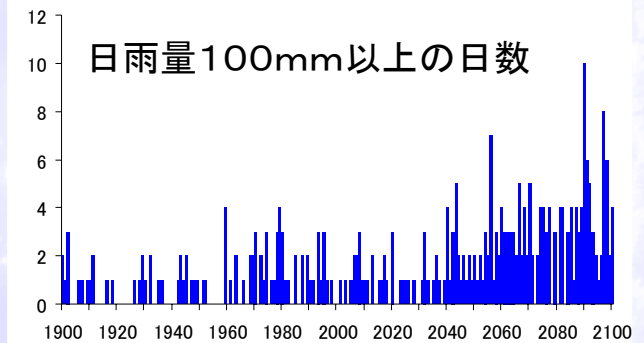


雨量は平均的に増加(青色の領域)

気温は平均的に2.5°C程度上昇



夏日の日数は平均的に増加



豪雨の頻度は平均的に増加

※ただし、年々の気候変動は自然のゆらぎが大きいので、特定の年(例えば今年)の異常気象を温暖化と関連付けるのは難しい

温暖化予測シミュレーション

CCSR/NIES/FRCGC の予測モデル

IPCC第4次報告書に結果を提出したモデルの中で最高の解像度

大気水平格子: ~100 km

海洋水平格子: ~20 km

→ これくらいの解像度、そして計算資源で、もう十分なのか?

ダメ

...現状の予測にはまだ大きな不確定性と不正確さ

- カオスによる本質的不確定性
- 雲と雲-放射相互作用のモデル表現
- 海洋の微小スケールプロセス / 沿岸海況

カオスとアンサンブルシミュレーション

カオスと天候・気候予測の限界

天気予報:

- 現在の大気の状態を初期条件とし
 - 大気の運動を記述する方程式系を数値的に解くことによって、未来の大気の状態を知る
- このとき、
- 現在の状態を完全に知ることはできない
 - 大気の運動を記述する方程式系は非線型である
(また、その方程式系は完全なものではない)
- ことに起因し、予測の精度や時間に限界が存在

