

# 気候気象分野の紹介

理化学研究所 計算科学研究センター  
複合系気候科学研究チーム

足立幸穂

# 発表の流れ

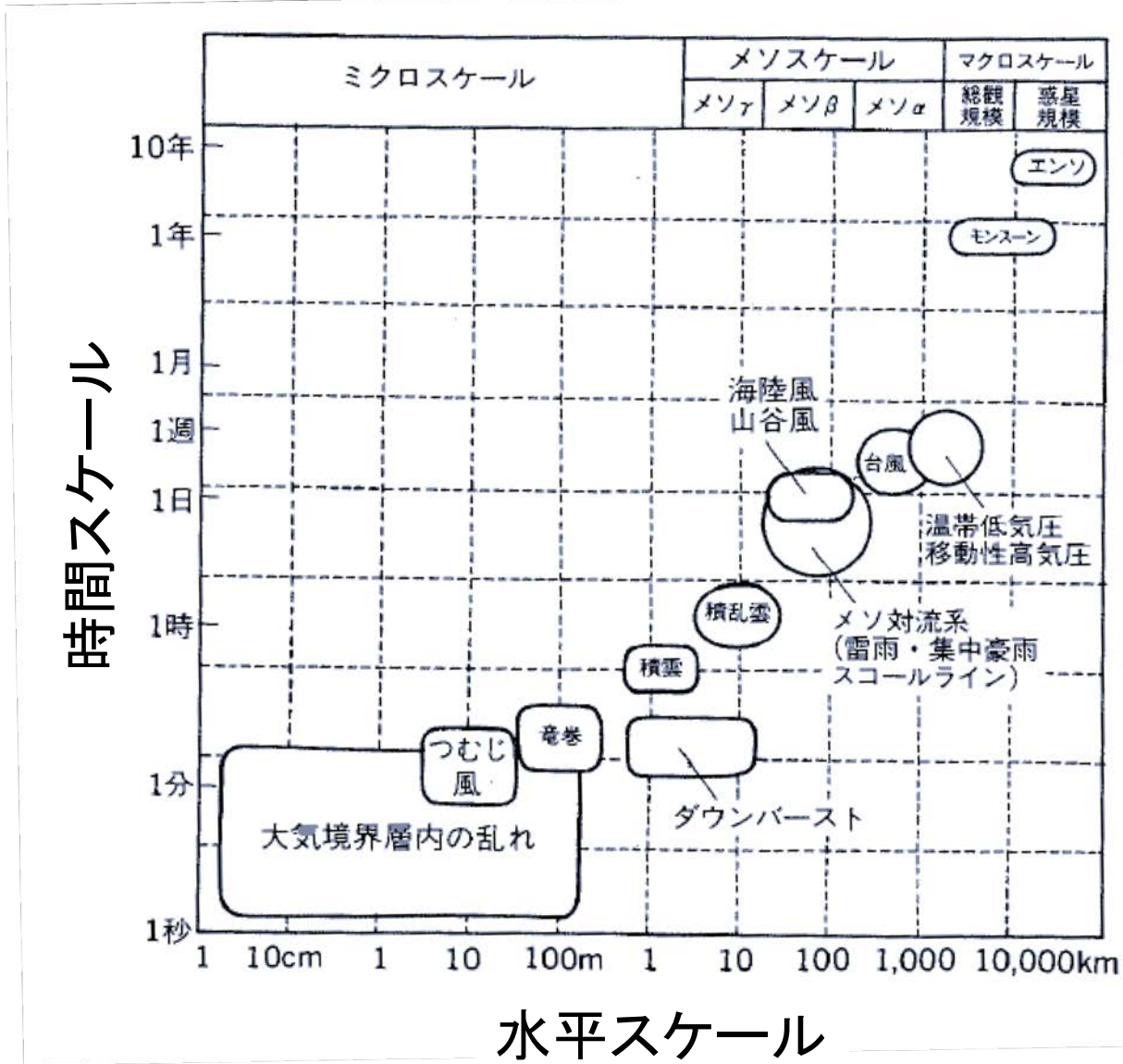
- 1) これまで・現在の気候・気象分野での取り組み
  - どういったサイエンスピックがあるのか、方向性(10分)
  - 京等を使った研究成果の紹介(10分)
    - Capability computing
    - Capacity computing
- 2) 私自身の研究紹介(領域気候予測の検証)(10分)
  - Capacity computingの一つ
- 3) 将来的なテーマ(数分)

# 気候・気象分野のオーバービュー

- 観測研究
- 理論研究(理想実験)
- 応用研究(現実実験)
  - 気象(短時間の現象がターゲット)
    - 天気予報
    - 現象解析 etc..
  - 気候(長期間の気候状態がターゲット)
    - 将来気候予測
    - (準)平衡状態の大気状態 etc..

様々な時間スケール・空間スケールの大気現象を扱う

# 様々な大気現象の時間スケールと空間スケールの関係



地球の表面積  $5 \times 10^8 \text{ km}^2$  (5億  $\text{km}^2$ ) を  $1 \text{ cm}^2$  の格子で分割すると、

水平格子数  $5 \times 10^{18}$  個

鉛直  $2 \times 10^6$  層

→ 総格子数  $10^{25}$  個

格子数: 現在(1km)の  $10^{15}$  倍

$\Delta t$  は、 $3 \times 10^{-5}$  秒

ステップ数: 現在(1km)の  $10^5$  倍

計算量としては 現在の  $10^{20}$  倍

Based on  
Orlanski (1975)

図は小倉(2000)  
「一般気象学」p.159より引用

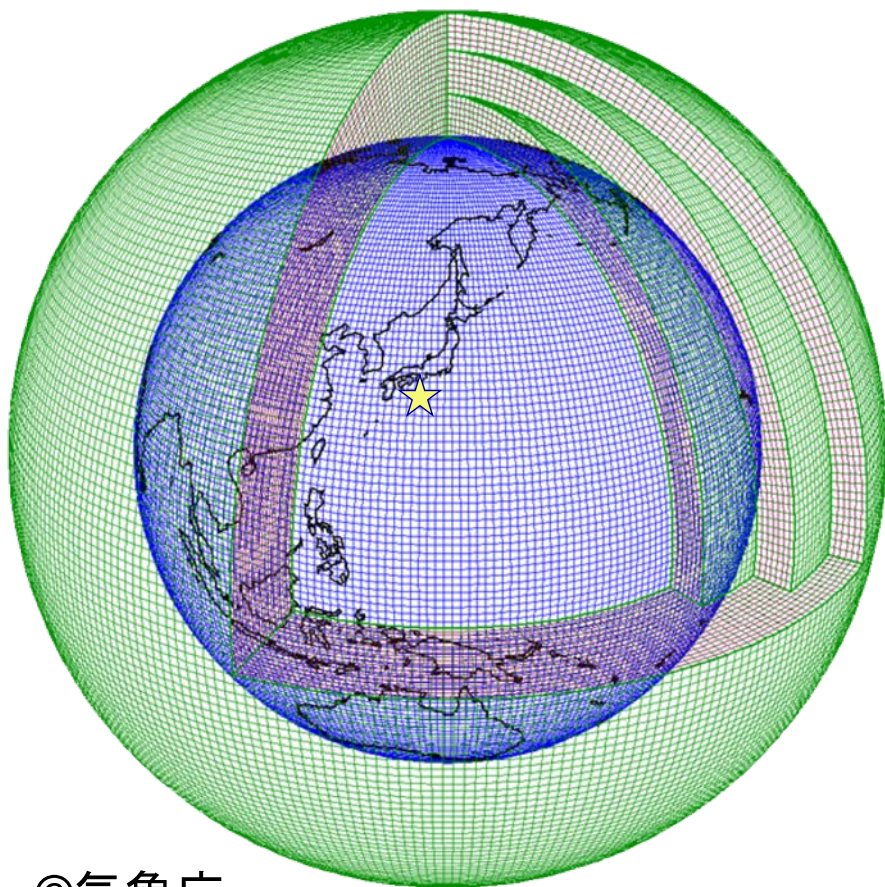
1 cmの解像度で全球大気を解像できれば、様々なスケールの大気現象をほぼモデルで扱うことができる。

→ **実際には当分無理**

# モデルの種類

空間スケールの小さな現象、空間詳細なデータが必要な時は、領域モデルを使う。

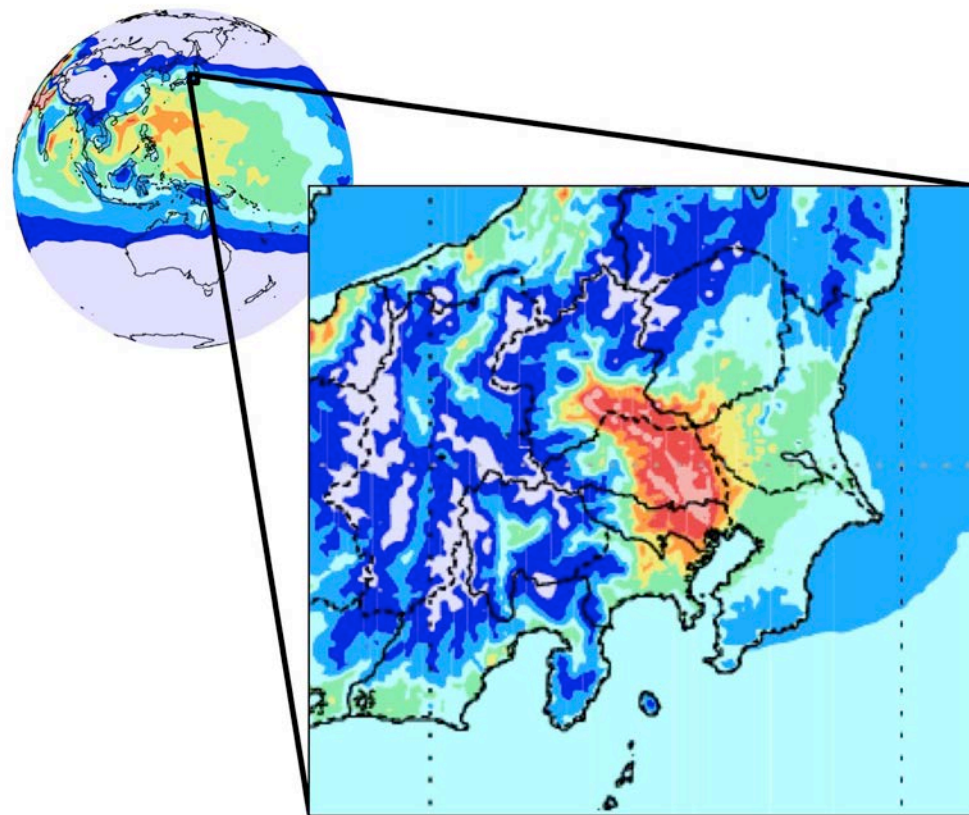
## 全球モデル(GCM)



