

# 地球環境(地球変動)分野の特徴

1. 古くから計算機利用  
経験のある分野、ES  
の使用実績

2. 研究成果が国民生活  
に直結している分野  
＜防災情報、レジャー、  
一次産業、交通など＞

3. 人間活動の結果として生じている地球温暖化問題に対応していくために、  
適応策、緩和策、将来の地球環境維持のための政策的対応、などの議論  
のために高精度の環境予測が必須

1922 リチャードソンによる数値天気予報の試み(タイガー計算機)

1950 チャーニー・フィヨルトフト・フォンノイマン  
最初の数値天気予報(1層モデル)研究発表

＜ENIACを用いた研究＞

1953 チャーニー・フィリップス  
2層モデルにより低気圧発達実験

1954 スウェーデンで数値予報開始(1層モデル, 北大西洋)

1955 アメリカで数値予報開始(1層モデル, 北半球)

1956 フィリップス「大気大循環の数値実験」

1959 日本・気象庁 数値予報開始(1層モデル, 北半球)

2002～ 地球シミュレータを活用した地球温暖化予測研究によるIPCCへの貢献  
(人・自然・地球共生プロジェクト)→21世紀気候変動予測革新プログラム  
雲解像大気大循環モデルの威力を世界の関係者に認識させた→モデルサ  
ミット(2008.5.6-9)でkmスケールのモデル開発を今後の目標として採択

高精度の変化予測、地域毎の予測情報----気候感度問題(雲分布、光学特性、空間解像度)

プロセス解明(陸域・海洋炭素循環、氷床、棚氷など)

空間解像度

**The World Modelling Summit for Climate Prediction**, jointly organized by the World Climate Research Programme, World Weather Research Programme, and the International Geosphere-Biosphere Programme, was held at the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts on **6-9 May 2008**. The Summit was organized to develop a strategy to revolutionize prediction of the climate through the 21st century to help address the threat of global climate change, particularly at the regional level.

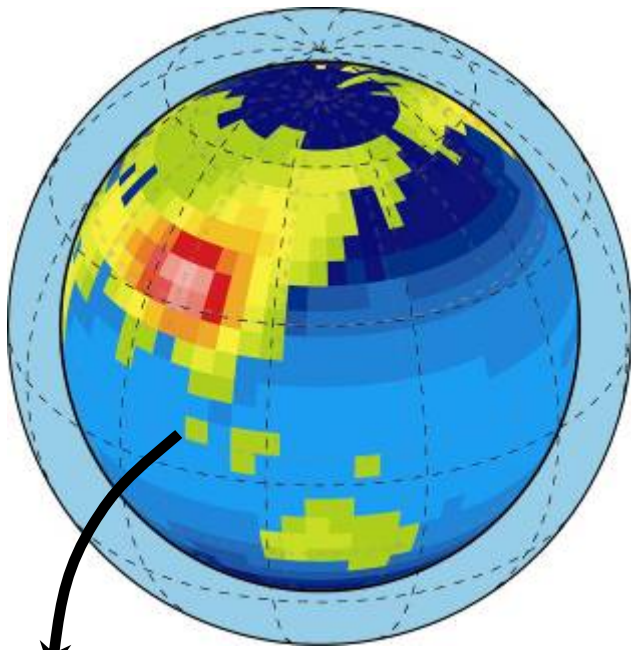
The Summit concluded:

3. **Climate prediction is among the most computationally demanding problems in science. It is both necessary and possible to revolutionize regional climate prediction**: *necessary* because of the challenges posed by the changing climate, and *possible* by building on the past accomplishments of prediction of weather and climate. However, neither the necessary scientific expertise nor the computational capability is available in any single nation. A comprehensive international effort is essential.

7. The central component of a world climate research facility for climate prediction will be one or more dedicated high-end computing facilities that will enable climate prediction at the model resolutions and levels of complexity considered essential for the most advanced and reliable representations of the climate system that technology and our scientific understanding of the problem can deliver. This computing capability acceleration, leading to systems at least **a thousand times more powerful** than the currently available computers, **will permit** scientists to strive towards **kilometre-scale modelling of the global climate system** which is crucial to more reliable prediction of the change of **convective precipitation especially in the tropics**.

# 気象(数値天気予報)のモデル

大気・海洋・陸面を3次元の格子に切る(格子点法: 離散化の一方法)



$U, V, p, T, q, \dots$

各格子で物理量を定義

流体の方程式を離散化して解く

大気中の流れを記述する物理法則は,

流体の運動方程式

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} - \left( f + \frac{\tan \varphi}{a} u \right) v &= -\frac{\partial p}{\rho a \cos \varphi \partial \lambda} + F_\lambda \\ \frac{dv}{dt} + \left( f + \frac{\tan \varphi}{a} u \right) u &= -\frac{\partial p}{\rho a \partial \varphi} + F_\varphi \\ \frac{dw}{dt} - \frac{\partial p}{\rho \partial z} &= -g + F_z\end{aligned}$$

質量保存の式

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left[ \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial (v \cos \varphi)}{\partial \varphi} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] = 0$$