cf.) エルニーニョ等の自然気候変動予測でも同じ

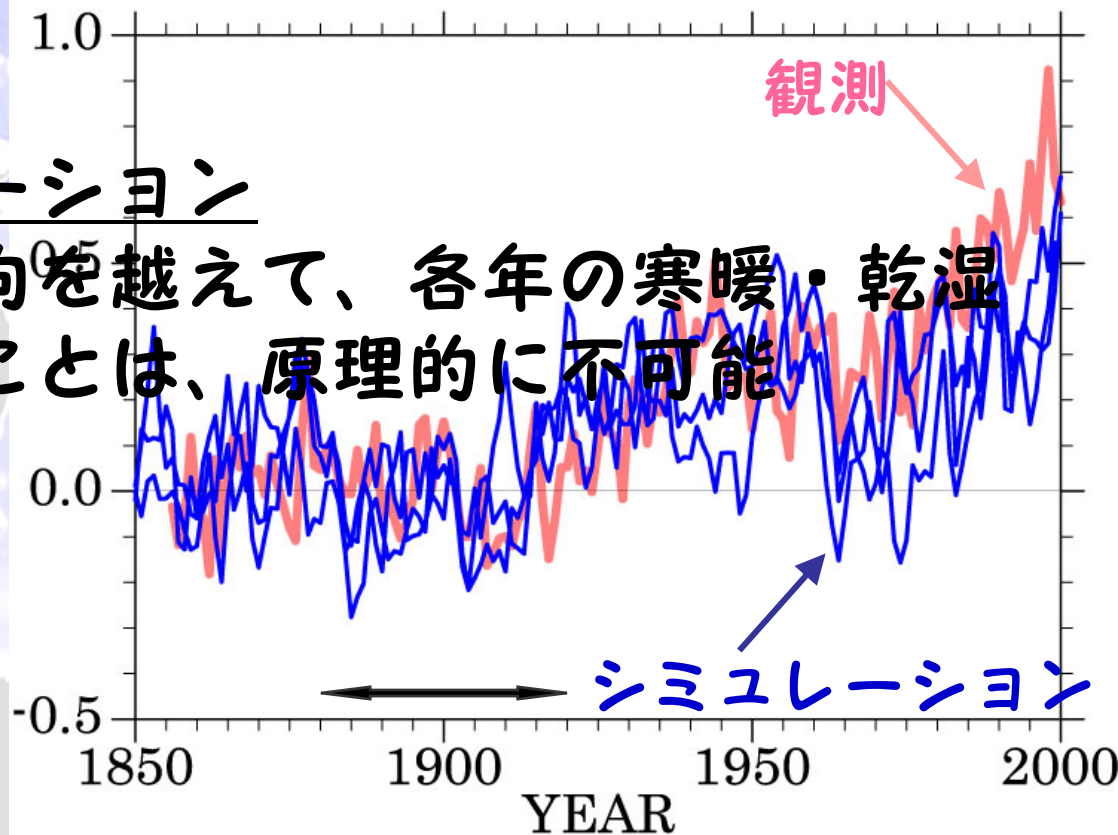
カオスとアンサンブルシミュレーション

気候モデルによる20世紀再現シミュレーション
強制変動はよく再現できて、自然変動(個々のエルニーニョ・ラニーニャなど)は合わない

温暖化予測シミュレーション

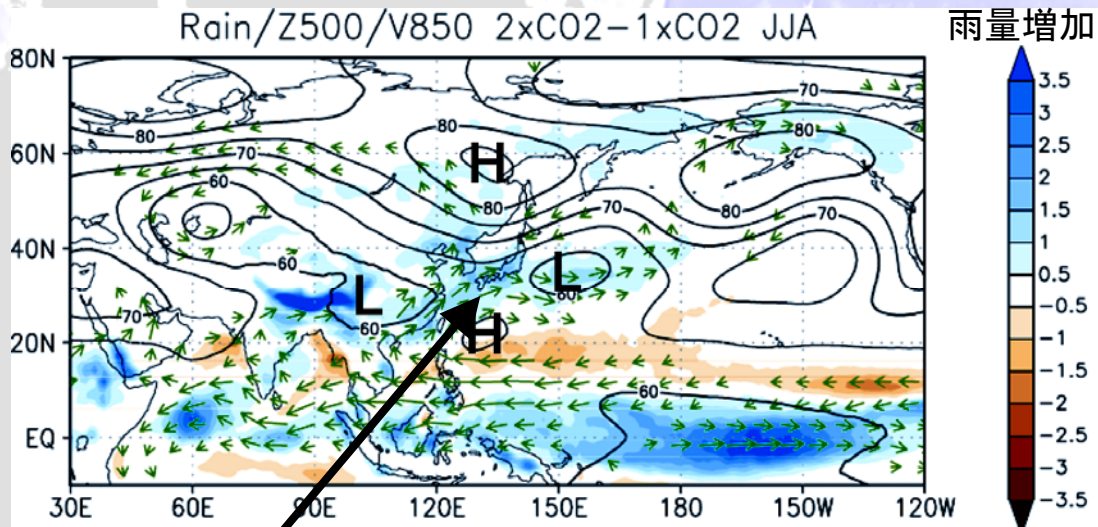
全体的な温暖化の傾向を越えて、各年の寒暖・乾湿等を完全に予測することは、原理的に不可能

全球平均地上気温
(1900年付近からの差)



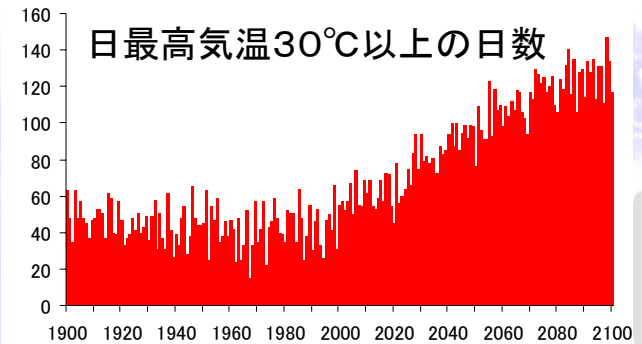
温暖化により日本の夏はどうなるか？ 「地球シミュレータ」による最新の予測結果

温暖化による気圧と雨量の変化(約70年後)

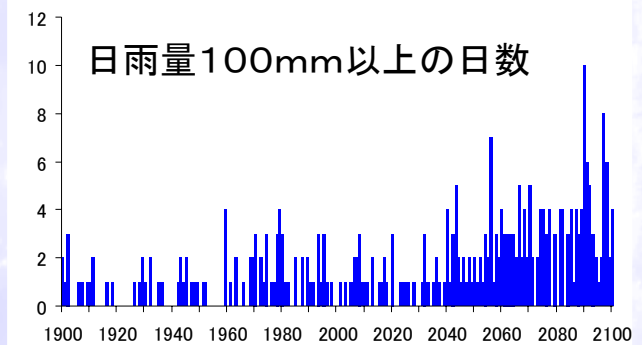


雨量は平均的に増加(青色の領域)