©気象庁

MRI-AGCM  
NICAM  
MIROC

## 領域モデル(RCM)



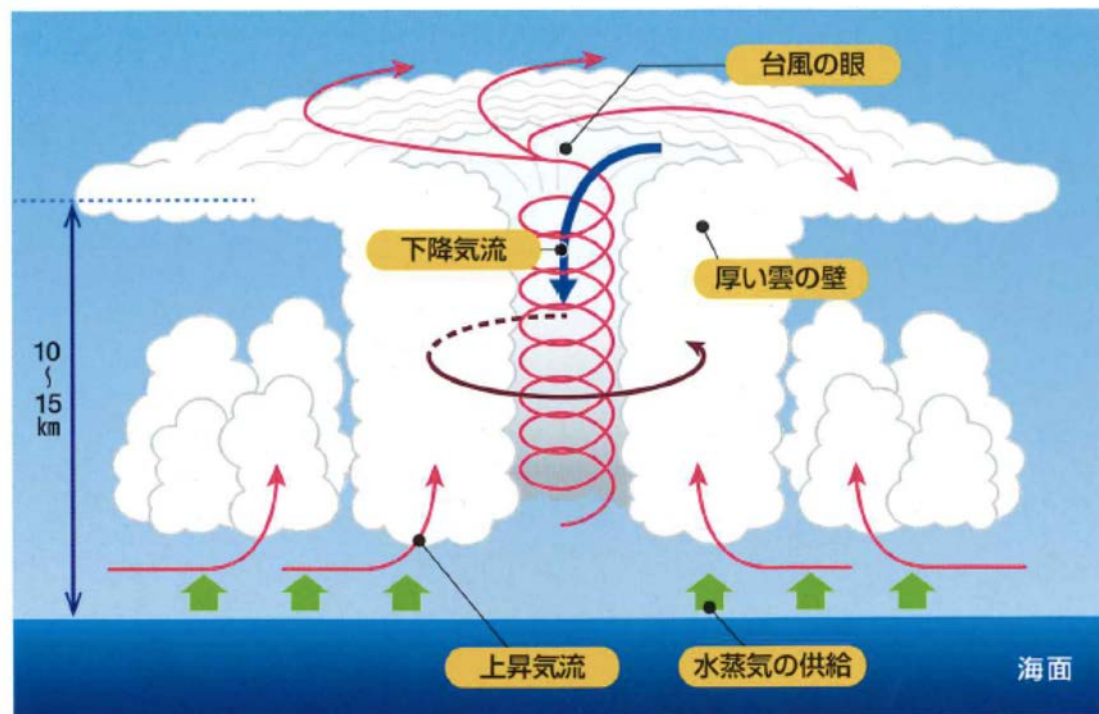
NHM  
SCALE  
CReSS  
WRF

# 台風 模式図

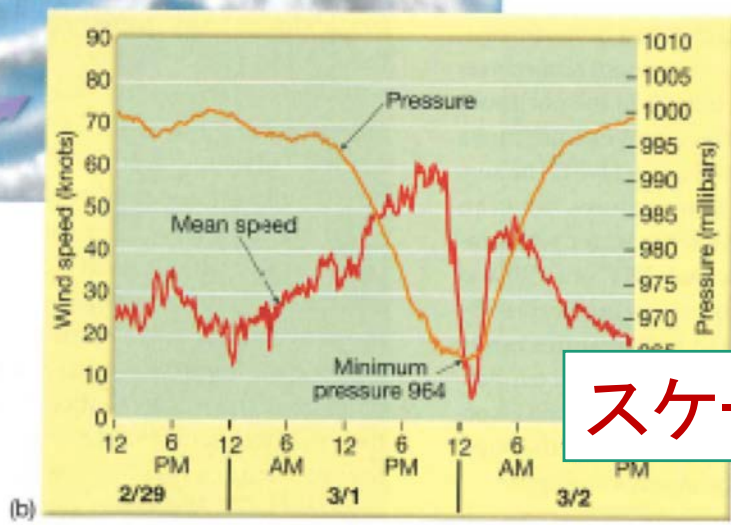
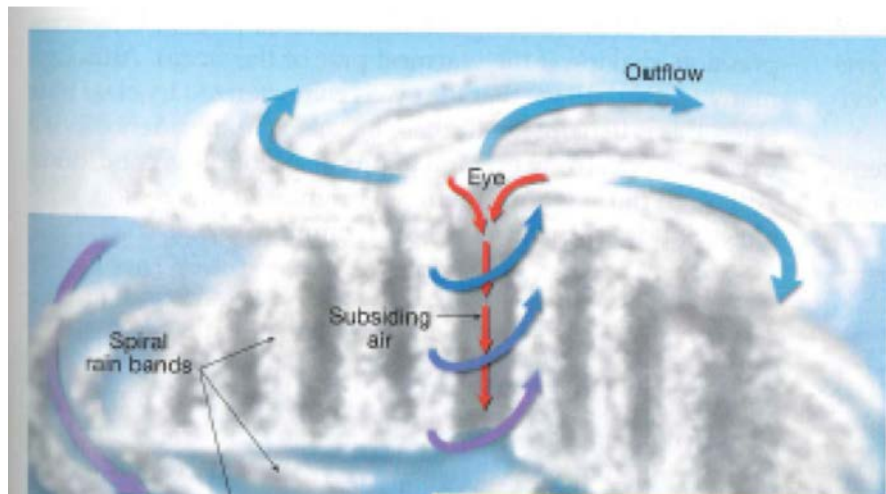
「計算科学の世界」No.10

[http://www.tenki.jp/docs/note/typhoon/page\\_2](http://www.tenki.jp/docs/note/typhoon/page_2)を参考に作成

