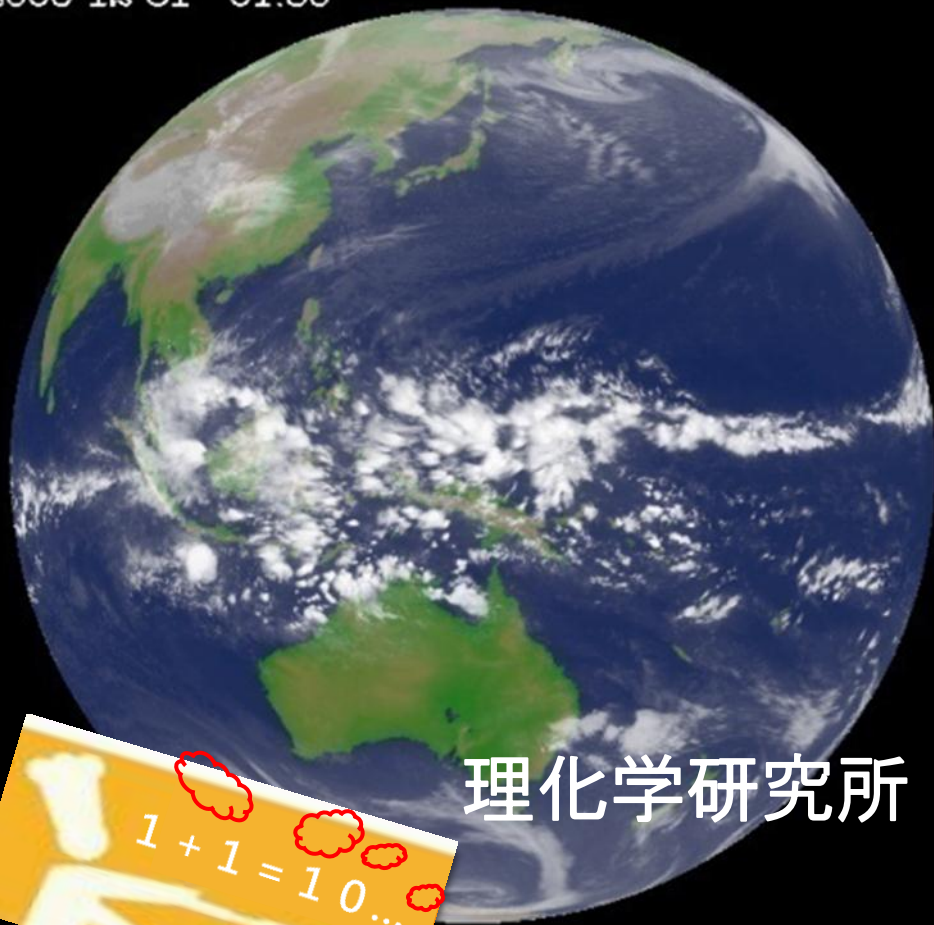


# 京コンピュータでシミュレートされる将来の台風

2006-12-31 01:30



独立行政法人  
理化学研究所・計算科学研究機構  
富田 浩文

第11回PCクラスタシンポジウム 2011年12月9日

# 主題 - 雲の高精度シミュレーション

## 雲

- ▶ 大気の運動を可視化する水物質  
例. 飛行機雲、富士山の笠雲
- ▶ 大気の運動を起こす働きもある

## 台風 (雲の一つの形態)

- ▶ 風雨災害を引き起こす  
→ 社会経済的影響大



笠雲  
河口湖測候所



ハリケーン Irene  
NOAA, Aug. 27, 2011

# 雲をシミュレートし、観測と比較する

1. なぜうまくシミュレート(=可視化)できたのか
  - 話題1 NICAMの挑戦・京に至るまでの軌跡
2. 台風研究にどんなご利益をもたらすか？  
気象学的に、また、社会的に。
  - 話題2 京で期待される成果