気温は平均的に2.5°C程度上昇



夏日の日数は平均的に増加



豪雨の頻度は平均的に増加

※ただし、年々の気候変動は自然のゆらぎが大きいため、特定の年(例えば今年)の異常気象を温暖化と関連付けるのは難しい

カオスとアンサンブルシミュレーション

アンサンブルシミュレーションと確率分布予測

初期値をわずかに変えた予測実験を数多く行うことで、予測の幅(不確定性)と、特定の予測結果の確率を求める

→ IPCC第5次報告書での中心的課題のひとつ

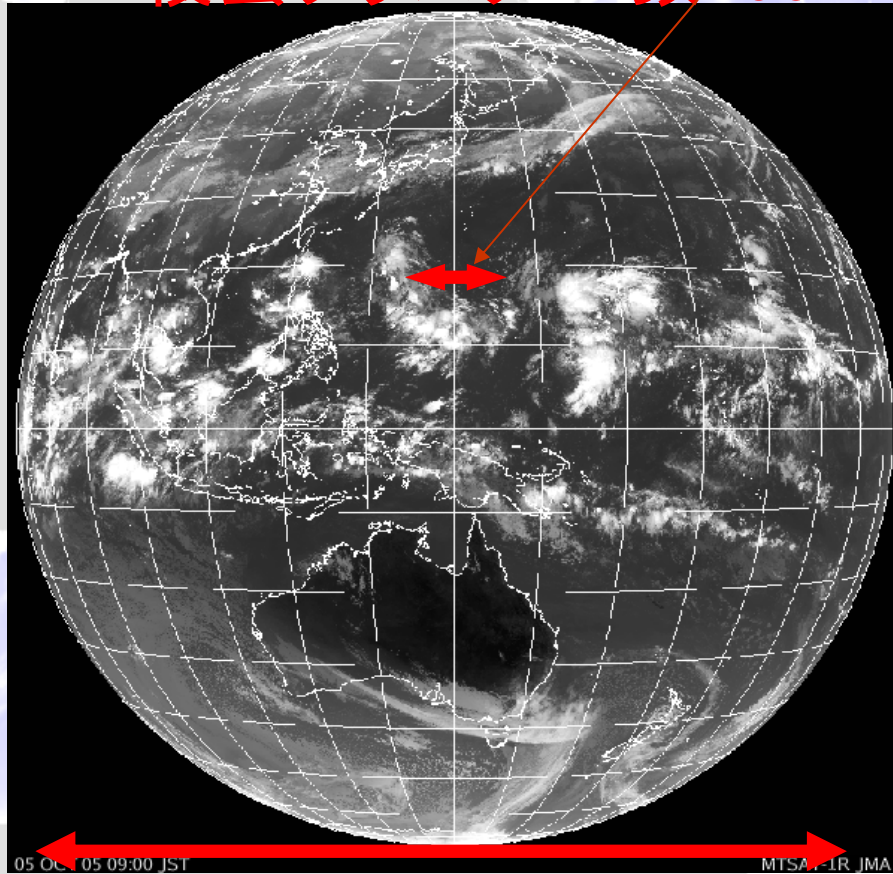
同じ解像度の気候モデルを用いた場合でも、必要な計算資源(CPU, ストレージ)はアンサンブルメンバー数の分だけ(> 10 倍)増加