空気塊についての熱力学第1法則の式

$$c_v \frac{dT}{dt} + p \frac{da}{dt} = Q$$

状態方程式

$$p = \rho R T$$

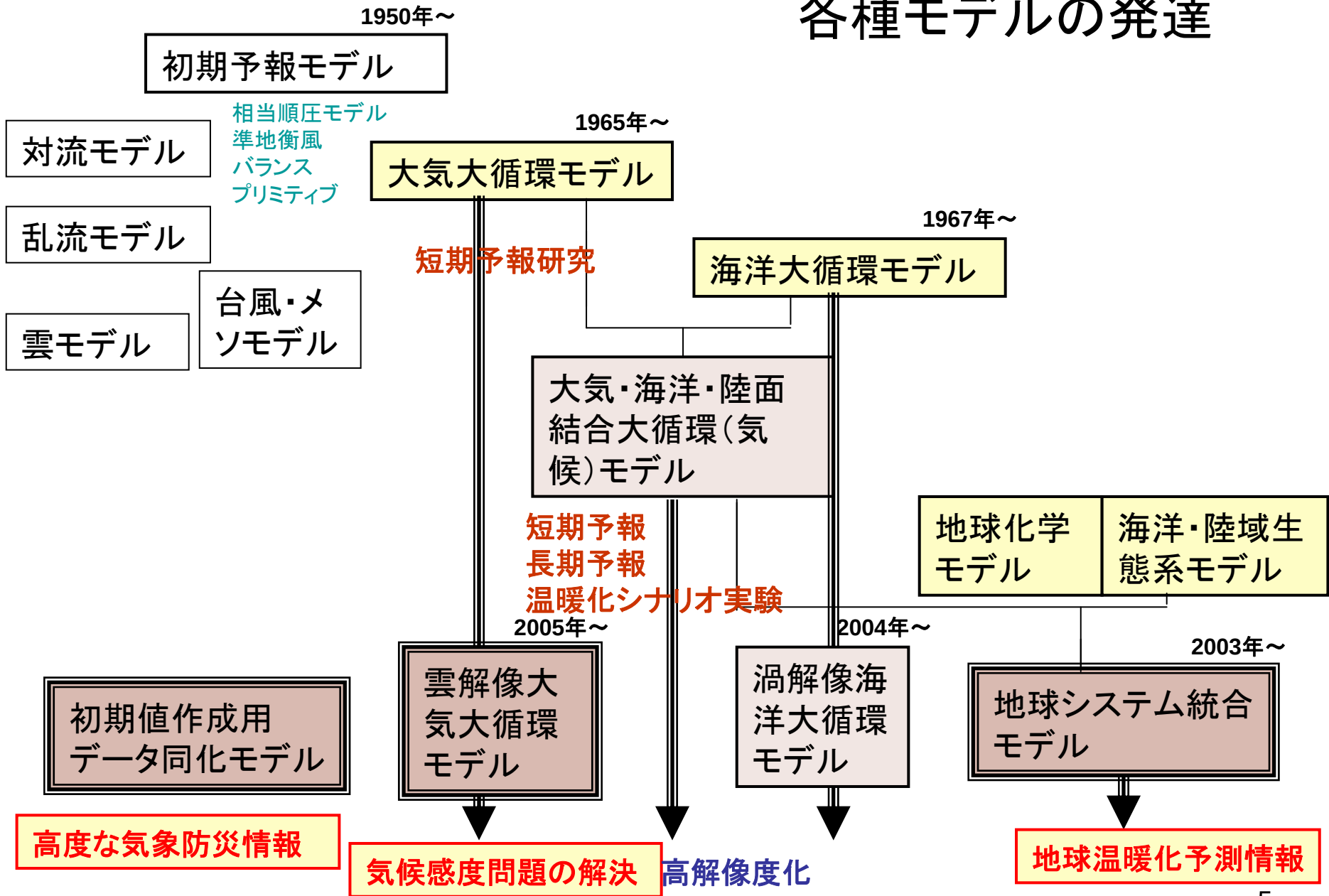
である。但し,

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

水蒸気量の保存の式

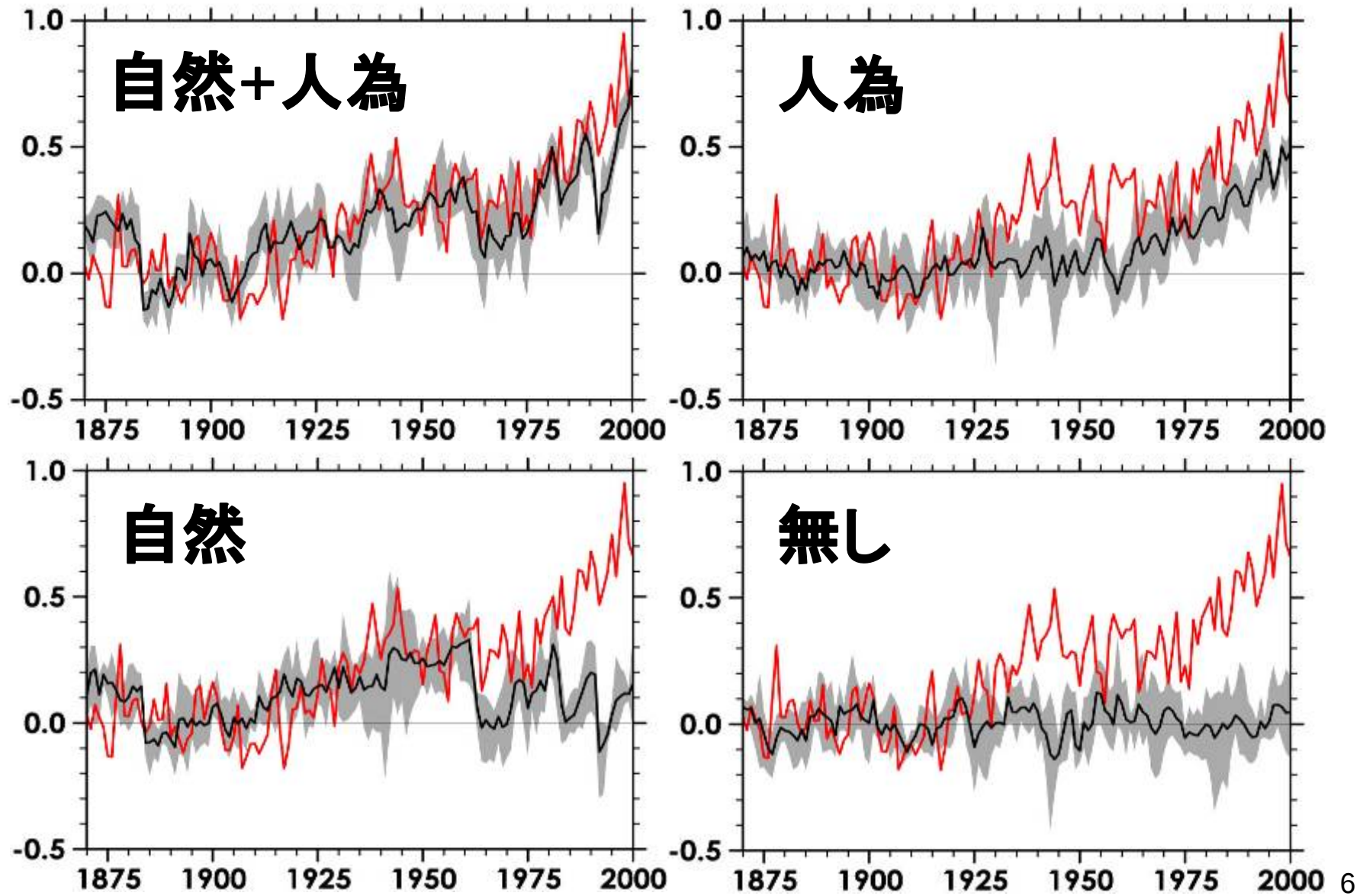
$$\frac{dq}{dt} = -c - \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_q}{\partial z}$$