「The Atmosphere」p.313



← 約1000km →

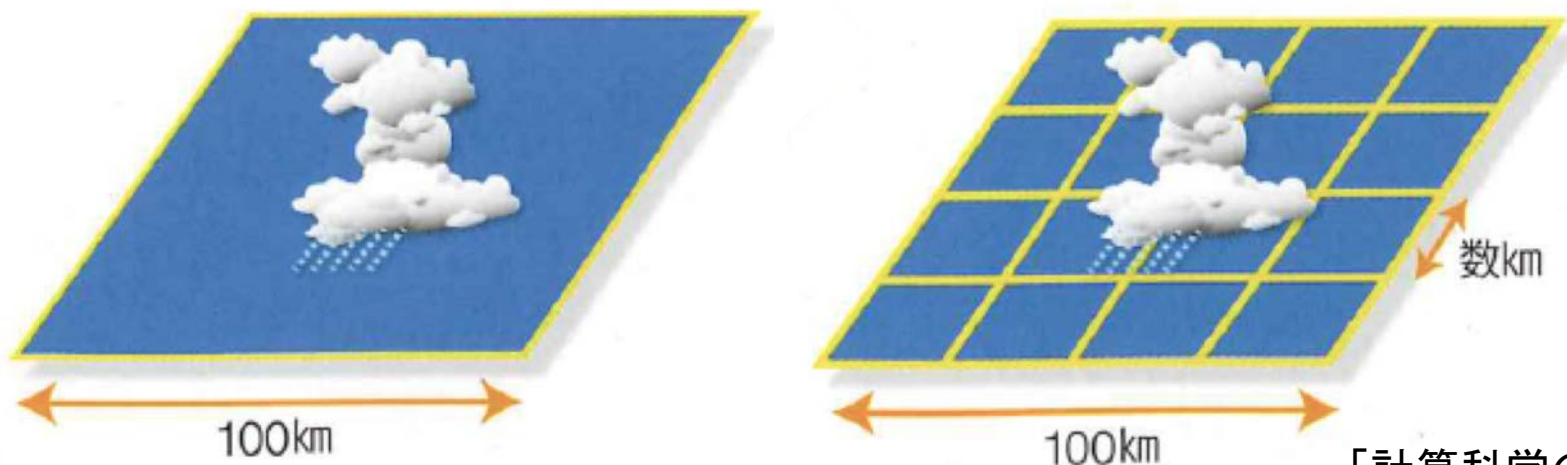


台風のスケールは1000kmだが  
エネルギー源は対流  
積乱雲のスケールは数km~10km

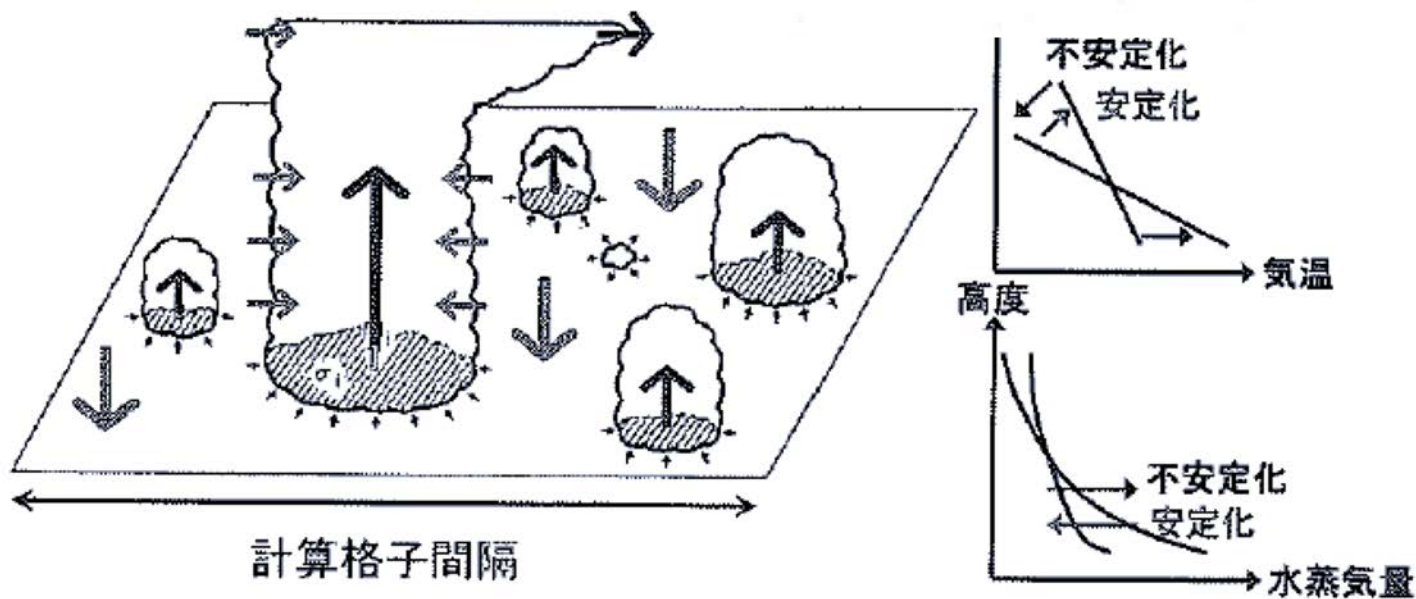
**スケール間相互作用が存在する**

# 積雲対流パラメタリゼーション

パラメタリゼーションは、サブグリットスケールの影響をグリットで表現できる物理量で評価すること。



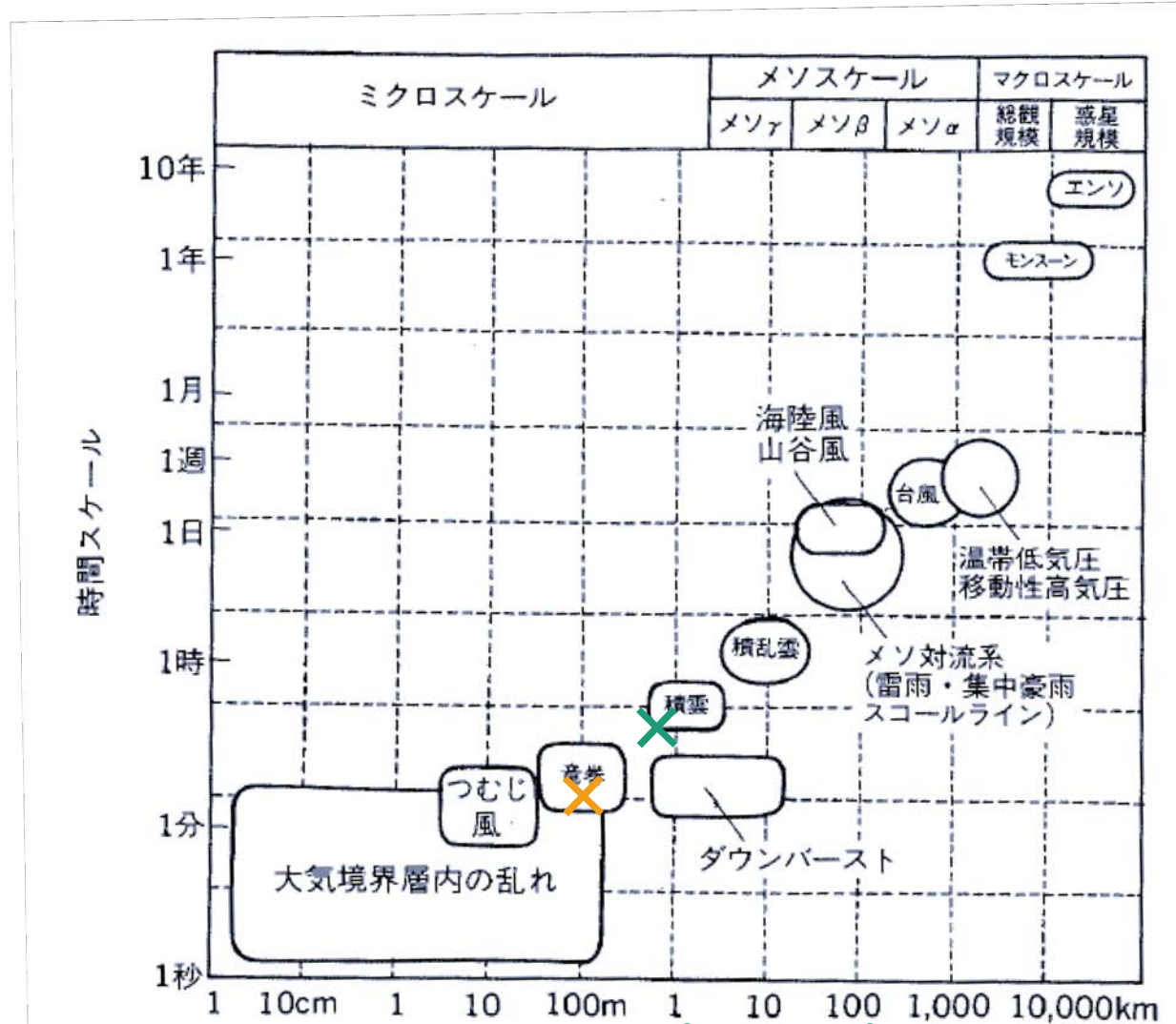
「計算科学の世界」No.10



積雲パラメタリゼーションの模式図 (Arakawa and Schubert, 1974加筆)

木本 (2017), p185  
「異常気象」の考え方

# 最近のモデルの空間スケール



Based on  
Orlanski (1975)

小倉(2000)  
「一般気象学」p.159より引用

最低でも現象の水平スケールの  
1/5程度の解像度が必要

水平スケール  
GCM(全球モデル)  
RCM(領域モデル)

モデルの格子サイズ



# 計算機リソースがあれば...

## 1. モデルの高解像度化 → **Capability Computer**

- パラメタリゼーションの排除

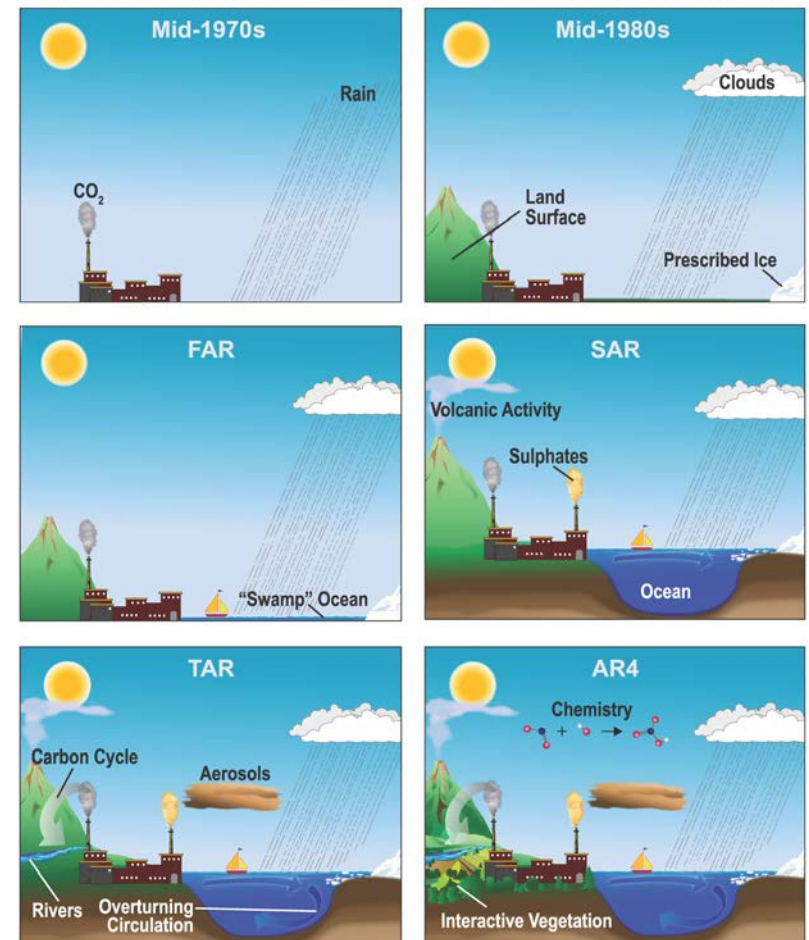
## 2. アンサンブル数を増やす → **Capacity**

- 天気予報
- 気候シミュレーション(長時間積分)
  - 十分なサンプル数が取れるだけの期間

## 3. モデルコンポーネントの多様化・複雑化

- 地球システムモデル
- 雲微物理モデル(ビン法)