雲解像シミュレーション

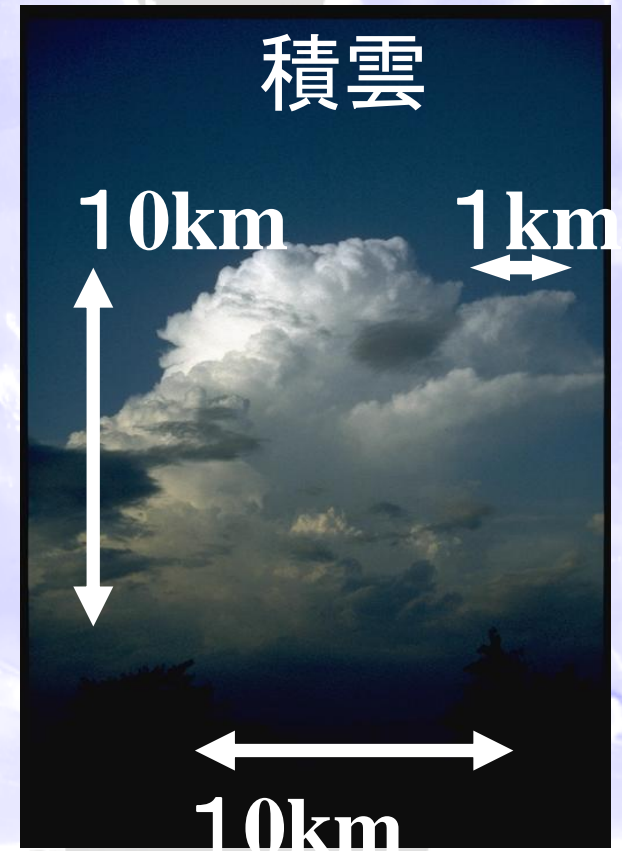
雲(特に積雲)と大気大循環

積雲対流: 熱帯を中心とした大気循環の駆動源

積雲クラスター ~ 数100km

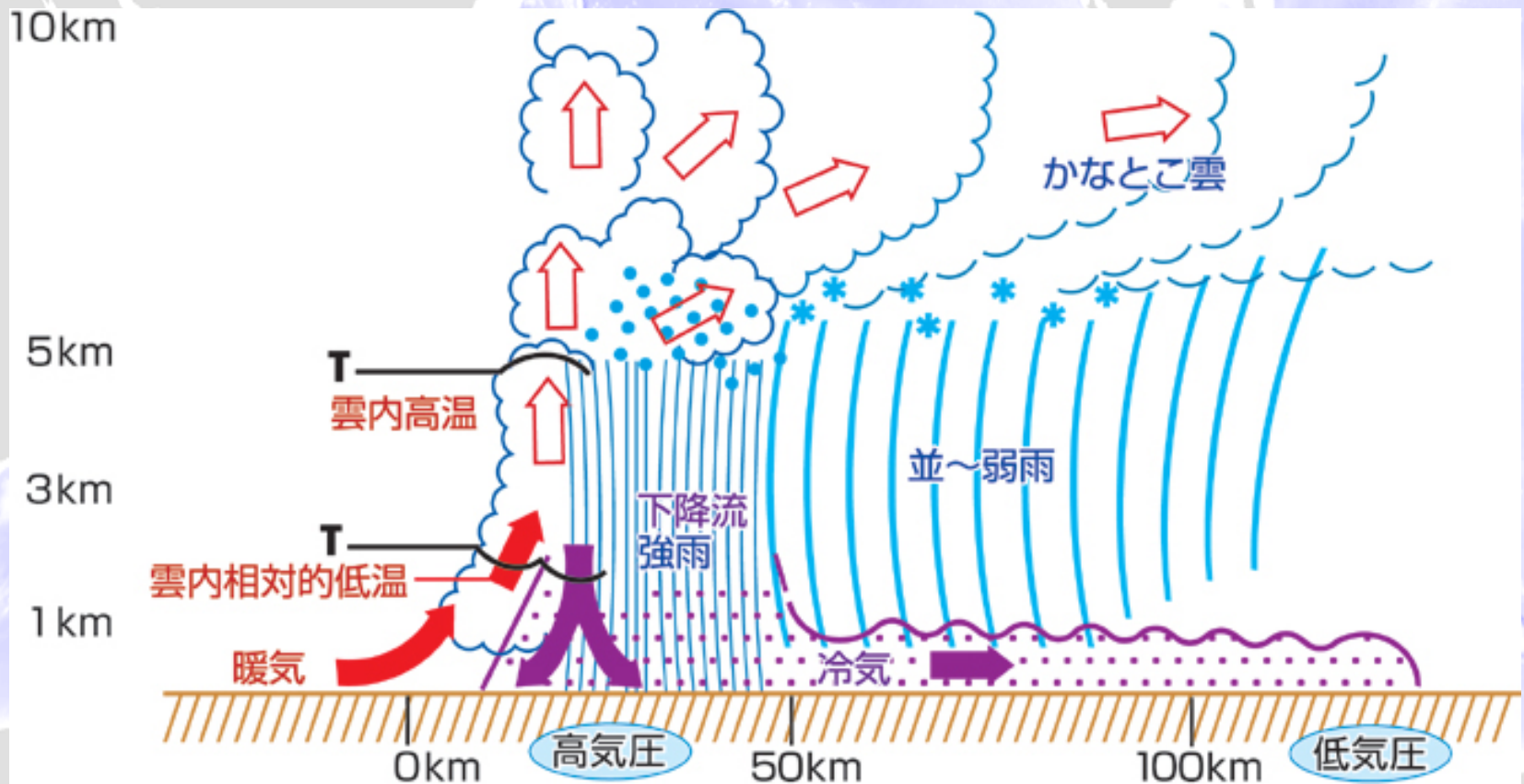


12740km



雲解像シミュレーション

雲(特に積雲)と大気大循環



雲解像シミュレーション

雲と温暖化

雲：太陽放射を反射 → 気候の寒冷化要因
地球放射を吸収 → 気候の温暖化要因