# 各種モデルの発達

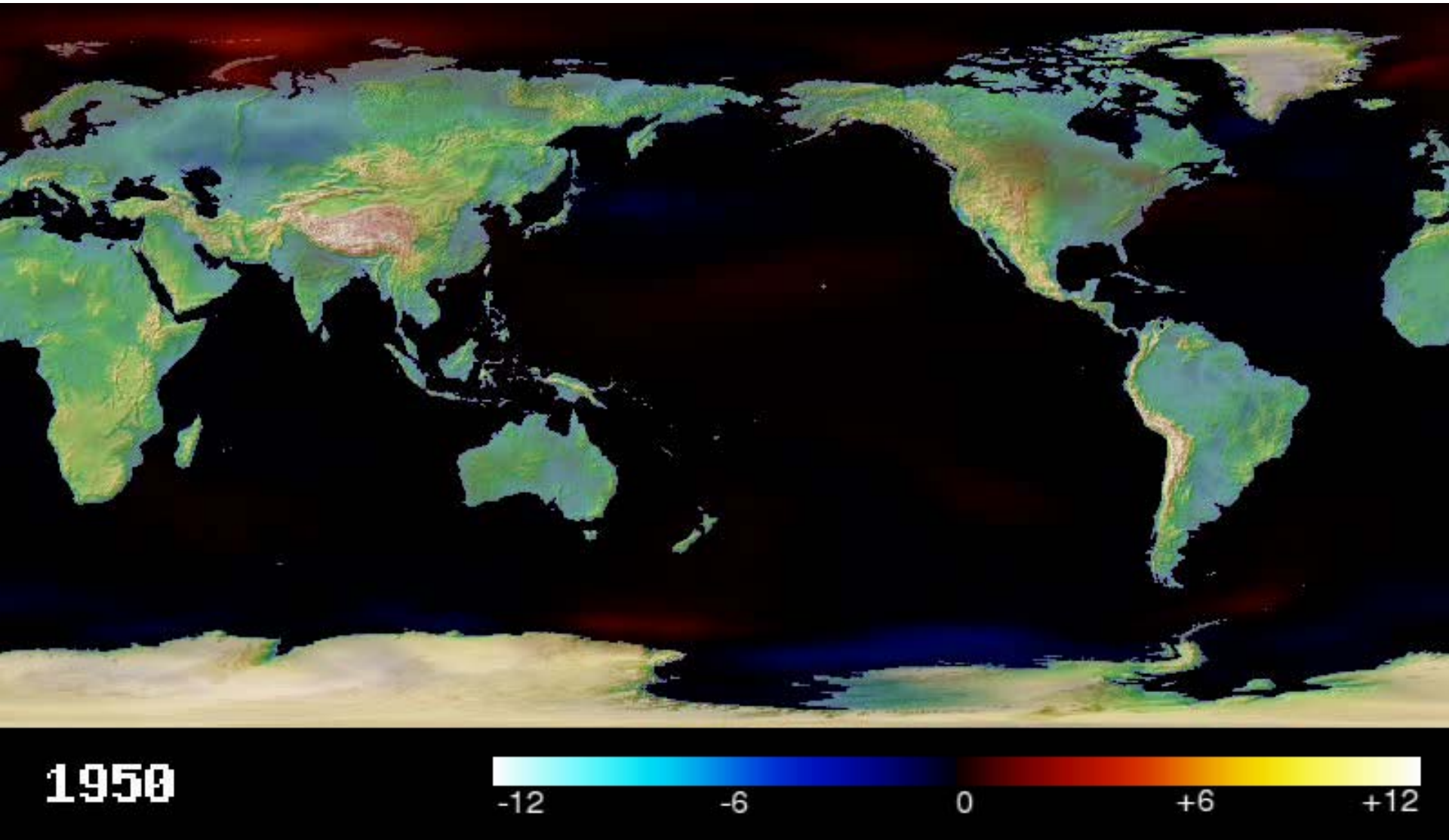


# 気候モデルによる20世紀の気候変動再現実験: 全球平均地上気温の比較

赤: 観測、黒: モデル

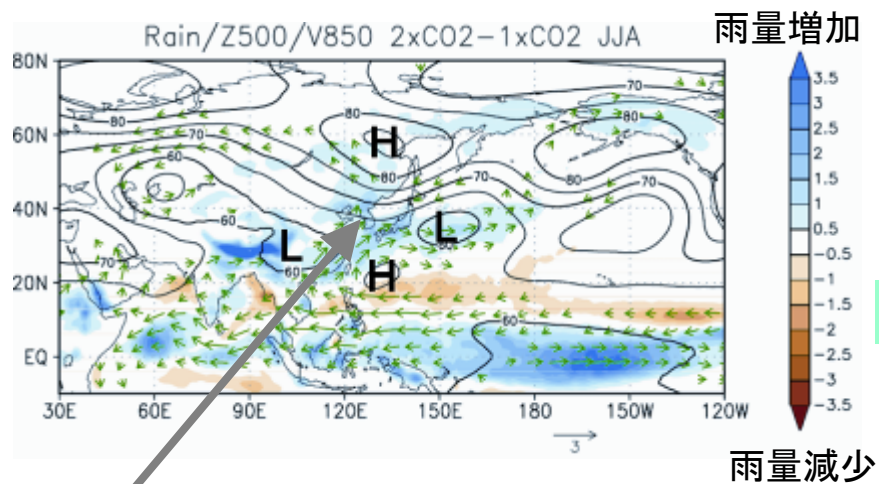


# CCSR/NIES/FRCGC結合モデルによる地球温暖化予測： 地上気温の変化

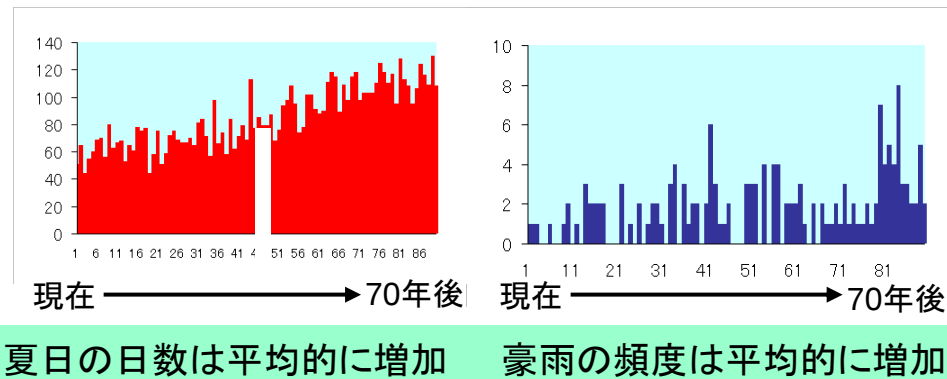


# 「地球シミュレータ」による地球温暖化予測結果

## 温暖化による気圧と雨量の変化(約70年後)

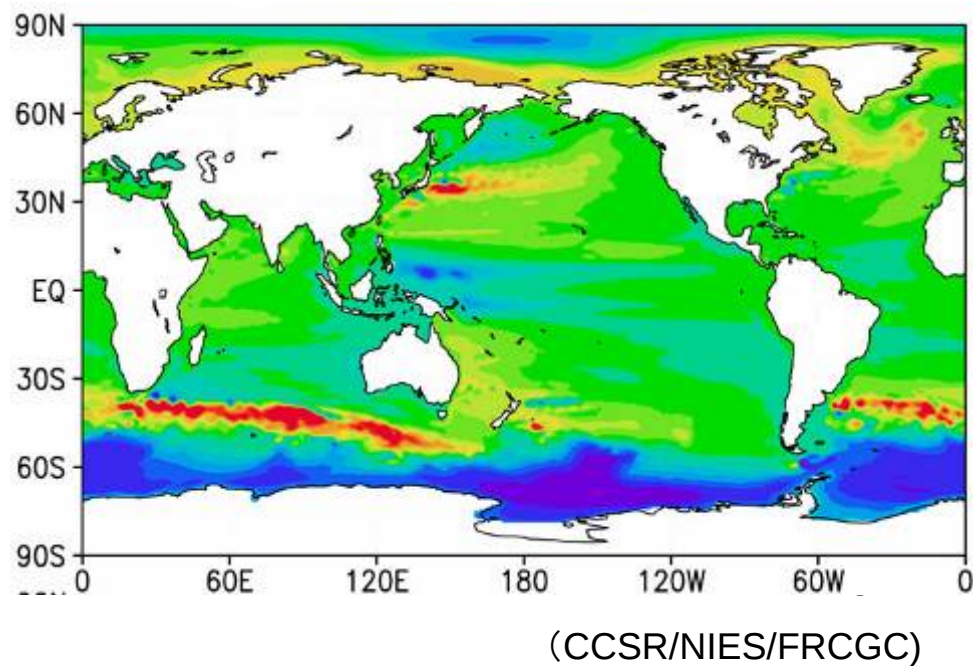
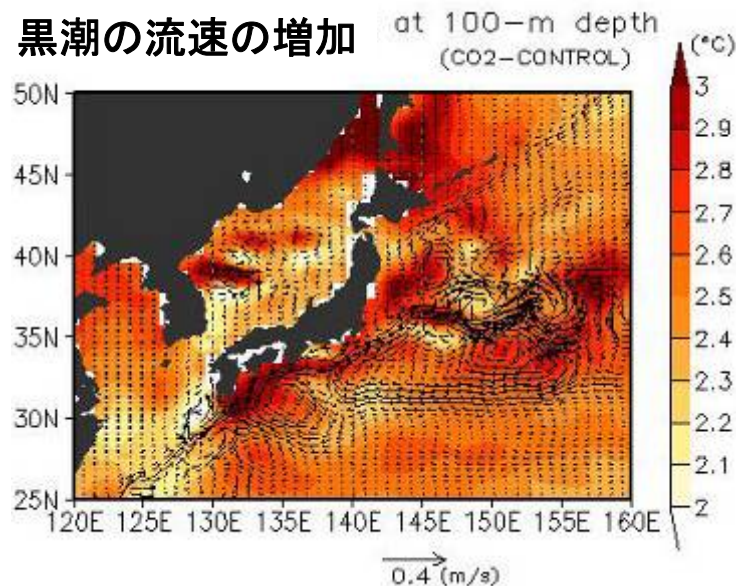


雨量は平均的に増加(青色の領域)



## 21世紀末での海面水位の変化

### 黒潮の流速の増加



# 革新プログラムにおけるモデル開発と予測実験の役割分担

| チーム | 略称   | 主目的                               | モデル種別                     | 解像度               |                   | 担当機関                               |
|-----|------|-----------------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|------------------------------------|
|     |      |                                   |                           | 大気                | 海洋                |                                    |
| 1   | 長期   | ポスト京都の安定化目標選定のためシナリオによる300～500年予測 | 地球システムモデル<br>(気候・炭素循環・化学) | 280 <sup>km</sup> | 100 <sup>km</sup> | 海洋機構・地球フロンティア<br>国立環境研<br>東大気候センター |
|     |      | 不確定性定量化: 簡略モデル多数実験から不確定幅推定        |                           |                   |                   |                                    |
| 2   | 近未来  | 2030年までの近未来(シナリオによる差なし)の詳しい予報     | 大気・海洋・陸面結合モデル<br>(気候モデル)  | 50 <sup>km</sup>  | 20 <sup>km</sup>  | 東大気候センター<br>国立環境研<br>海洋機構・地球フロンティア |
|     |      | 不確定性定量化: アンサンブルデータ同化による初期値設定      |                           |                   |                   |                                    |
| 3   | 極端現象 | 21世紀中葉と末期における極端な気象(台風など)の変化予測     | 大気・陸面モデル<br>(海面温度指定)      | 20 <sup>km</sup>  | -                 | 気象庁・気象研<br>地球科学技術推進機構              |
|     |      |                                   | 同上日本周辺                    | 5 <sup>km</sup>   |                   |                                    |
|     |      | 不確定性定量化: 複数高解像度モデルによる比較実験         |                           |                   |                   |                                    |

# 21世紀気候変動予測革新プログラム(2007(H19)~2011(H23))

(年度)

| 2007<br>H19 | 2008<br>H20 | 2009<br>H21 | 2010<br>H22 | 2011<br>H23 | 2012<br>H24 | 2013<br>H25 | 2014<br>H26 |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|

国際的温暖化対応政策

モデルの整備・改良(物理過程調整、高解像度化etc.)

予測実験(A, B)

準備・予備実験

IPCC向け本実験

影響評価用含む追加実験

データ解析・論文発表

IPCC WG1  
予測実験終了

情報の流れ

IPCC向け

政策向け

データの  
流れ

国外の研究者

国際分散ネットワーク(拡大PCMDI)

IPCC WG1 第5次報告

データサーバ

リンク

予備実験・手法確立

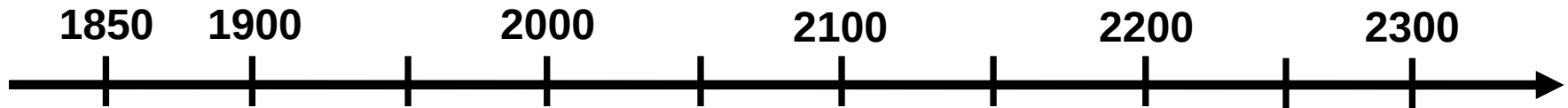
革新結果を用いた影響評価 ※

※ 影響評価研究: 環境省・総合推進費 S-4, S-5等

IPCC WG2, 3

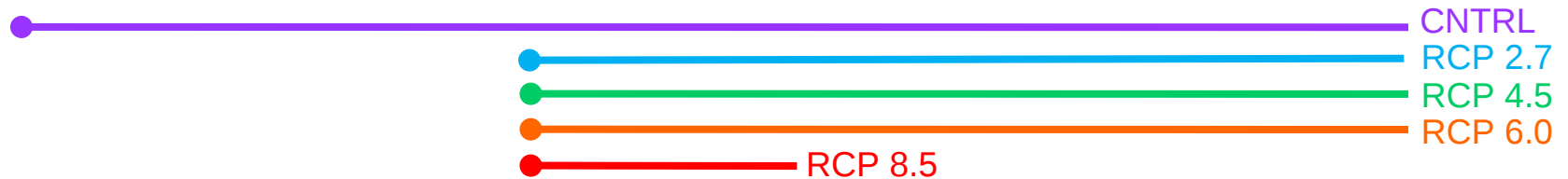
国内(+アジア)適応策立案

# 「長期」予測実験(予定)



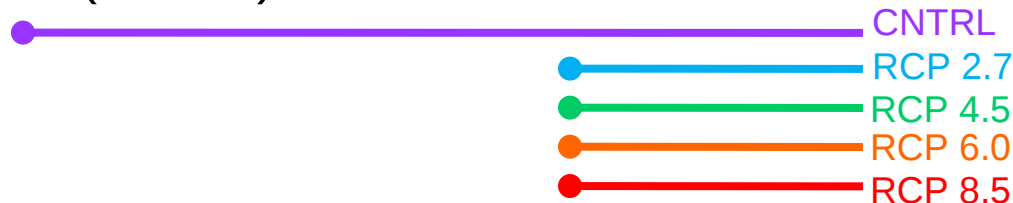
長期環境変化予測シナリオ実験(低解像度)

T42 (280km) 地球システムモデル 排出シナリオ(順算), 濃度シナリオ(排出逆算)

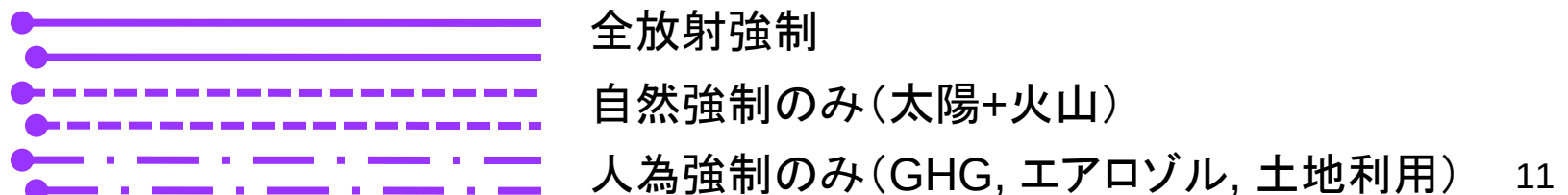


21世紀気候変化予測シナリオ実験(中解像度)