The World in Global Climate Models



## 具体的には... 京等を使った研究成果の紹介

### **Capability Computing** (戦略3): とにかく高解像度!

- (全球モデル) NICAM 870m実験、他
- (領域モデル) 広島豪雨 250m計算、竜巻・台風 100m計算

### Capacity Computing: アンサンブル数をかせぐ!

- データ同化
- (全球モデル) 将来気候予測(地球温暖化)
- (領域モデル) 領域気候ダウンスケーリング ← 私の専門

# 870m解像度 全球シミュレーション

NICAM 870 m - 96 levels  
Real Case Simulation: 25 - 26, Aug., 2012

SPIRE field-3: Study of extended-range predictability using GCSRAM  
RIKEN / AICS: Computational Climate Science Research Team

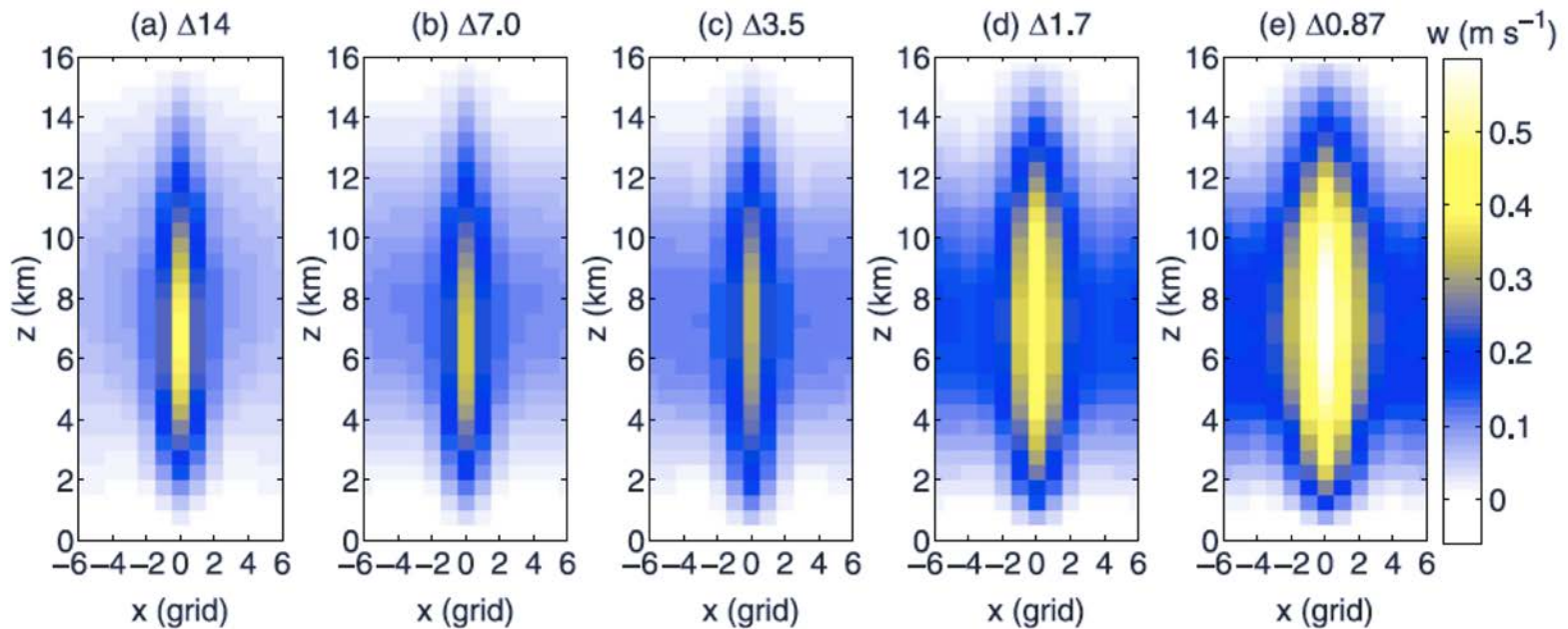


数kmオーダーの積雲を直接解像する！

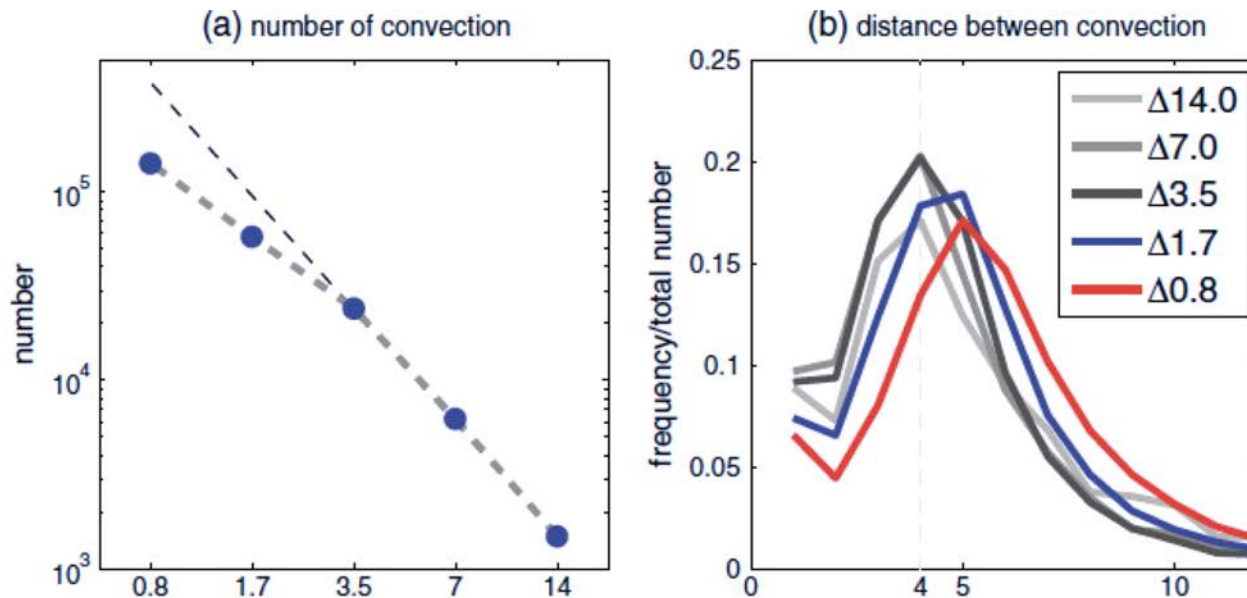
©JAMSTEC, AORI, RIKEN/AICS

# モデルで再現される対流と解像度の違い

積雲パラメタリ  
ゼーションなし



**Figure 3.** Radius-height cross sections for composites of vertical velocity  $w$  for all detected convections in each simulation. The horizontal axis is the number of horizontal grids.