**衛星観測**  
MTSAT-1R, IR

**シミュレーションNICAM**  
(3.5km, OLR)

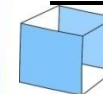
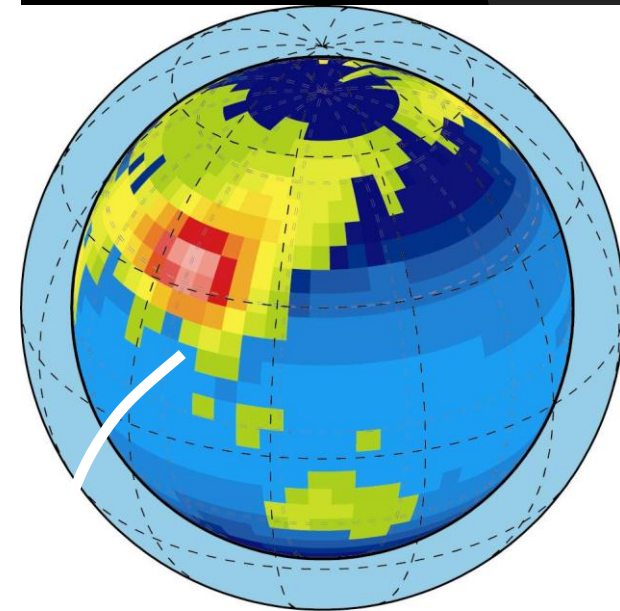
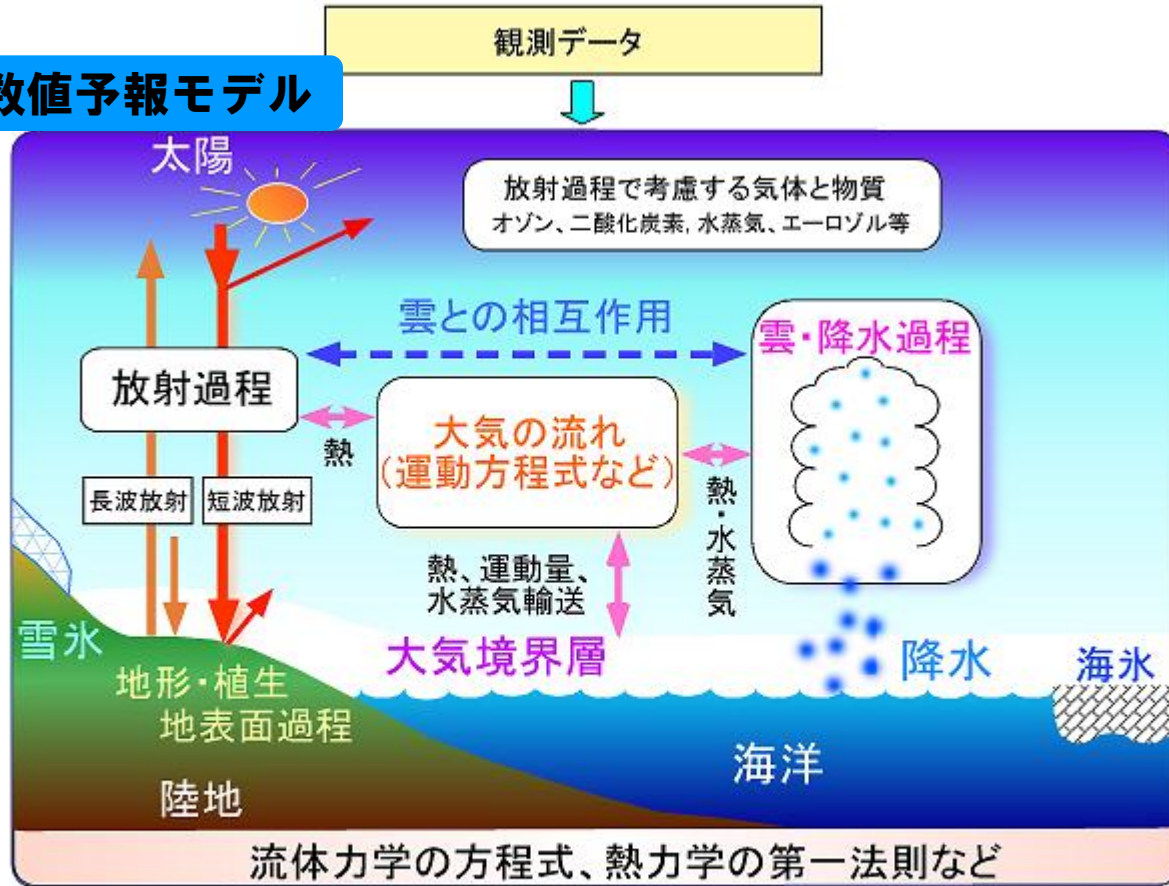
1. なぜうまくシミュレート(=可視化)できたのか
  - 話題1 NICAMの挑戦・京に至るまでの軌跡
  