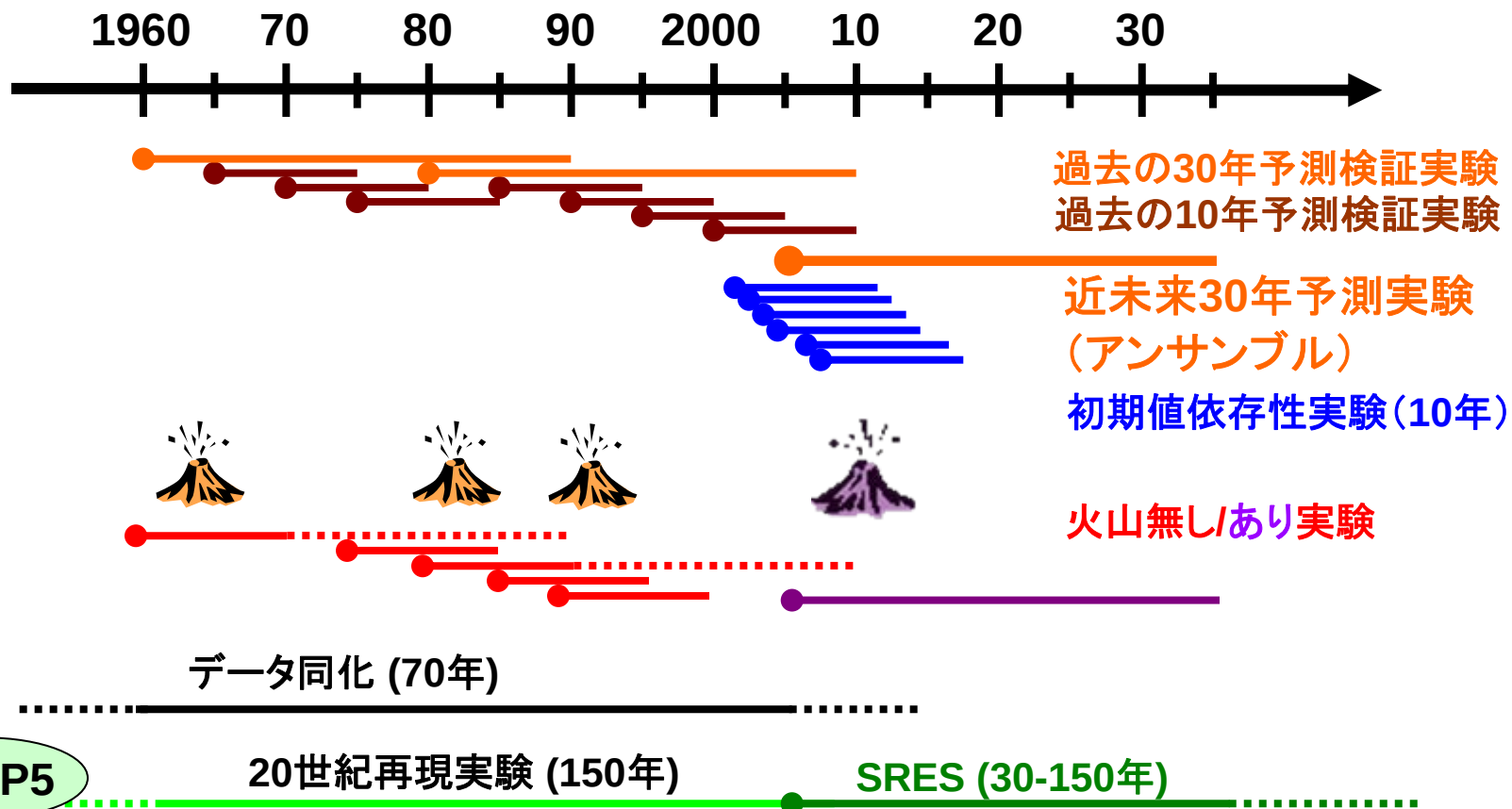
T85 (140km) 気候モデル 濃度シナリオ



20世紀気候変化再現実験



# 近未来予測実験デザイン

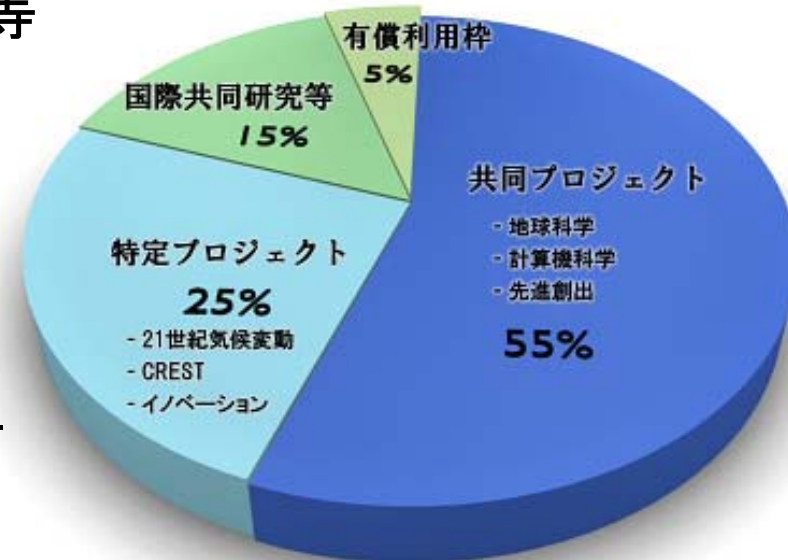


- 観測された放射強制による過去実験, RCP4.5 シナリオに基づく将来予測実験
- 年末～年始を初期時刻として 3～10例のアンサンブル実験.
- 100年のコントロール実験と70年の 1% CO<sub>2</sub> 漸増実験推奨.
- 各種オプション

# 大気・海洋分野における地球シミュレータの使用状況 (H19年度)

大気・海洋分野を含むプロジェクト等

- 特定プロジェクト  
革新プログラム  
受託研究(CREST)
- 共同プロジェクト(公募利用)
- 国際共同研究等



地球シミュレータの計算機資源

約5割弱を使用

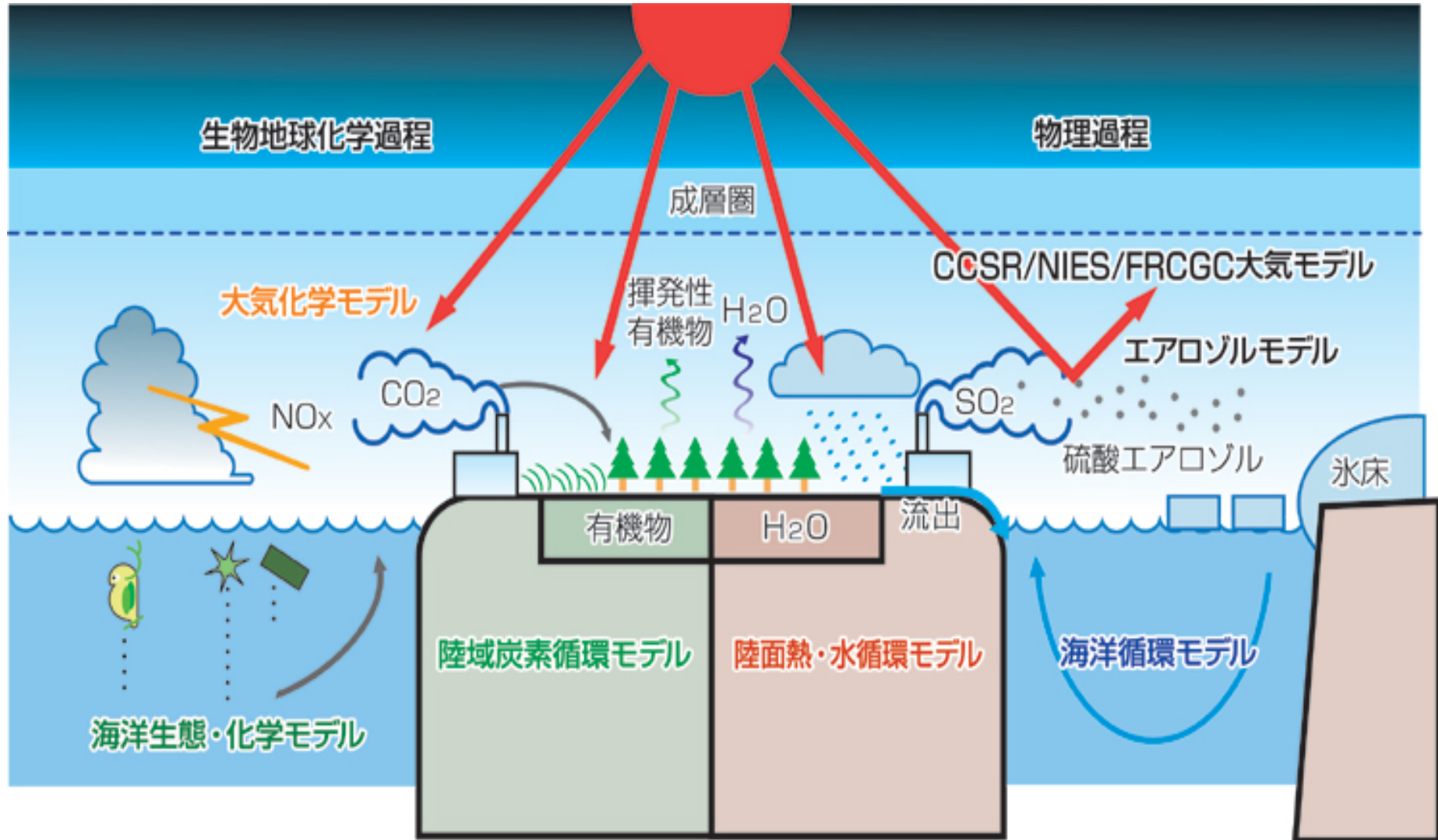
(それ以外は固体地球、計算機科学、先進創出、産業利用などで使用)