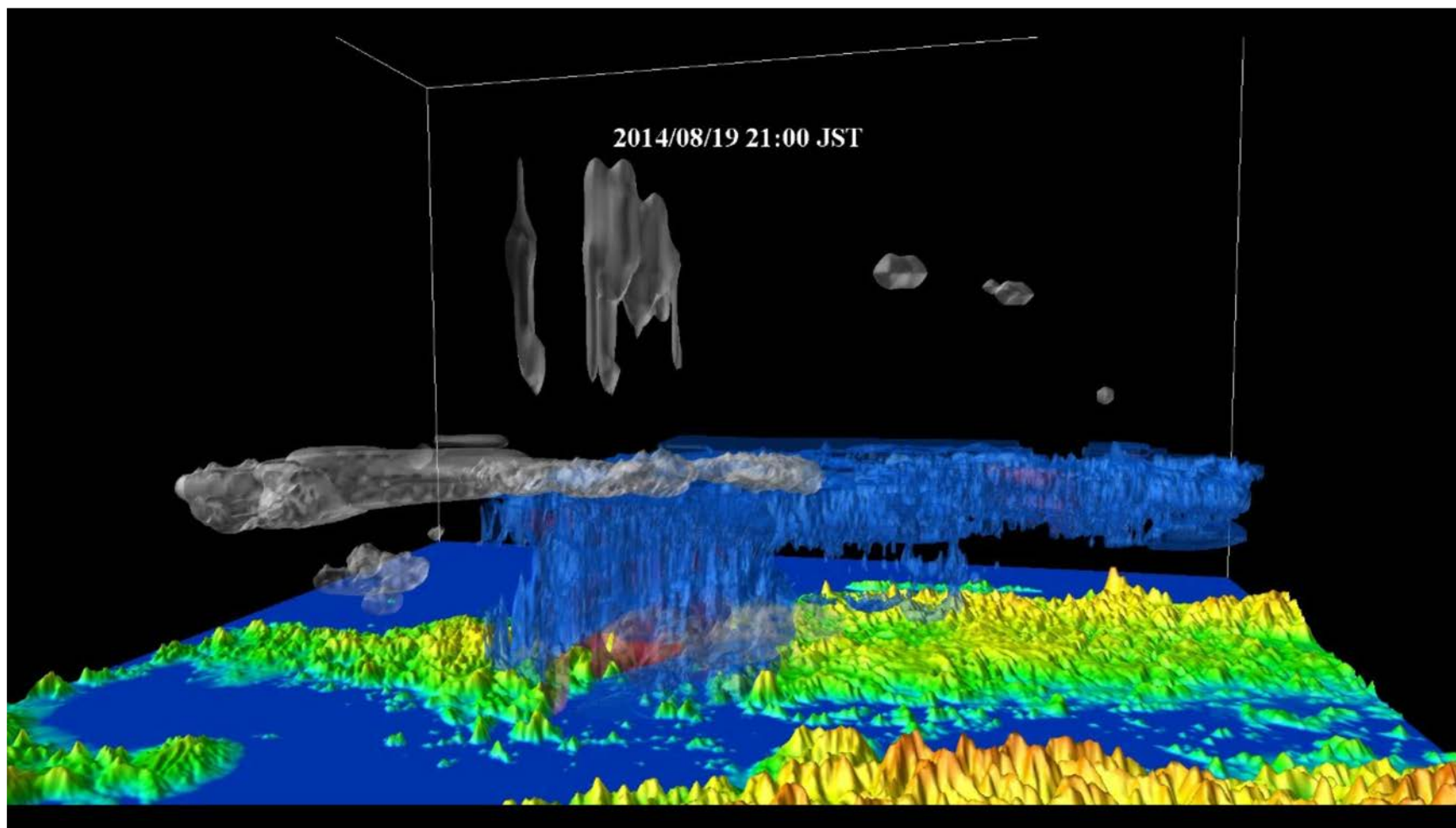


1.7km以下の解像度では  
対流を解像できるようになる。

0.87mでもまだ対流の個数は  
収束には至らない。

Miyamoto et al. (GRL, 2013)  
© AGU

# 解像度500mの実験 広島事例



## 具体的には... 京等を使った研究成果の紹介

### Capability Computing (戦略3): とにかく高解像度!

- (全球モデル) NICAM 870m実験
- (領域モデル) 広島豪雨 250m計算

### Capacity Computing: アンサンブル数をかせぐ!

- データ同化
- (全球モデル) 将来気候予測(地球温暖化)
- (領域モデル) 領域気候ダウンスケーリング ← 私の専門

# 気候シミュレーション(将来の気候予測)

条件が変わった時に、大気はどういった平衡状態になるか。



全球気候モデル

現在気候

地形  
土地利用  
大気中のガス濃度  
( $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_3$ 、、)

将来気候

地形  
土地利用  
大気中のガス濃度  
( $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_3$ 、、)

「温室効果」が温室効果ガスの増加により強まる。

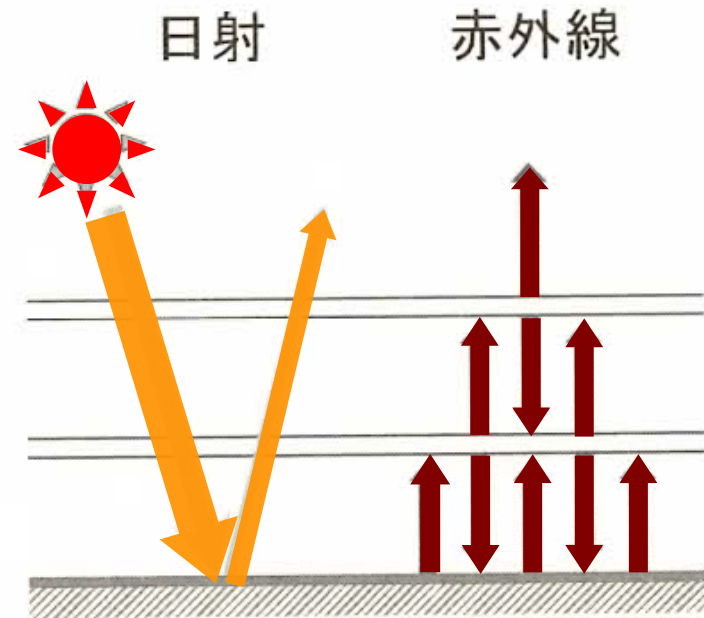
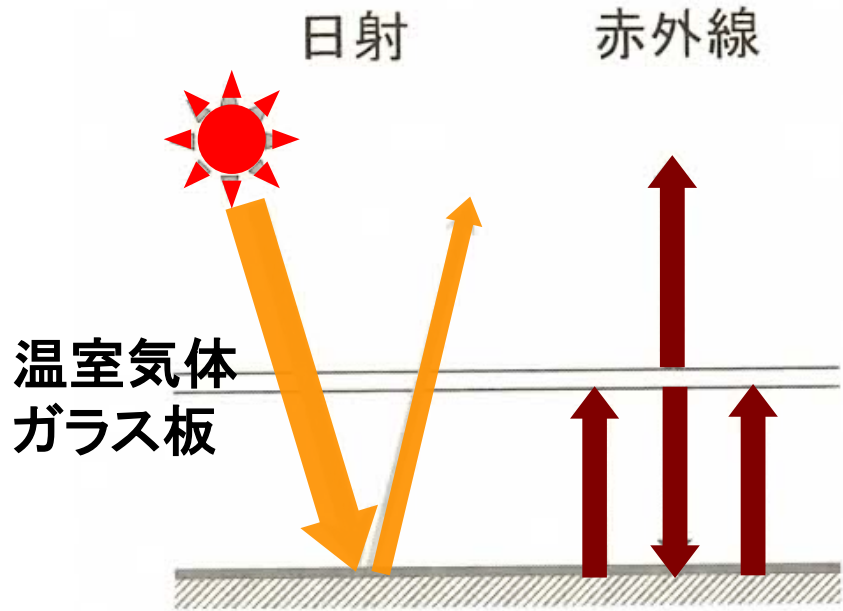
# 温室効果と地球温暖化



気象庁HPより

地球放射(赤外線)を吸収・放出。

現在の温室効果ガス濃度(ガラス1枚)の時より高い温度でバランス。

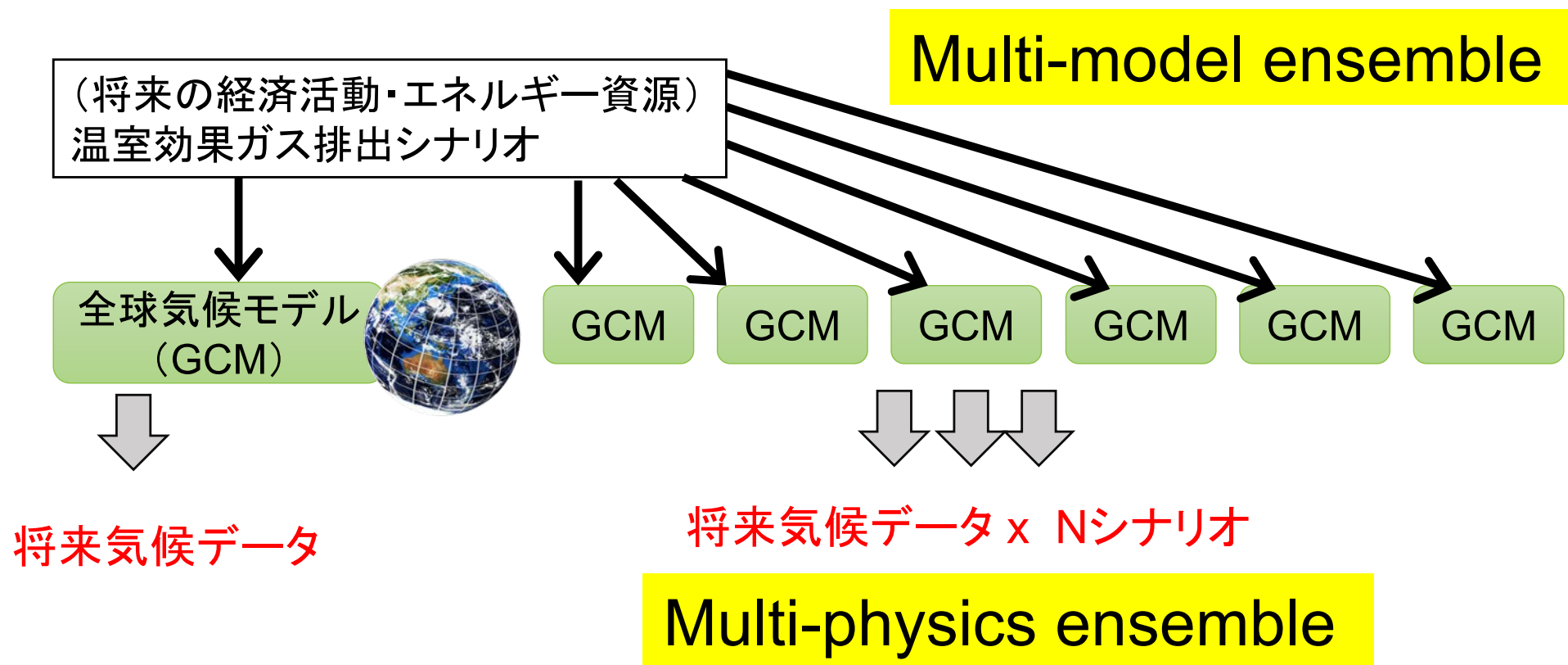


藤部(2012), p.19図の一部引用・カラー表示  
「都市の気候変動と異常気象」



# 気候シミュレーション(将来の気候予測)

条件(温室効果ガス濃度)が変わった時、大気はどういった(準)平衡状態になるか。



予測結果には不確実性が含まれる

→ アンサンブル予測を行うことで 予測の幅を見積もる

# 気候シミュレーション(将来の気候予測)

## アンサンブル予測を行うメリット

→ 不確定性の大きさを知ることができる



Sato et al. (2018, NComm)  
この問題に切り込んだ!