温暖化における気温上昇は、どの種類の雲がどのように増減するかに依存
→ 現在の ~100 km 格子大気モデルにおける大きな不確定要素

雲解像シミュレーション

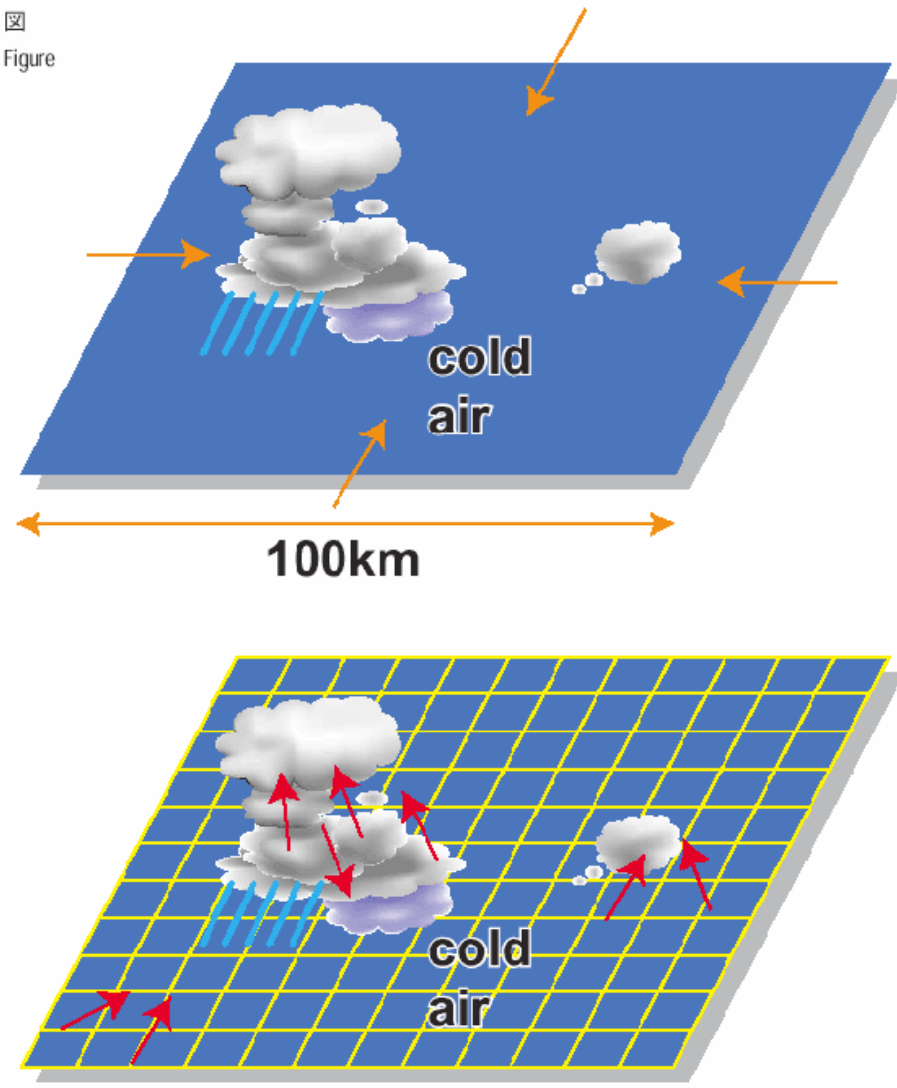
大気大循環モデルにおける(積)雲

~10 km の積雲の発生や消滅を ~100 km 格子の変数を用いて経験則(のようなもの)で表現

経験則は現在の気候状態に基づくが、現状を表すのにも不正確さを伴う

温暖化時には、その経験則が有効とは限らない...