平成21年度には地球シミュレータの更新により、その実効性能は従来の約2となる予想である。

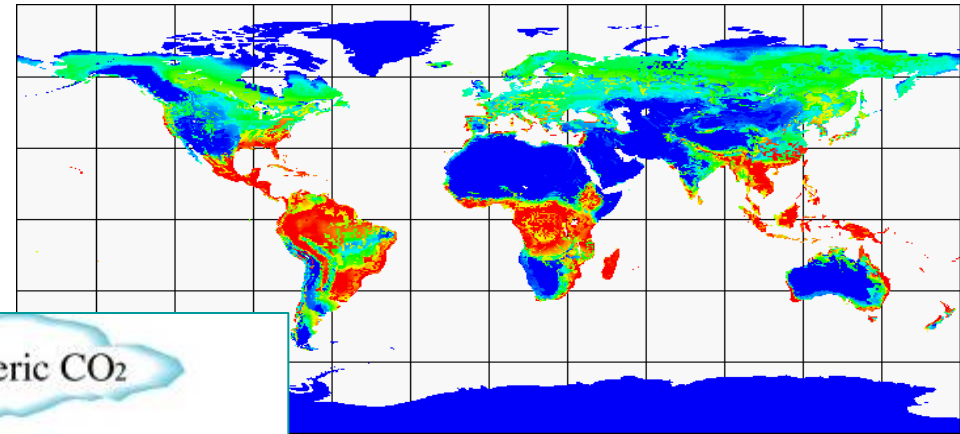
なお、革新プログラムは平成21,22年度に最大の計算機資源が必要になる。

# 地球システム統合モデル (ESM)

大気・海洋・陸面結合モデル+炭素循環モデル



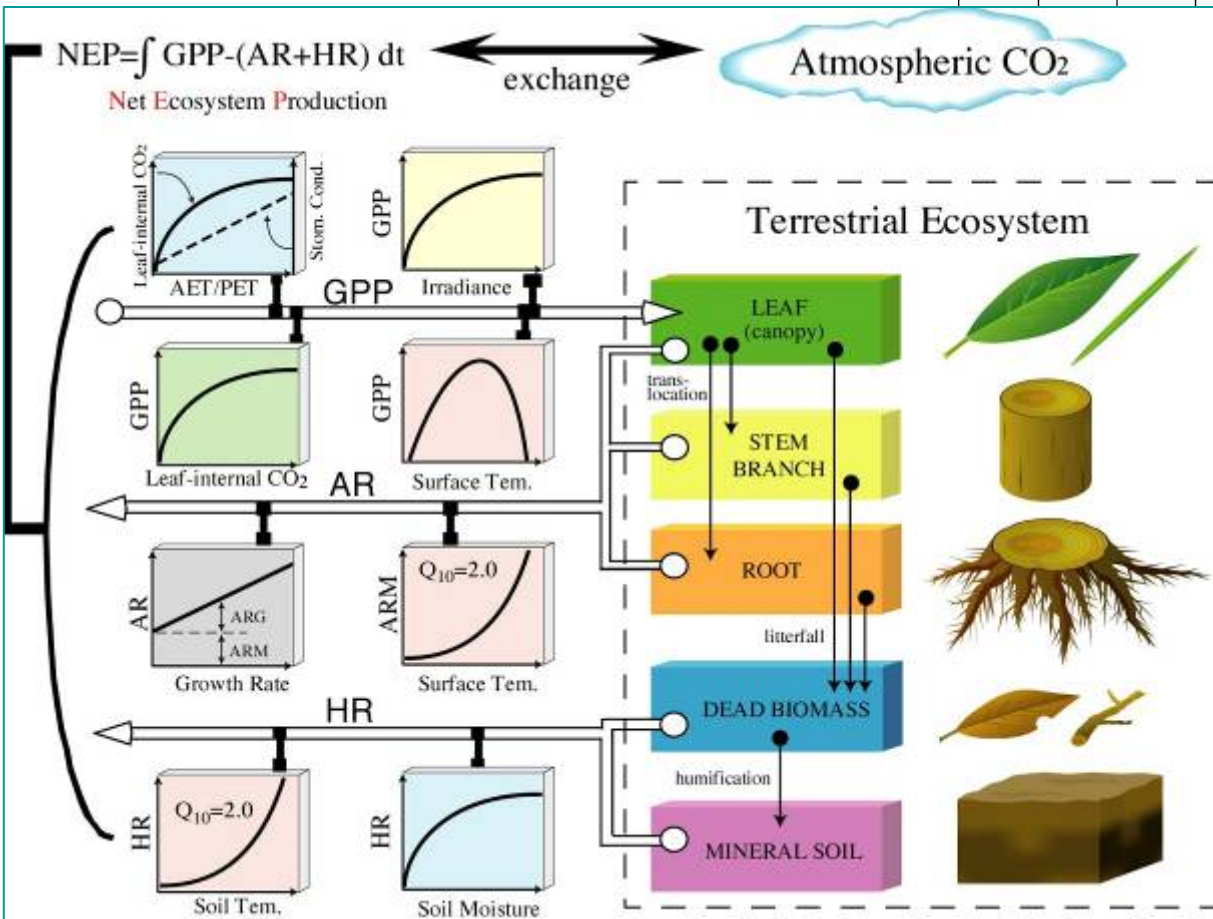
# 陸域炭素循環モデル (Sim-CYCLE)

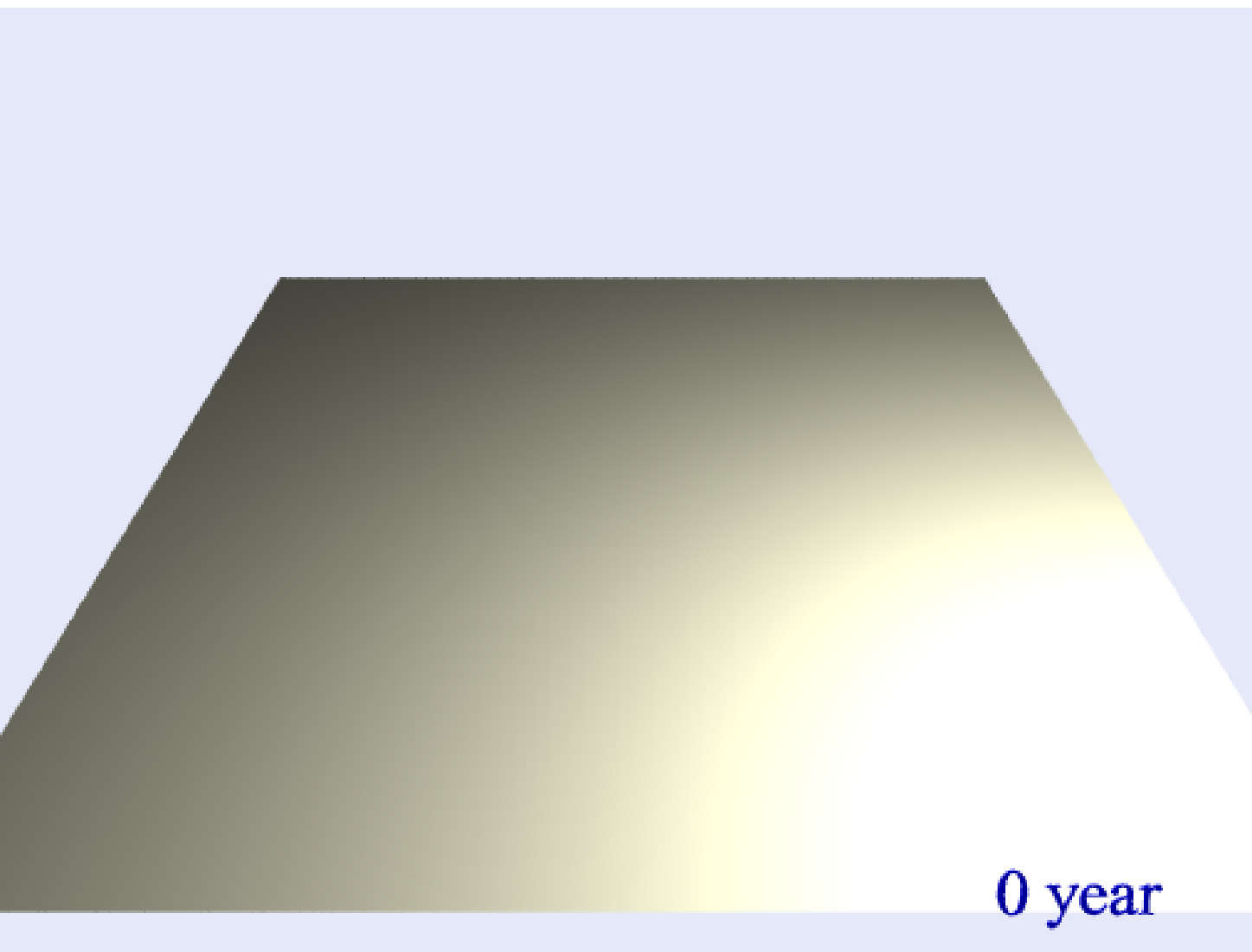


low

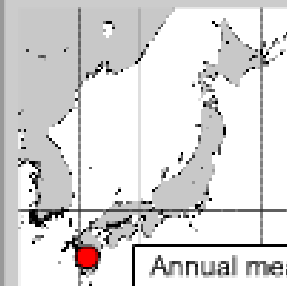
high

GOSATデータによる  
炭素循環モデルの  
検証と高度化





#### Simulation site



Annual mean temp.