IPCC AR5 WGI SPM p.12  
(環境省資料より引用)

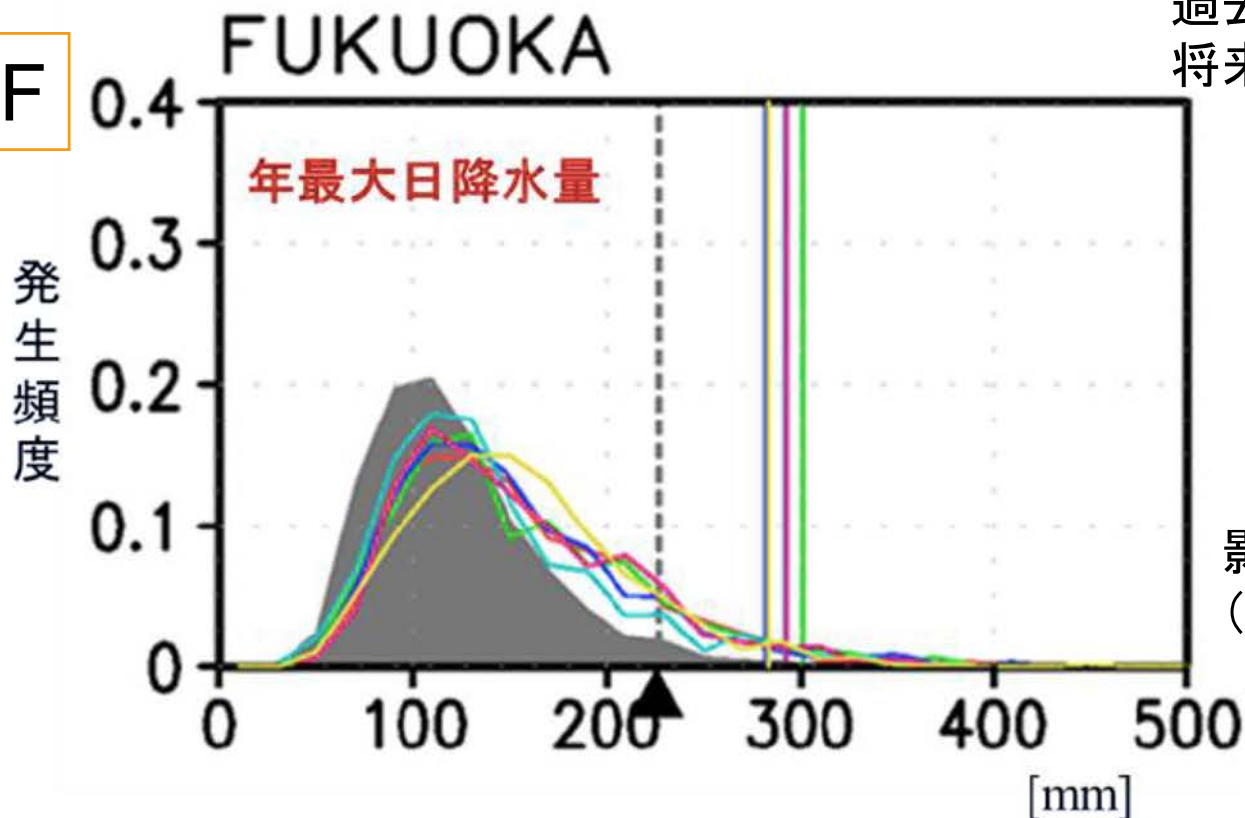
# 気候シミュレーション(将来の気候予測)

- アンサンブル予測を行うメリット  
→ 極端現象の議論ができるようになる

将来、豪雨は増加するのか？

将来、熱波は増加するのか？

d4PDF



過去再現のべ6000年  
将来予測のべ5400年

影響評価統合レポート  
(2018, p.22)

福岡における過去実験と将来実験における年最大日降水量の発生頻度分布

# 領域気候予測 と ダウンスケーリング

将来の領域気候予測の予測結果の評価を行うための手法  
の開発

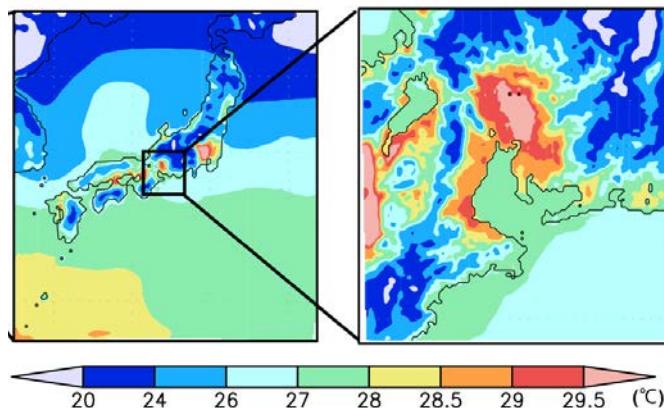
# 領域気候予測はダウンスケーリングで行います

ダウンスケーリングは、解像度の粗い情報から地域気候モデルを用いて、空間詳細な情報を見積もること。

## 領域気候モデル

RCM Nest1

RCM Nest2



## 橋渡し・トランスレーターの役割

話を噛み砕き具体化

- 細かいモデルグリット(高解像度化)
- 詳細な地形や土地利用

↓  
付加価値をつける

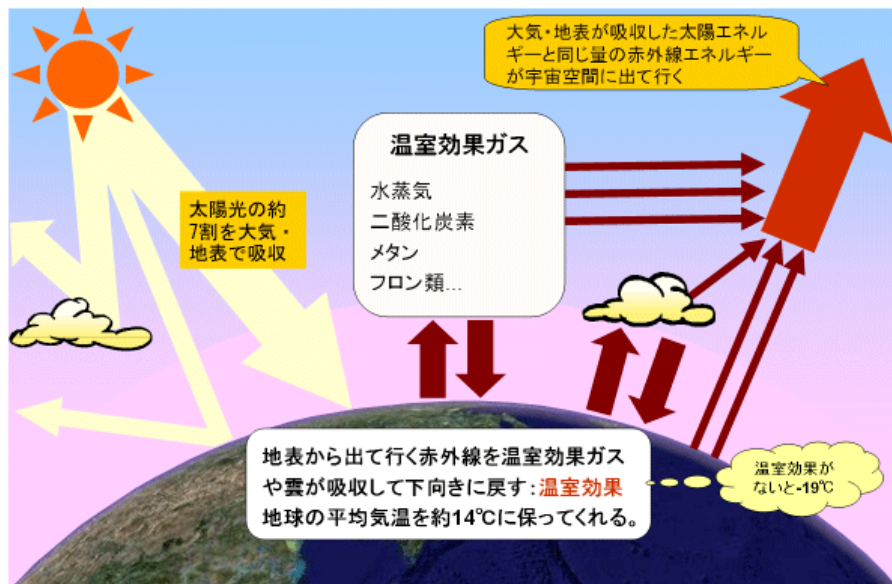


全球気候モデル



影響評価  
適応策検討

# 温室効果と地球温暖化



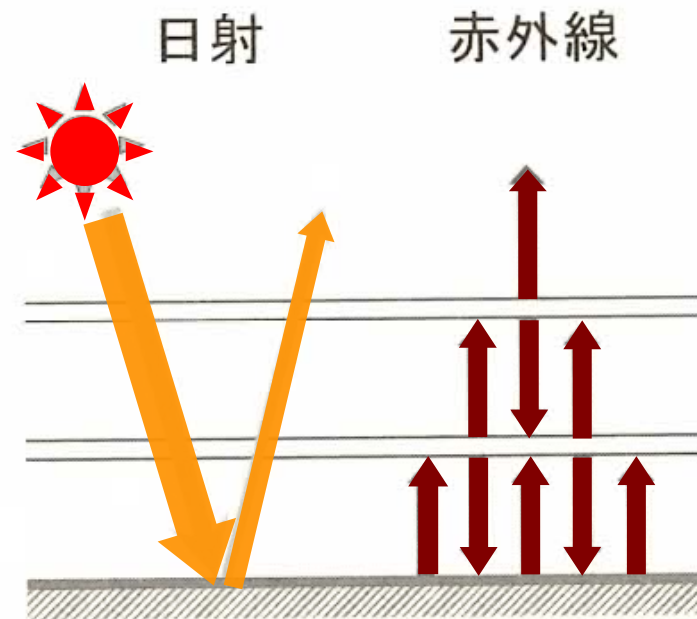
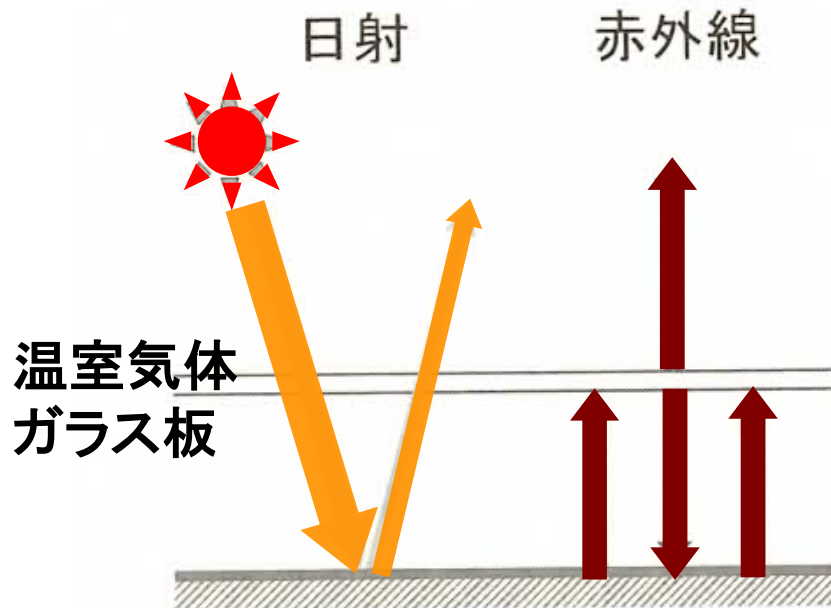
気象庁HPより

温室効果ガス濃度の増加により、地球の「温室効果」が強まったことによる影響を見積もる。

具体的には...