図
Figure



雲解像シミュレーション

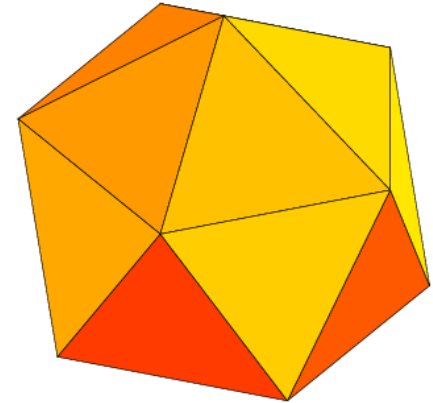
雲解像モデル

非静力学正20面体格子大気モデル (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model: NICAM)

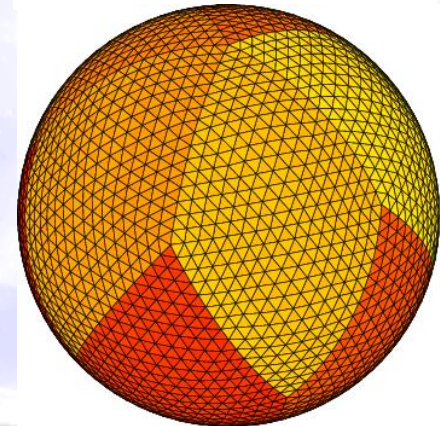
気候計算に適した高分解能大気大循環モデル

全球で雲を解像する大気モデル: 格子間隔 **5 km 以下**

正20面体 icosahedron



4回分割



11回分割: $\Delta x=3.5\text{km}$

雲解像シミュレーション

3.5 km 格子雲解像モデル

必要な計算資源

...例えば 100 年分の温暖化予測実験のために