**18.2 C**

Annual precipitation

**1197mm**



Temperate  
Broad-leaf  
Evergreen tree

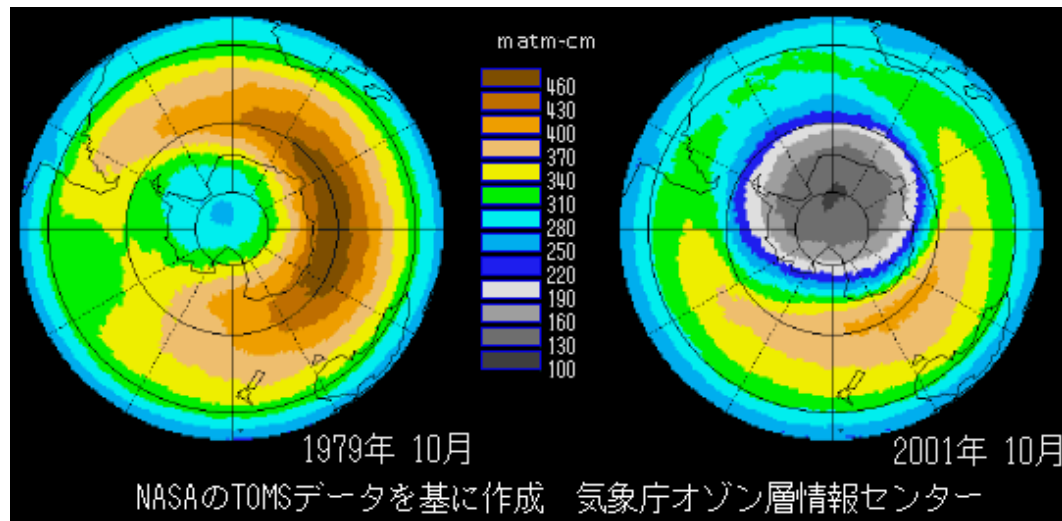


Temperate  
Needle-leaf  
Evergreen tree

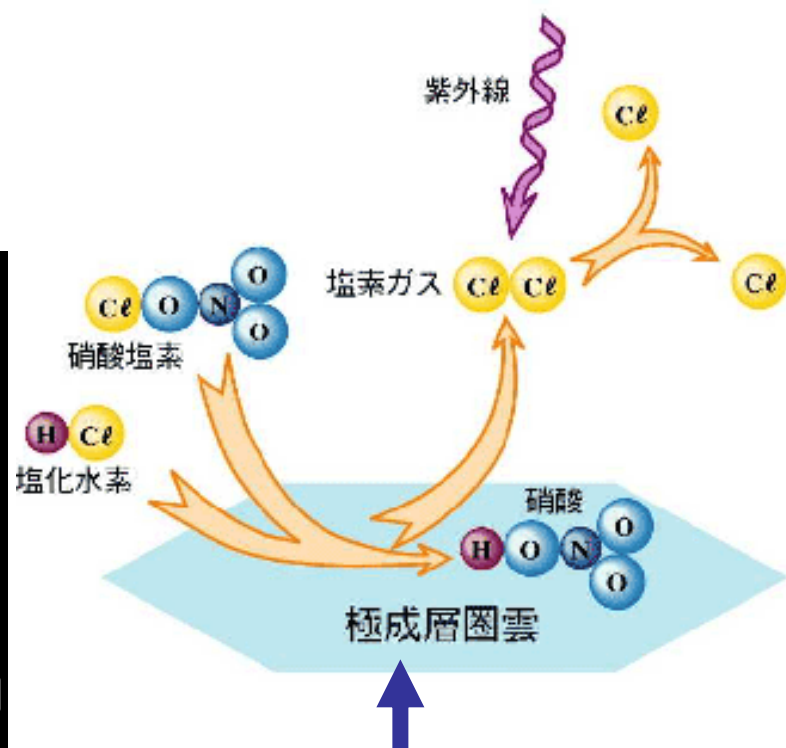


Temperate  
Broad-leaf  
Summer-green tree

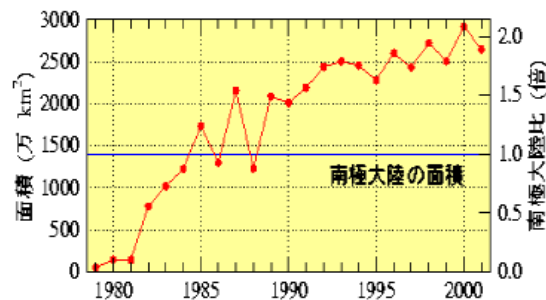
# 南極オゾンホール



(気象庁)



地球温暖化による成層圏の  
気温低下はオゾンホールの  
発生を助長する



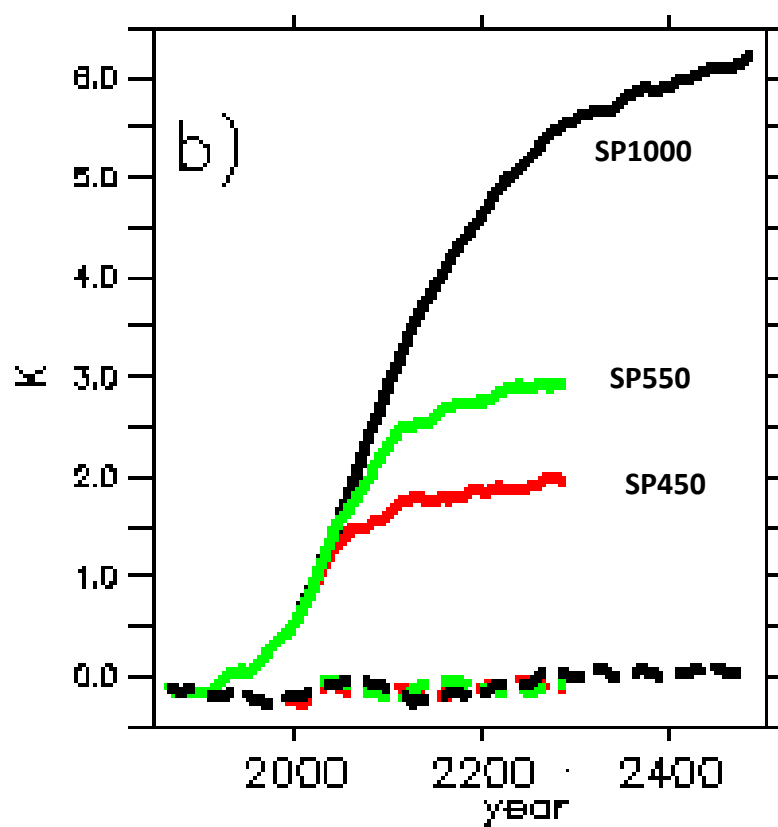
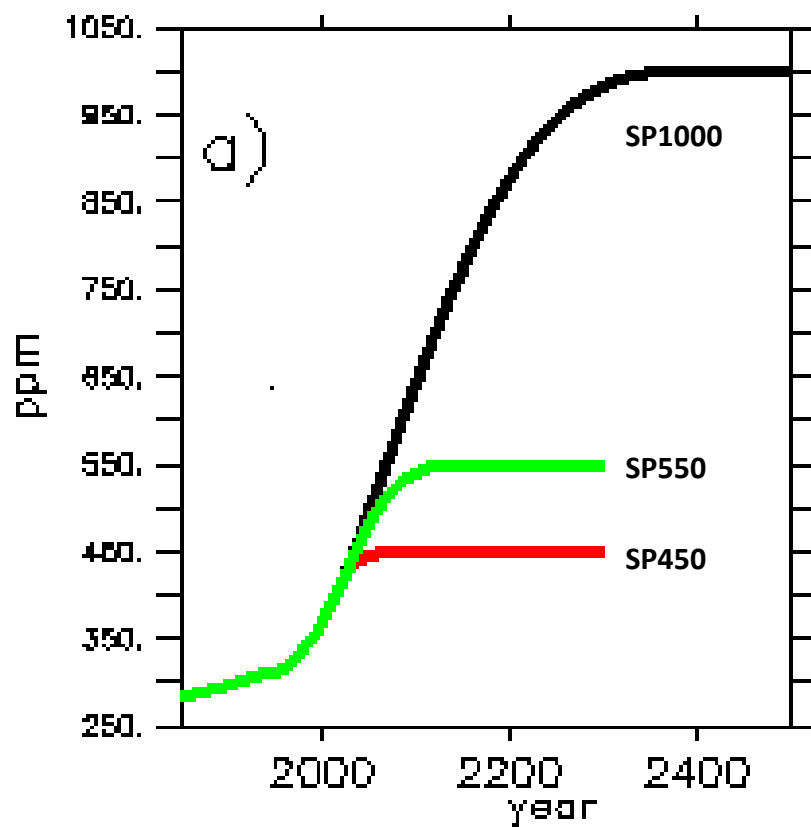
冬季極域下部成層圏で、極成層圏雲(PSC)表面で生ずる化学反応によってリザボアから塩素ガスが生成される。この塩素ガスが春になって太陽光を受けて解離し、オゾンを分解して塩素酸化物となり、オゾン消滅反応が進行する。

# CO<sub>2</sub>濃度安定化への排出量準逆計算(1)

- ESMを用い、気候と炭素循環のフィードバックを考慮したCO<sub>2</sub>濃度安定化への排出量準逆計算を試行(シナリオを3例に増やし、一シナリオについては2500年まで計算を延長)

二酸化炭素濃度(ppm)時系列。赤線:SP450。  
緑線:SP550。黒線:SP1000

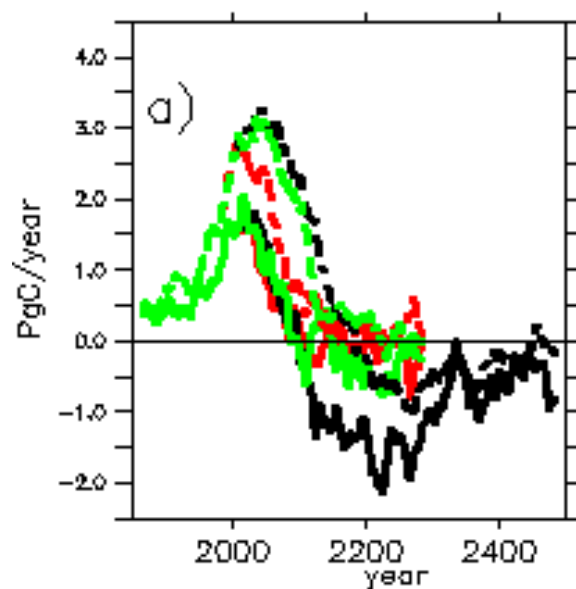
全球平均地上気温時系列。



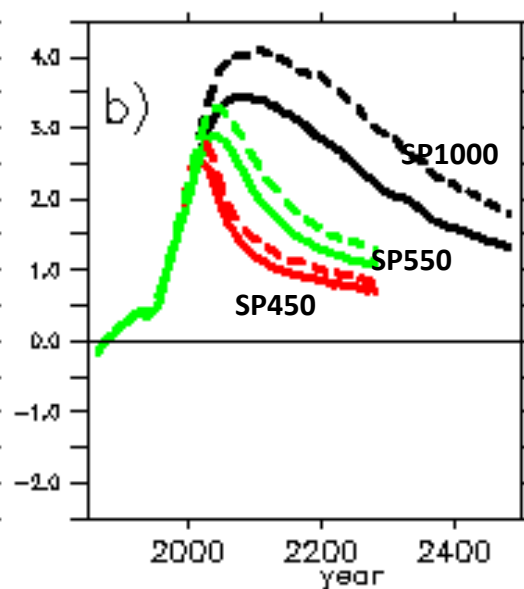
# CO<sub>2</sub>濃度安定化への排出量準逆計算(2)