2. 台風研究にどんなご利益をもたらすか
  - 話題2 京で期待される成果

# 気象・気候モデルのしくみ

- 大気の状態をコンピュータを用いて計算

大気・海洋・陸面を3次元の  
**格子**に切る（離散化）

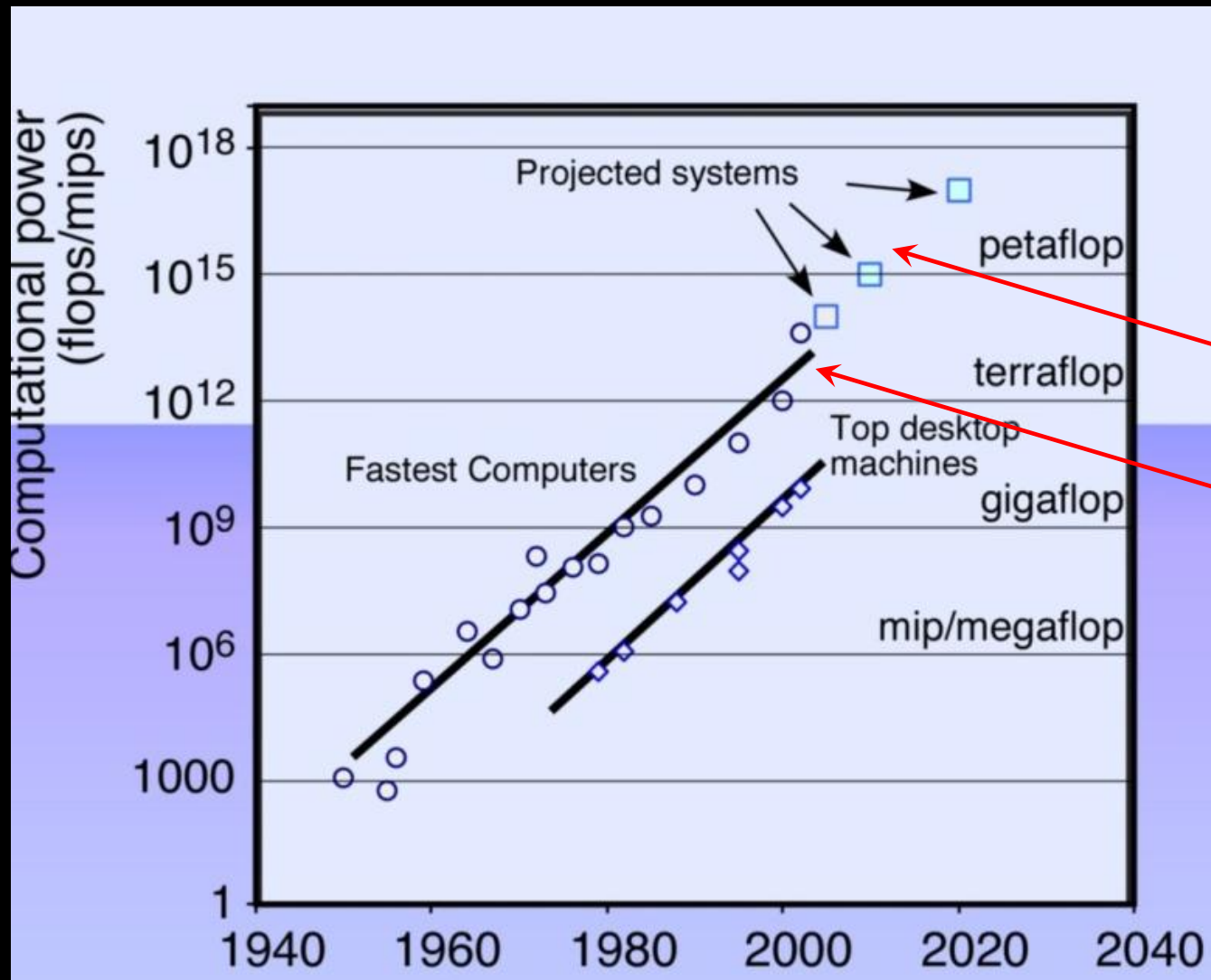
## 数値予報モデル



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

各**格子**で物理量を定義  
解の時間発展を計算

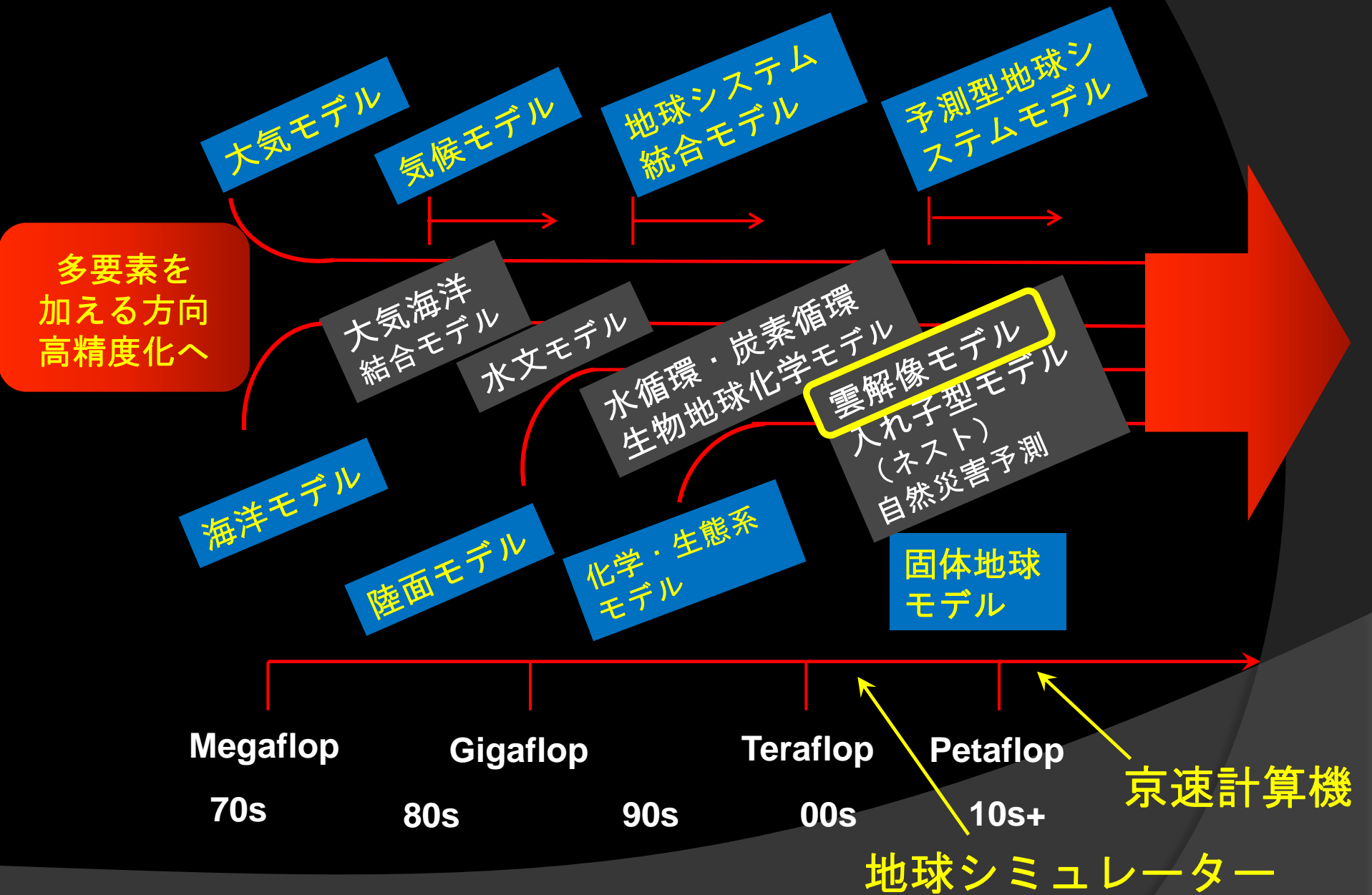