- 気温の上昇
- 大気中の水蒸気量の増加

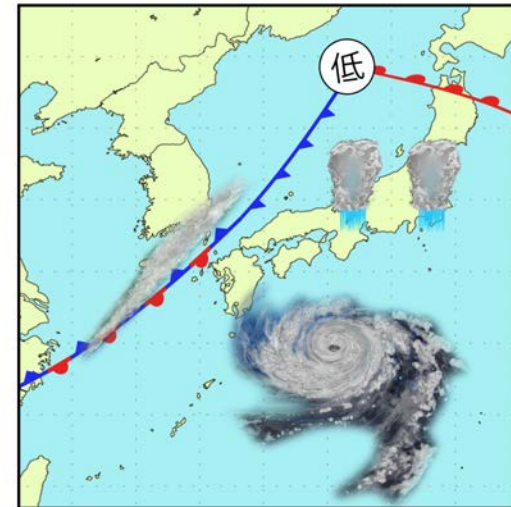
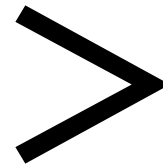
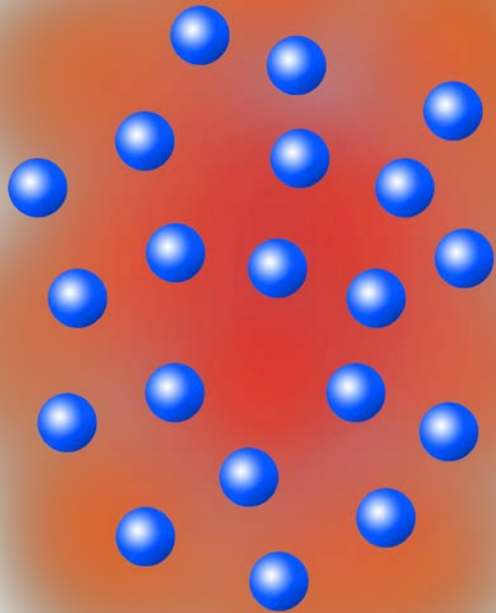
基本的には、**気候値(平均状態)**がどうかわるか



藤部(2012), p.19図の一部引用・カラー表示  
「都市の気候変動と異常気象」

# 将来の気候変化を決める2つの要因

全球平均で見れば、  
擾乱成分の変化の影響は、平均状態の変化の影響よりずっと小さい。



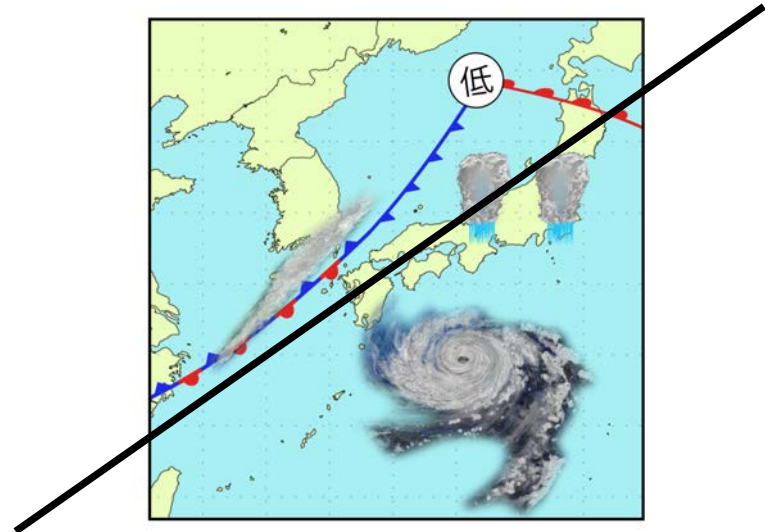
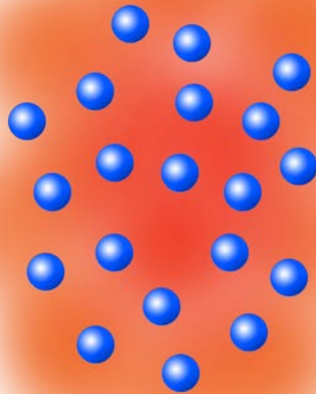
平均状態(気候平均)の変化

- ・気温上昇
- ・水蒸気量増加

擾乱成分の変化

- 雨を降らせる台風・低気圧・前線などの頻度や経路の変化

# 平均状態の変化だけを考慮した ダウンスケーリング手法が開発された



気候状態(平均状態)の変化

擾乱成分の変化 → 無視

擾乱成分の変化を無視することによる

- ・ 積分期間(20年程度)

**領域気候予測において  
擾乱成分の変化は本当に無視できるのか!?**

小さな計算量で温暖化の影響を見積もることができる!



# 実験デザイン

## 領域気候変化に対する「平均状態」と「擾乱成分」の変化の寄与

GCMによる気候データ



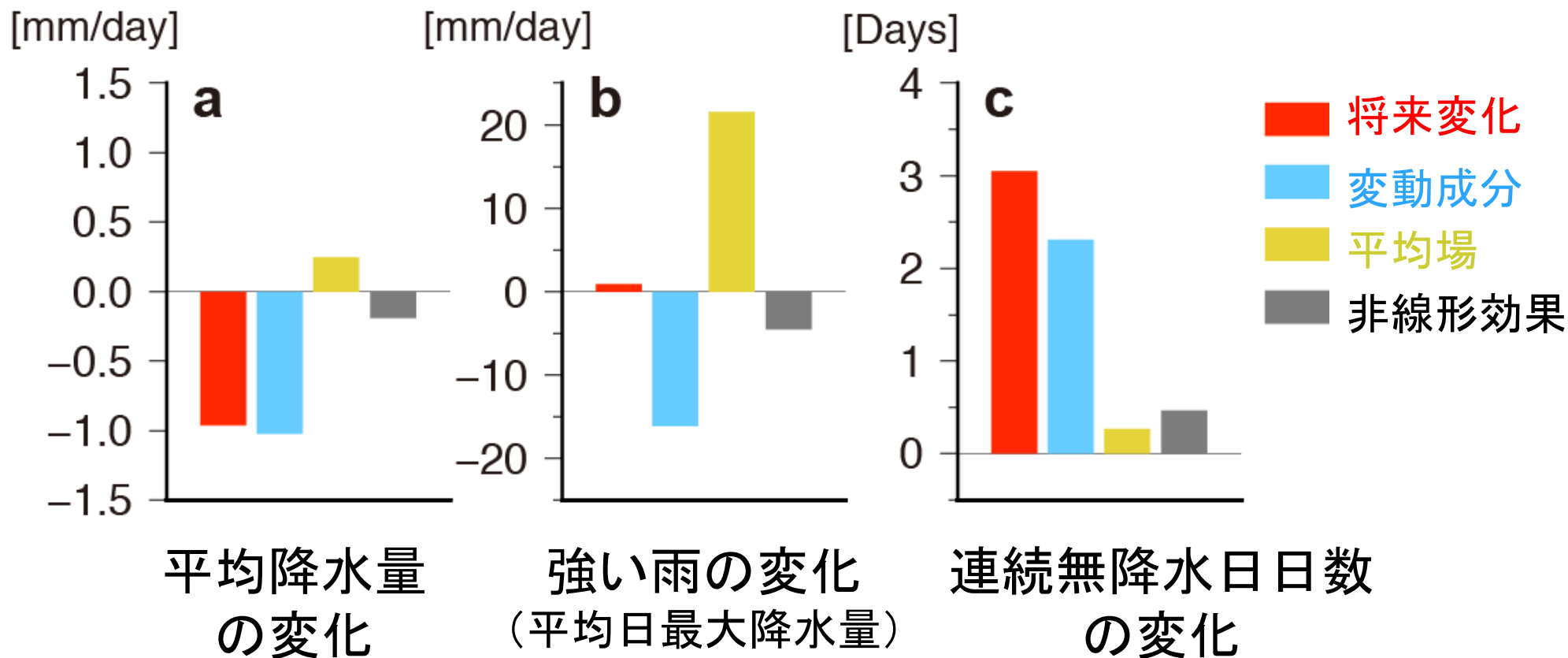
Run name	Description of experiments	Boundary condition	Output from RCM
PDDS	現在気候再現実験	$\bar{p} + p'$	$\varphi(\bar{p} + p')$
FDDS	将来気候予測実験	$\bar{f} + f'$	$\varphi(\bar{f} + f')$
Pseudo-Clim-DS	擬似気候実験 (擬似温暖化手法)	$\bar{f} + p'$	$\varphi(\bar{f} + p')$
Pseudo-Perturb-DS	擬似擾乱実験	$\bar{p} + f'$	$\varphi(\bar{p} + f')$

$\bar{A}$  : 月平均の25年平均値 を各時刻の値に線形内挿

$A'$  : 6時間値データから  $\bar{A}$  を引いた残差

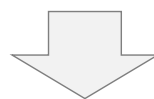
Adachi et al. (2017) based on mathematical idea of Nishizawa et al. (2018)

# 地域気候変化理解のための予測評価手法の構築



Adachi et al. (2017, Ncomm)