- 3シナリオについての結果(本計算ではエアロゾルの変化を考慮していない)

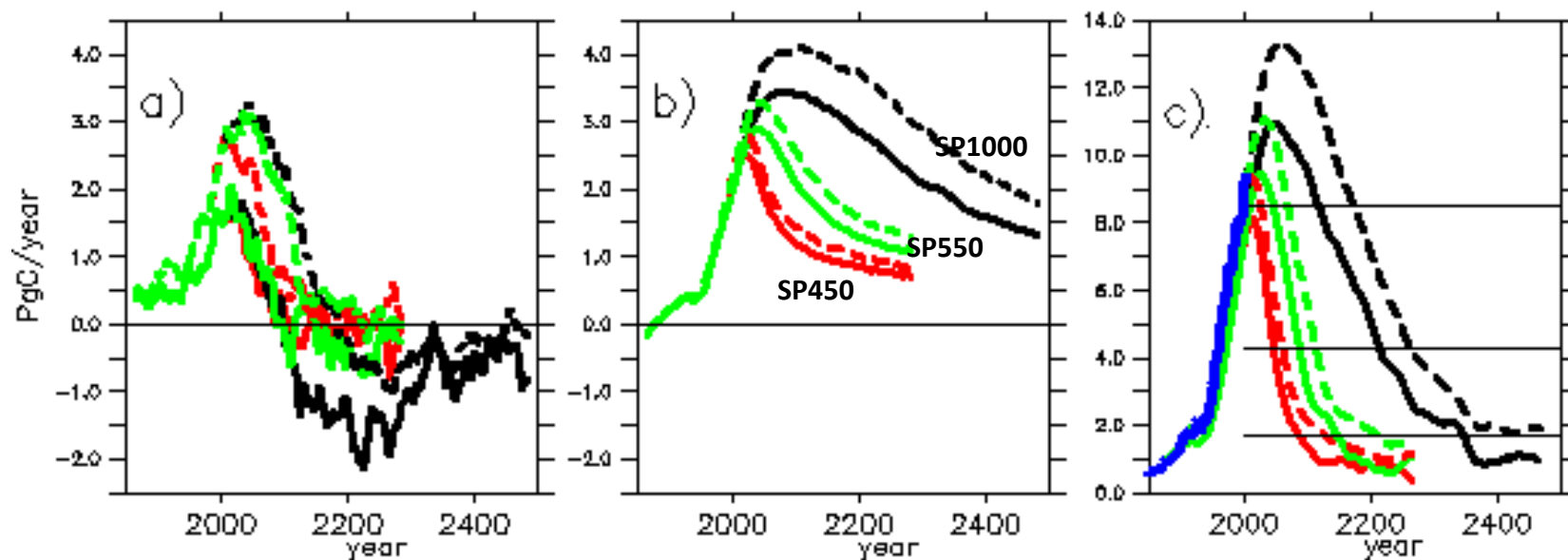
陸面での二酸化炭素吸収量



海面での吸収量

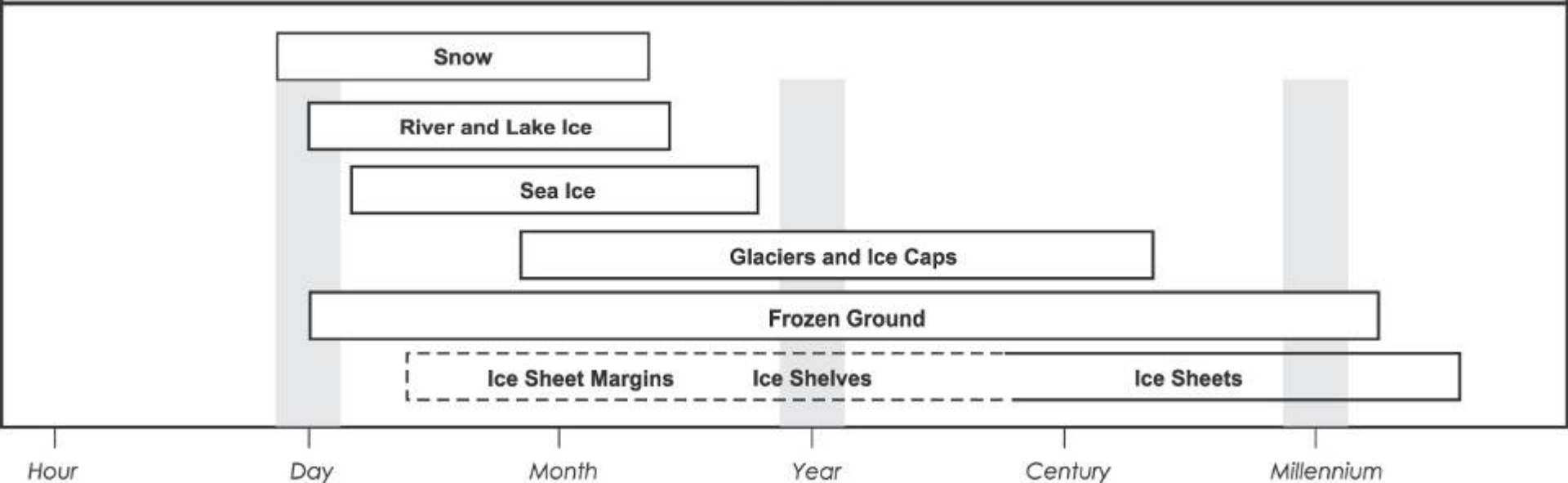
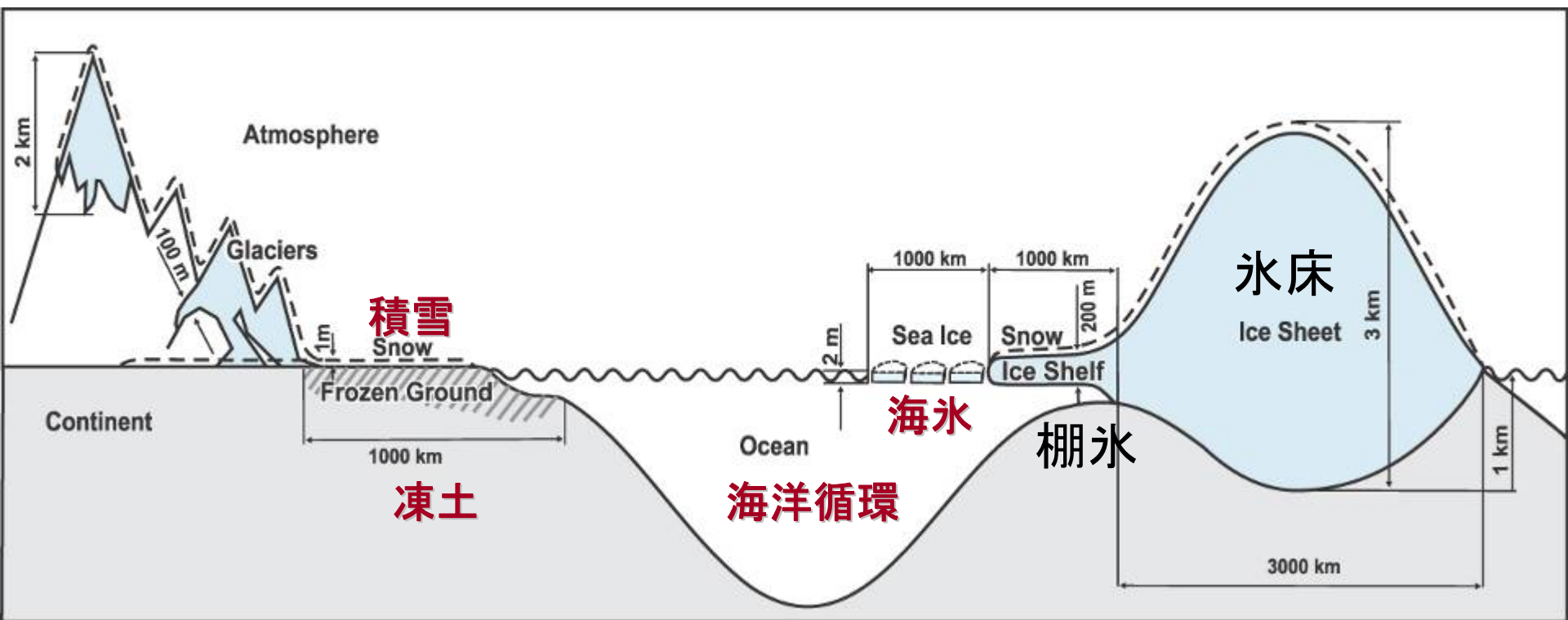


逆算した許容排出量



モデルで計算された陸面での二酸化炭素吸収量(a)、海面での吸収量(b)、および逆算した許容排出量の時系列(c)。単位はいずれもPgC/year。色、実線・破線は図1と同じ。(c)の青線は観測されている排出量。図(c)での横線は2000-2005年の排出量を基準として上から100%、50%、20%に相当する。

(美山・河宮、2008)



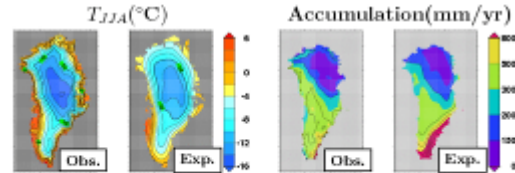
# 氷床ダイナミックスのモデル(ICIES)