# 計算機性能の進展と数値モデルの発展



京速計算機

地球シミュレーター

# 計算機性能の進展と数値モデルの発展



# 全球雲解像モデル開発の方針

◎ モデルの複雑さ（多様性）の諸要素のうち、雲の動態は、最も重要な要素

⇒ 雲を直接計算するのが最も効果的

∴ 雲

- ▶ 大気の運動を可視化する水物質
- ▶ 大気の運動を起こす働きもある



# なぜ雲が重要か？

雲・対流の扱いは気候モデリングにおける最大の不確定要因とされている

**気候研究の進捗の制約のひとつは雲の過程とフィードバックのモデリング  
(IPCC第4次評価報告書)**

- 放射、大気境界層 …
- 生成、発達、分布
- 大気大循環

気候変化を論ずるには、雲の関与するフィードバックを知る必要がある

# なぜ雲が重要か？

## 例. 地球上の放射収支

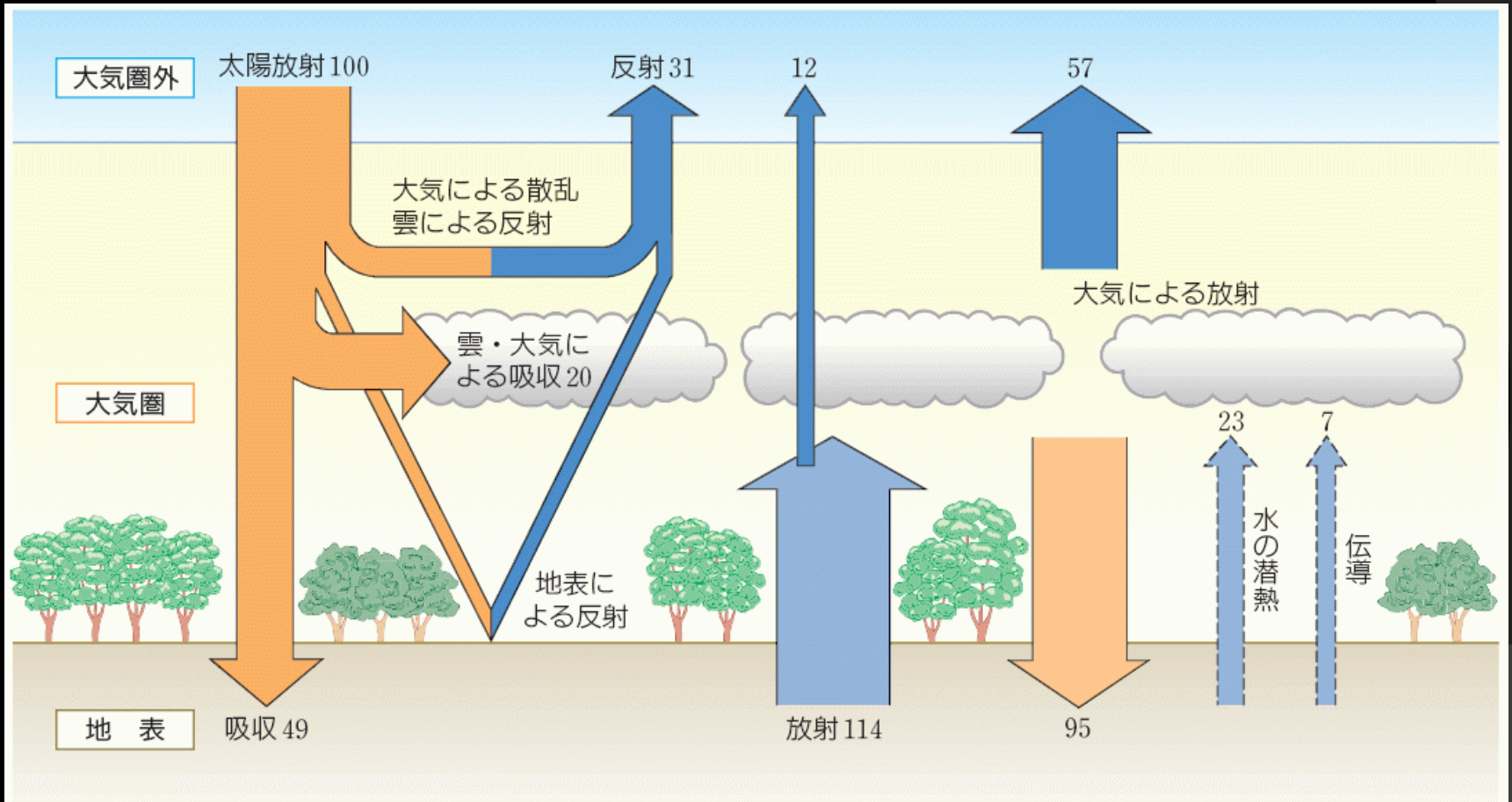


図 24 地球の熱収支 大気圏外に到達する太陽放射を 100 として、年間の熱収支を示している。

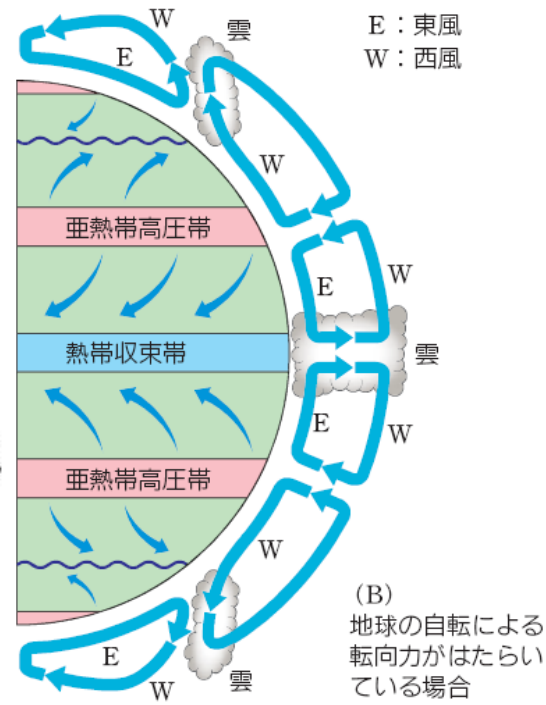
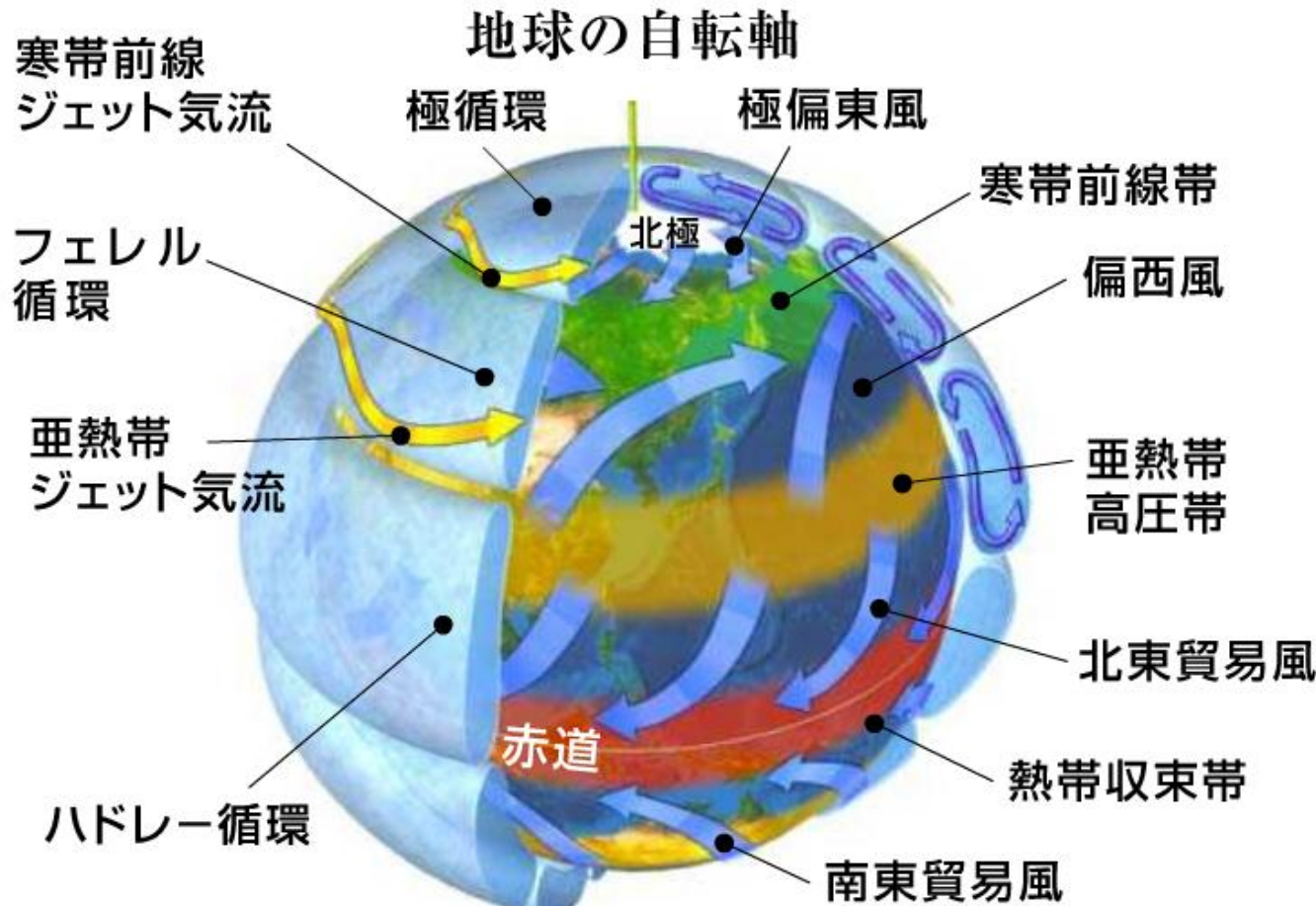
**気候変化を論ずるには、雲の関与するフィードバックを知る必要がある**