将来変化は平均的な気候状態の変化だけで説明できない。

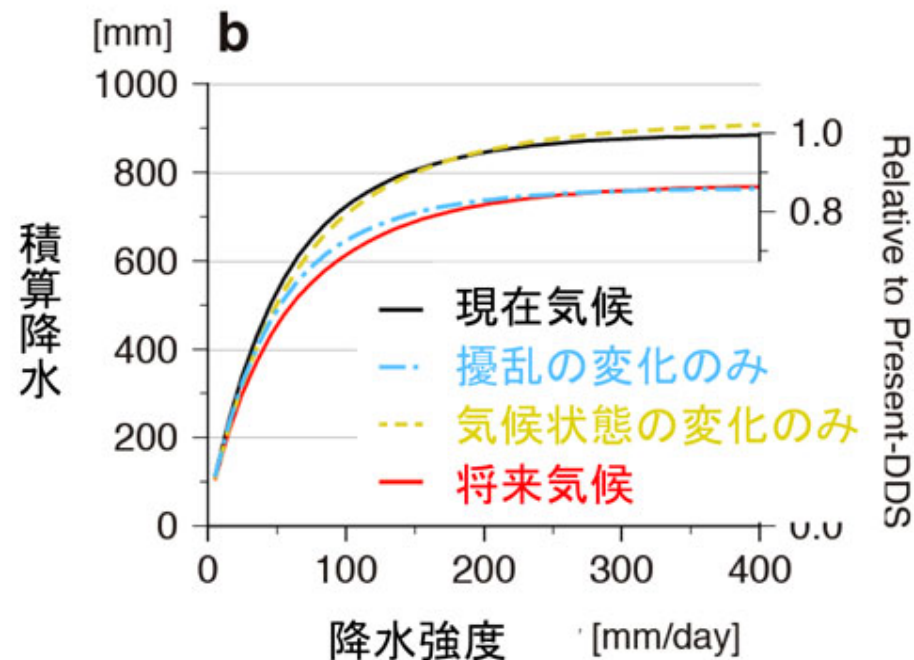
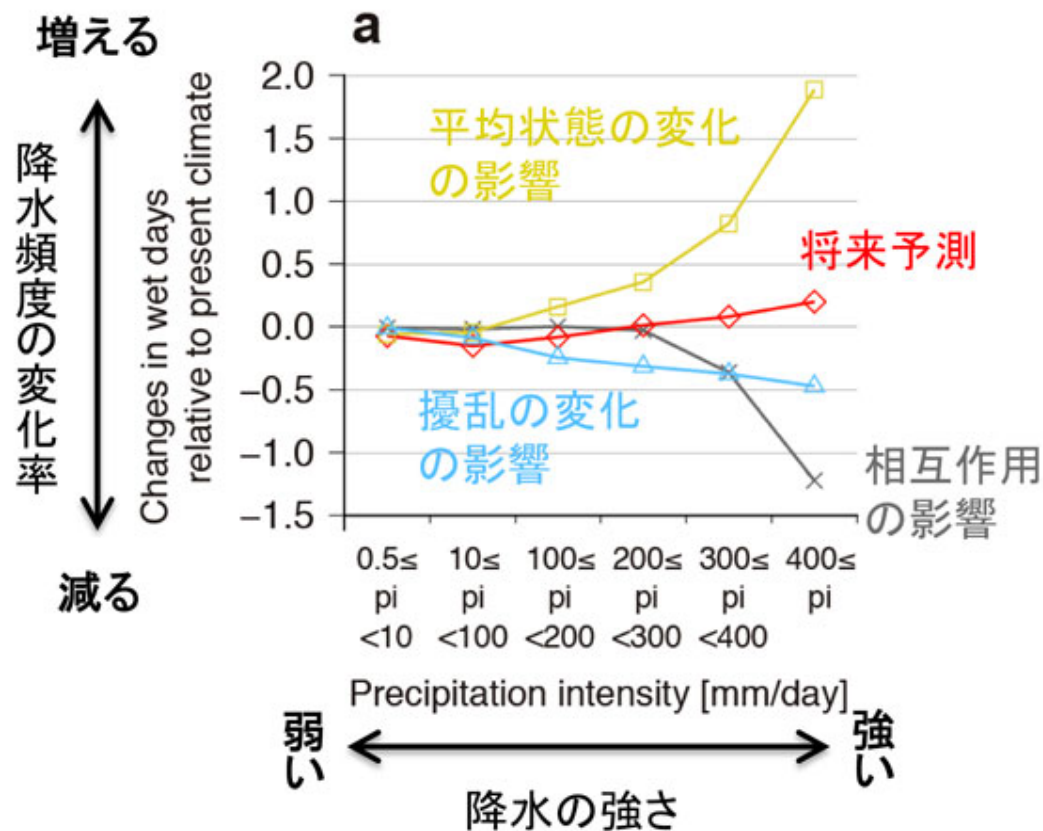


擬似温暖化手法で 将来予測 を行うことには問題がある。

# 地域気候変化理解のための予測評価手法の構築

## 豪雨災害リスクの観点

## 水資源の観点



Adachi et al. (2017, Ncomm)

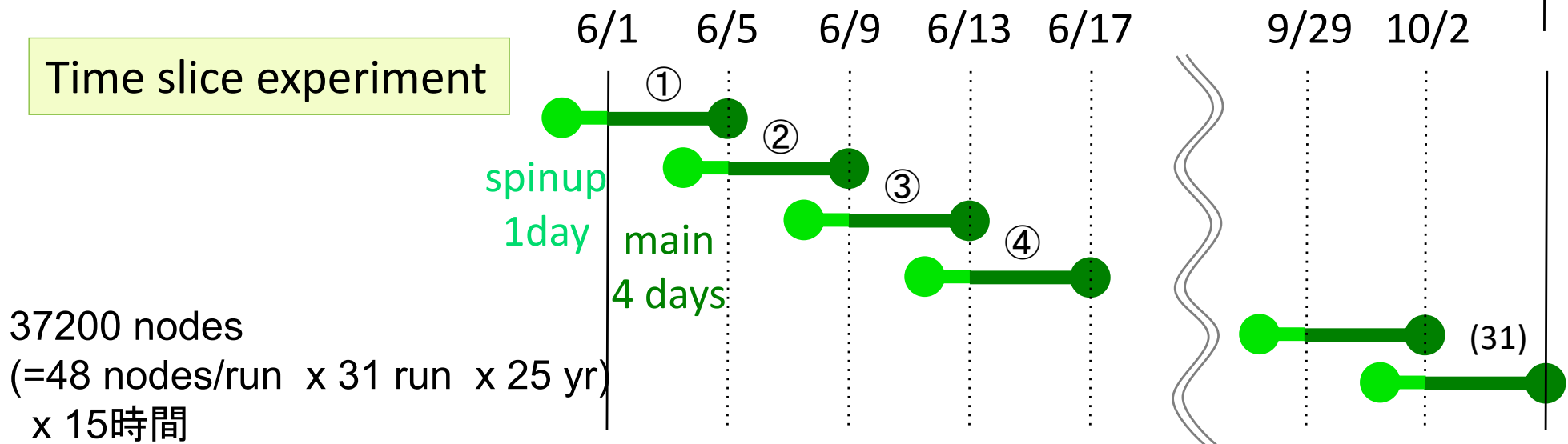
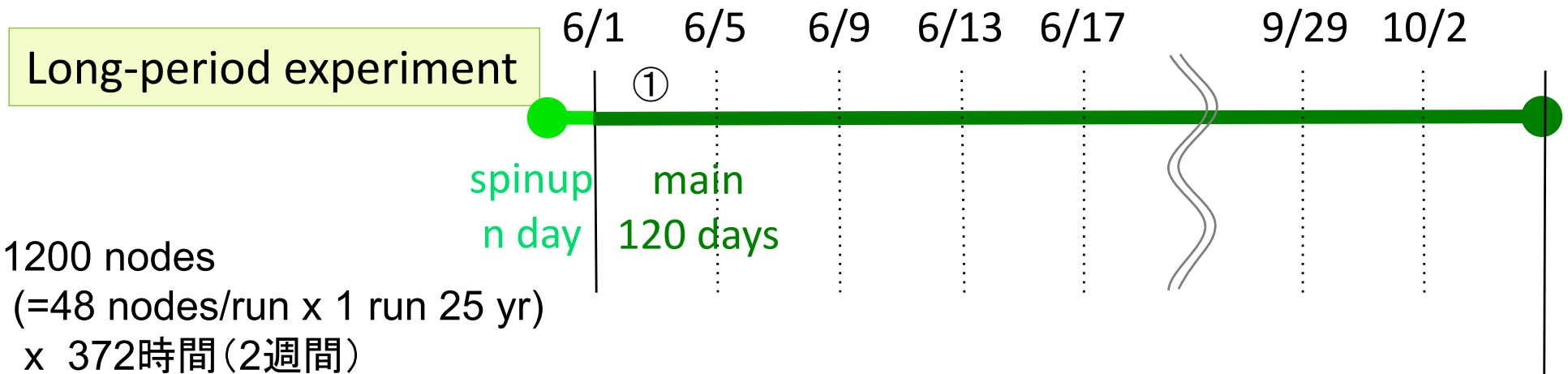
豪雨災害リスク観点と水資源の観点では、影響の大きな要因が異なる



どちらか一方の要因だけ考慮するのでは不十分

# Experimental design

**Integration Period** May 31 00UTC – October 01 00UTC  
in **1979-2003 (Present)** and **2075-2099 (Future)**



# 将来の展望

1. モデルの高解像度化 → **Capability Computer**
  - パラメタリゼーションの排除
2. アンサンブル数を増やす → **Capacity Computer**
  - 天気予報
  - 気候シミュレーション(長時間積分)
3. モデルコンポーネントの多様化・複雑化 → **Capability Computer**
  - 地球システムモデル
  - 雲微物理モデル

解像度・領域の大きさ・アンサンブル数など、  
実験設定を決める上で計算リソースが一つの制約となっている。

# 将来の展望

- パラメタリゼーションを排除
  - 積雲パラメタリゼーションなし(数100m格子)での気候シミュレーション
    - 将来気候予測で不確定性の大きな現象・見積もりの再評価
  - 乱流パラメタリゼーションなし(数10m格子)での極端現象
    - 短時間豪雨(線状降水帯)や竜巻の予測
- アンサンブルや観測の増加による予報精度向上

京・ポスト京では、少し先(10年後、数10年後)の研究をして、今見ているものの確からしさの評価、制約によって未知である事柄を知る。

モデルの解像度が、観測の時空間解像度と同程度・追い越そうとしている。  
観測の充実とともに、物理感がより一層大事。