## Ice Sheet Model for Integrated Earth System Studies

CCSR/NIES/FRCGC  
AGCM

月平均  
気温と降水量

→ T106 AGCM time slice experiments  
Global mean +1.75K; Greenland +2.2K



氷床厚さ,  
地殻沈み込み  
氷の温度と流動

3次元氷床力学モデル **ICIES**  
(Saito and Abe-Ouchi, 2003) **NEW**

Shallow ice approximation

Thermodynamics-dynamics coupling

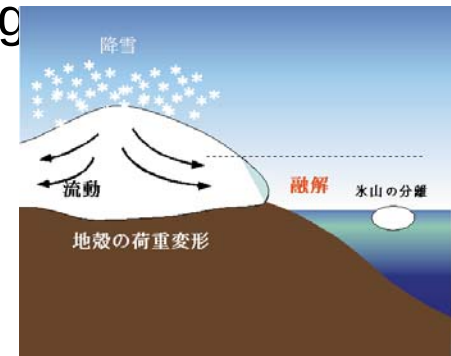
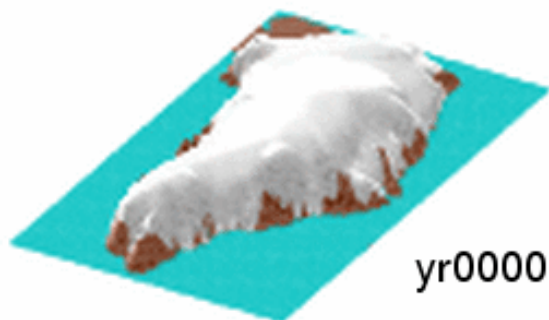
Simple sliding applied

Horizontal resolution 1 deg lon./lat.

Vertical 20 layers

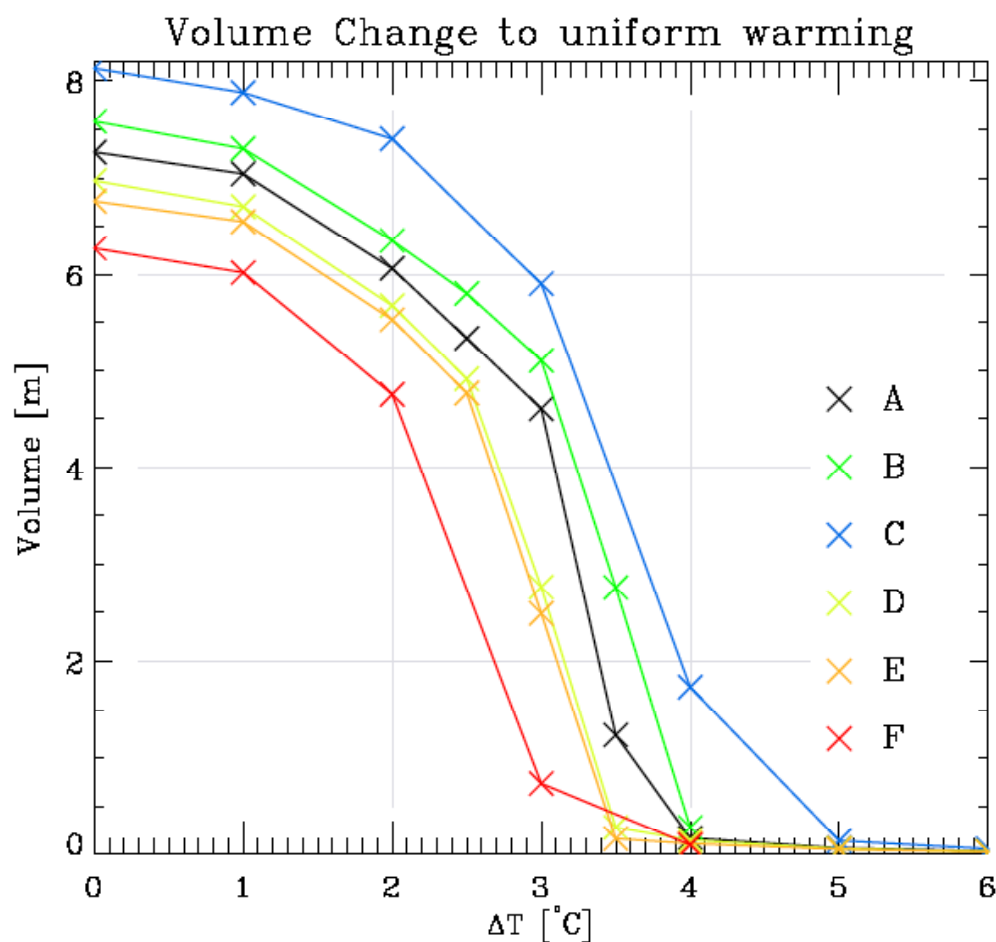
Degree Day mass balance model

*Bedrock isostasy included*



# 氷床モデル開発・高度化と千年スケールでの水位変動予測

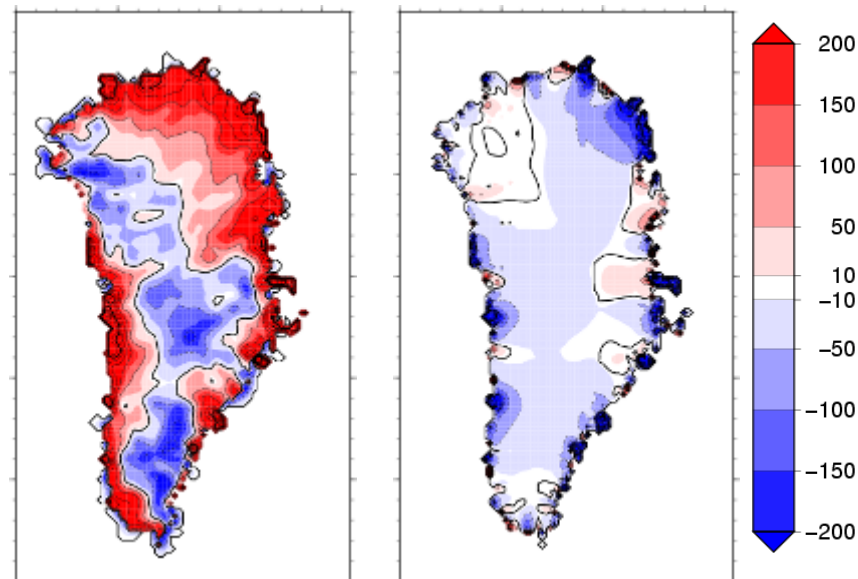
## グリーンランド氷床の 温暖化に対する応答



## Altitude of ice sheet

Old-Obs.

New-old

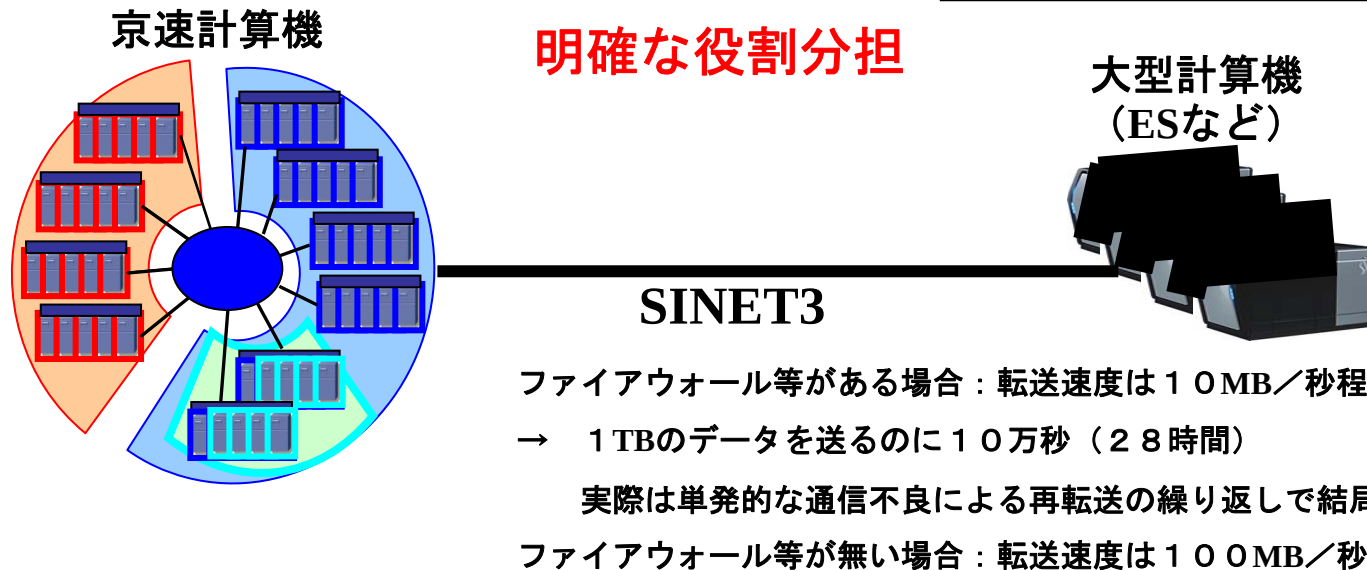


(Saito et al, 2007)

# 京速計算機と他の大型計算機との役割分担

超大規模シミュレーション

- ・ 大規模シミュレーション
- ・ モデル開発
- ・ シミュレーション結果の解析



京速計算機と大型計算機との密結合が必要

# 地球環境(地球変動)分野

戦略分野となって京速計算機による研究を行う場合

- ・大気、海洋、地球環境モデル性能、データ同化技術の向上
- ・気象・海洋防災情報の飛躍的な向上への貢献
- ・地球温暖化問題の解決に大きな科学的貢献  
(IPCC・AR6、2019年頃)
- ・雲解像大気大循環モデル他やその出力研究における  
国際連携
- ・オールジャパン体制
- ・京速計算機と他機(ESなど)とを有効に使いわけ