**全球を高い時空間分解でカバーする雲の観測は困難**

**数値モデルを組み立て、計算、予測する方法が有用**

**京速計算機をつかえば、高精度な雲の計算が可能**

# 雲の起こり方はランダムにみえて秩序をもつ



MTSAT-1R

Processed by  
National Institute of Informatics

# 雲の起こり方はランダムにみえて秩序をもつ

www.digital-typhoon.org  
2009-07-01 00:00 UTC

2009年7月

亜熱帯：  
雲が少ない

中緯度：  
温帯低気圧  
や前線

熱帯：  
大きな雲

熱帯に注目！：気候モデルの真価が問われる

- ▶ 地球大気の大循環の駆動源となる
- ▶ 台風の卵も熱帯に発生する

MTSAT-1R

Processed by  
National Institute of Informatics

# NICAMの着眼点

雲の起こり方（秩序と多様性）と  
気候への影響を

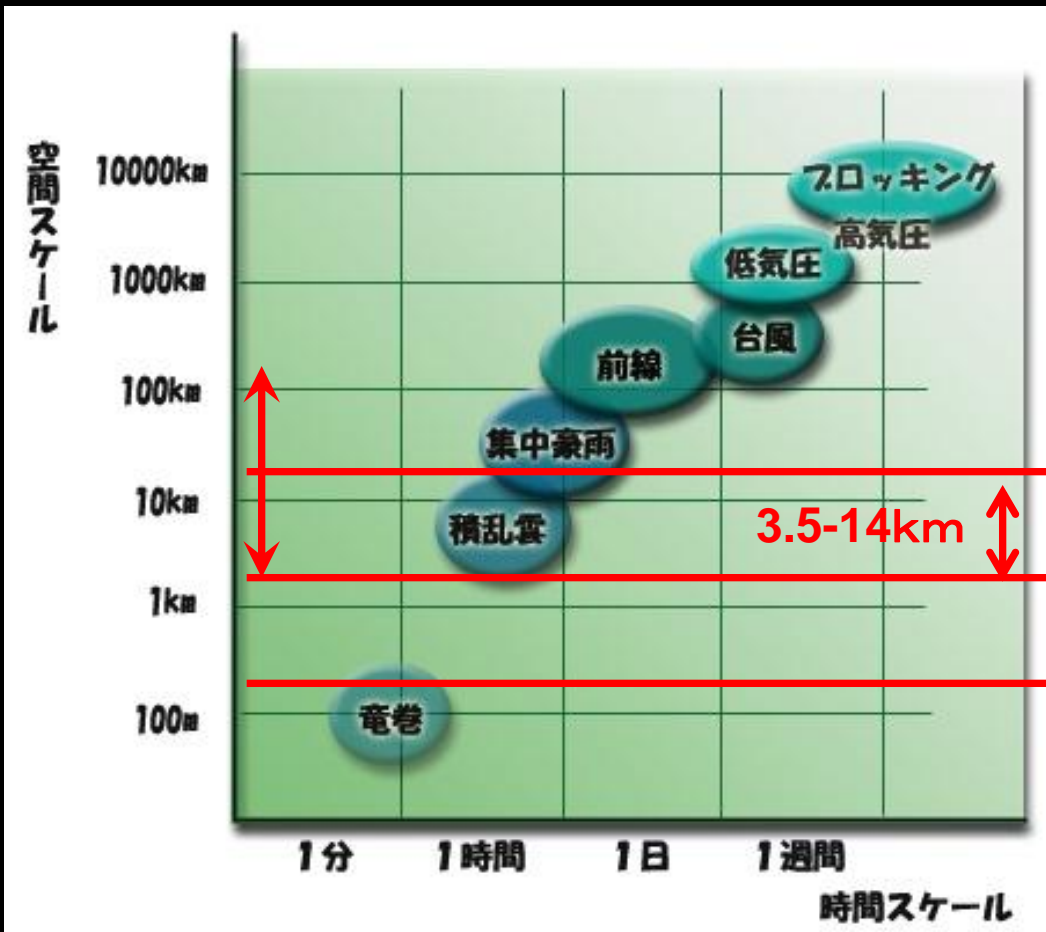
「雲集団の直接計算」

により追究する

- ◎ 従来型気候モデルの困難を解決