CPU: 地球シミュレータ 320ノード(全体の半分: 理論性能 20 TFLOPS)で 25 年

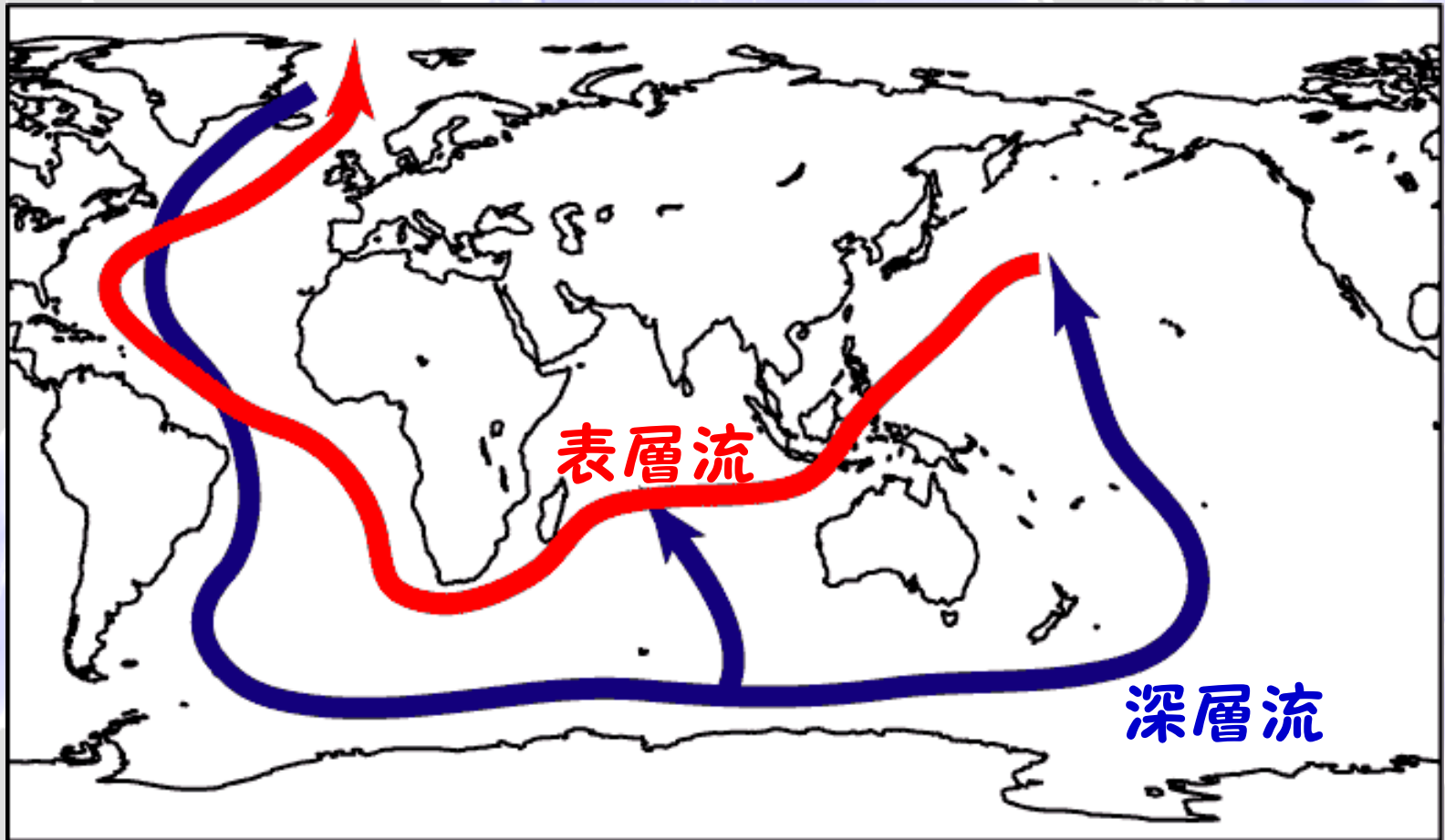
Memory: ~5 TB

Storage: ~10 PB

微小プロセス／沿岸海況シミュレーション

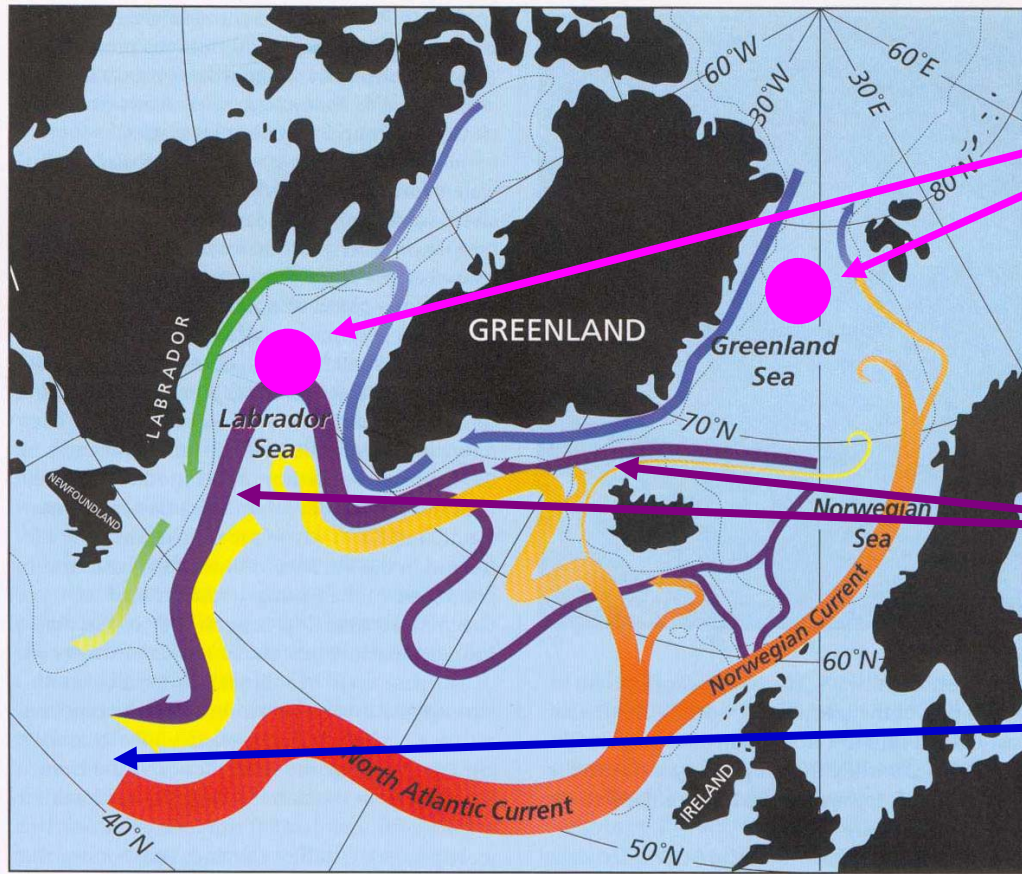
長期気候変動と海洋深層循環

熱的慣性の大きい海洋深層の変化が長期気候変動を
コントロール



微小プロセス／沿岸海況シミュレーション

全球規模深層循環の成り立ち

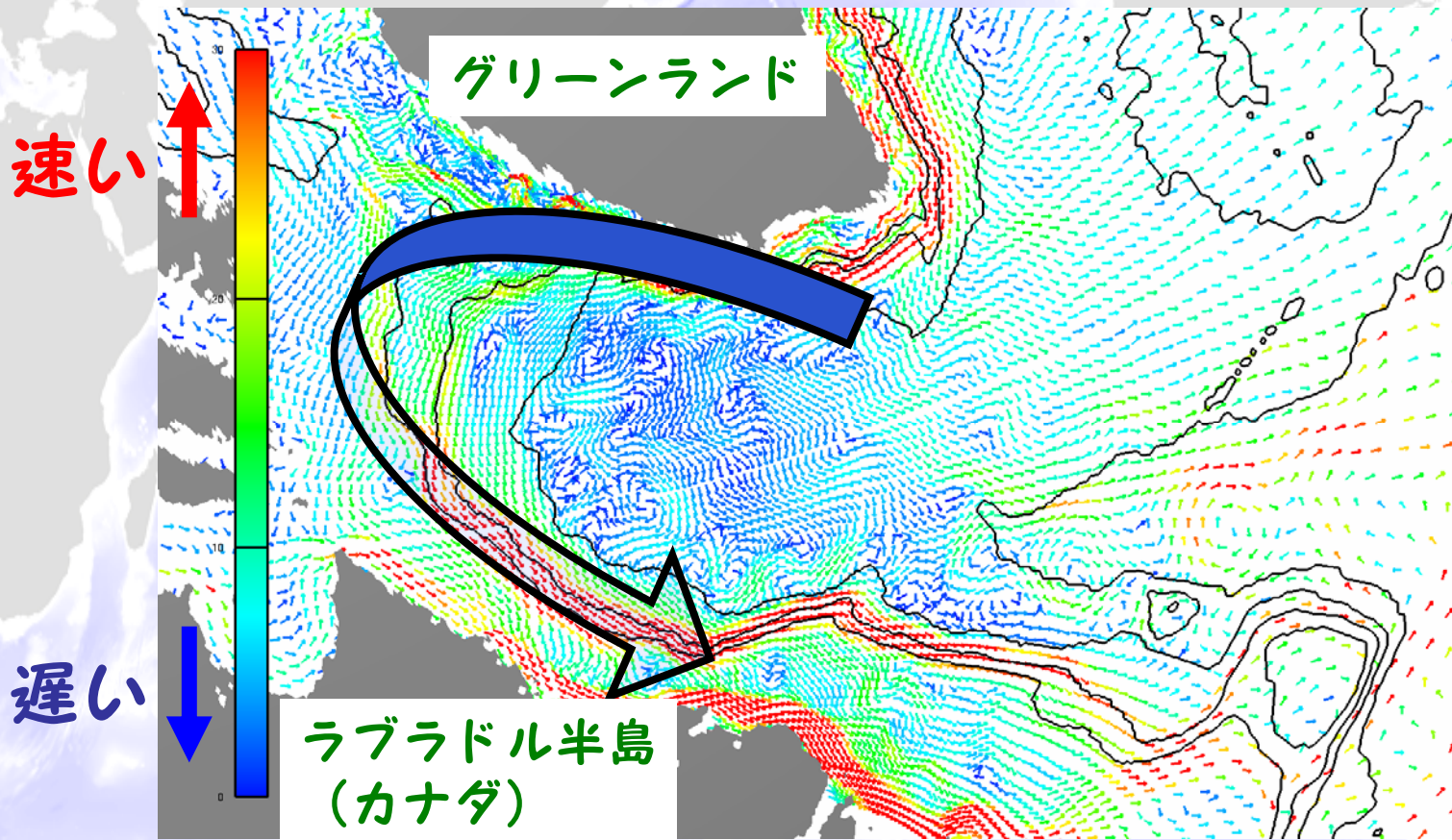


ラブラドル・グリーンランド海の局所的対流による深層水形成
↓
大西洋へ流出
↓
大西洋全体の深層循環

長期気候変動をコントロールする海洋深層循環は、局所的な現象によって支配される

微小プロセス／沿岸海況シミュレーション

全球規模深層循環の起源プロセス



数 km 以下の構造を表現する必要がある

微小プロセス／沿岸海況シミュレーション

3 km 格子海洋大循環モデル

必要な計算資源

...例えば **100 年分の温暖化予測実験**のために

CPU: 実効性能 1 PFLOPS で数ヶ月

Memory: ~2 TB

Storage: ~10 PB

沿岸海況への影響評価を行うには、これでもまだまだ足りない

最後に

気候のシミュレーション研究の特徴：
計算の中間状態を逐次保存し、後から解析
→ 出カデータが膨大

計算速度向上は、もちろん望むところだが、データ
ストレージも同時に格段の向上がなければ、実質的
には研究・プロダクトにつながらない

→ **1 PFLOPS** の計算資源を利用した計算結果を有
効に利用するためには最低限 **10 PB** のストレージ
が必要