# 雲のモデリング

– メソスケールから気候スケールまで計算可能



20km  
従来型気候モデルの最高解像度

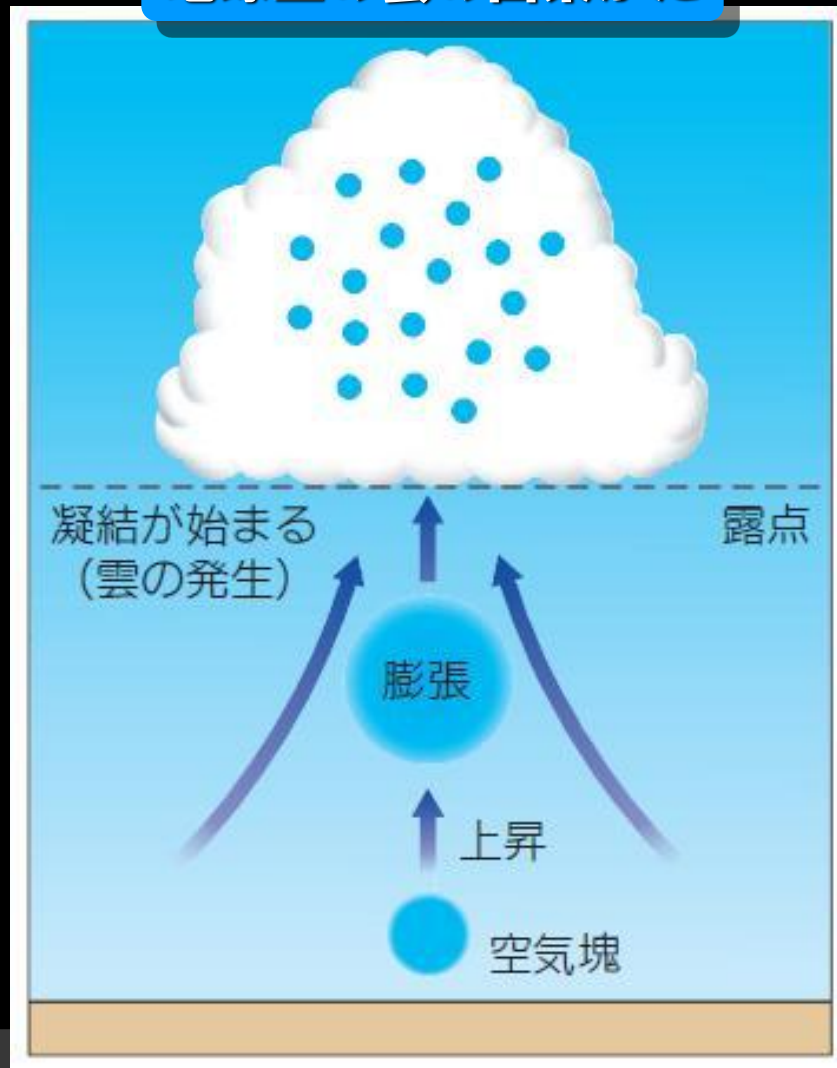
3.5km  
NICAM (ES) の最高解像度

400 m  
NICAM (京速) の最高解像度

# 雲のモデリング：まずは原理をおさえる

－メソスケールから気候スケールまで

## 地球上の雲の出来かた

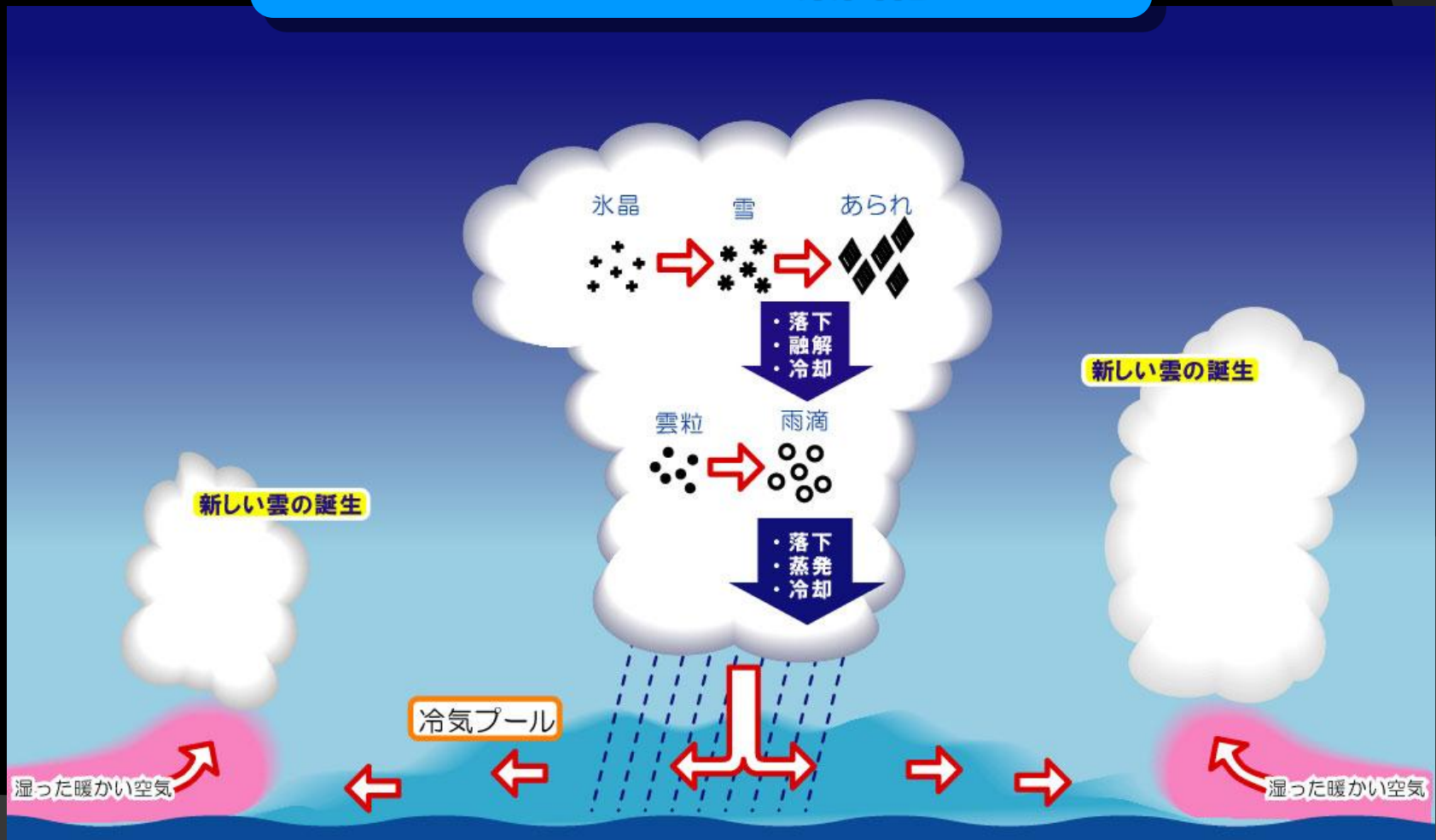




# 雲のモデリング：まずは原理をおさえる

－メソスケールから気候スケールまで

## 雲の集団化のメカニズムの一例（熱帯） メソスケールの集団化



# モデルの特徴 — 格子系をえらぶ

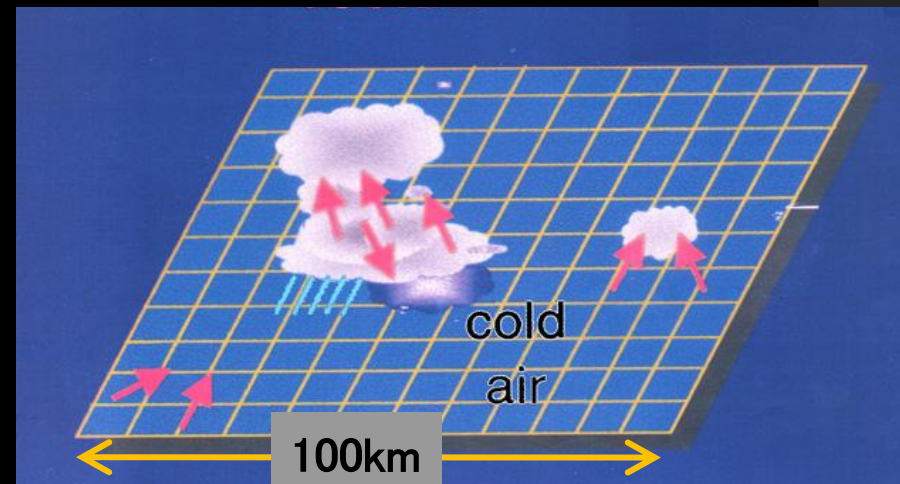
NICAM: Satoh et al. (2008), Tomita and Satoh (2004)  
JAMSTECおよび東京大学で開発された世界初の  
全球非静力学大気モデル

“Global cloud-system resolving model”  
Nonhydrostatic ICosahedral  
Atmospheric Model

水平準一様格子で地球大気全体を覆う



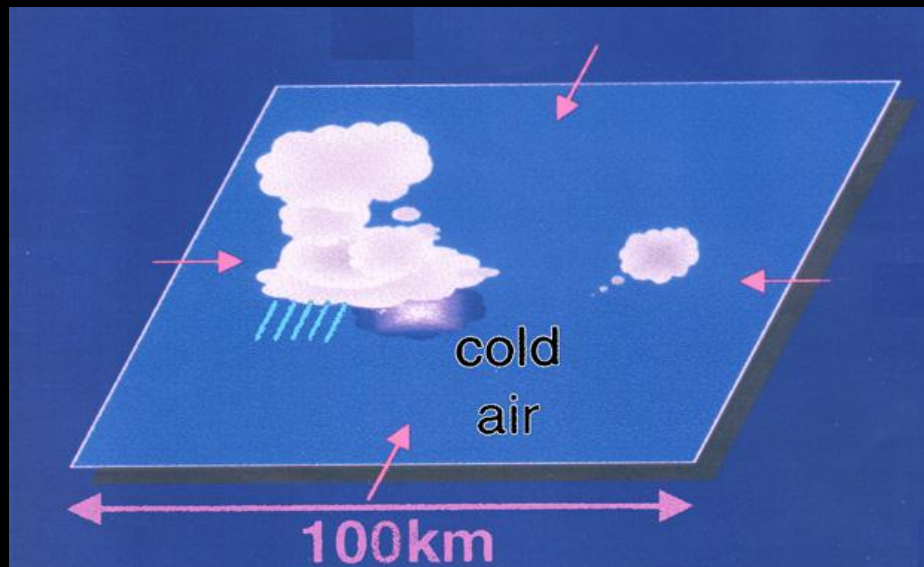
もともとの正二十面体から分割数を細かく  
して解像度を高める



1. 雲を解像できる格子系
2. 新しい物理系(非静力学モデル)

# モデルの特徴 — 雲を解像できる格子系

従来の数値予報モデルの限界を克服



## これまでのモデル

雲集団の全体を **100 km** 程度の領域の平均値で代表

⇒ 雲の生成消滅を直接計算できなかった

⇒ IPCC第4次評価報告書の最高解像度モデル（水平格子 **20 km**）でも強い台風が表現できなかった

雲集団内部の1つ1つの雲（**5 km以下**）を直接計算したい！

⇒ **NICAMの開発**

# モデルの特徴 — 物理手法の新しさ

## 雲・対流の表現の違い

### 従来型の気候モデル（静力学モデル）

- 静力学近似（鉛直加速度を予報しない）
- 雲・対流の表現：パラメタリゼーション  
～集団の効果のある仮定に基づいて表現

### NICAM（非静力学モデル）

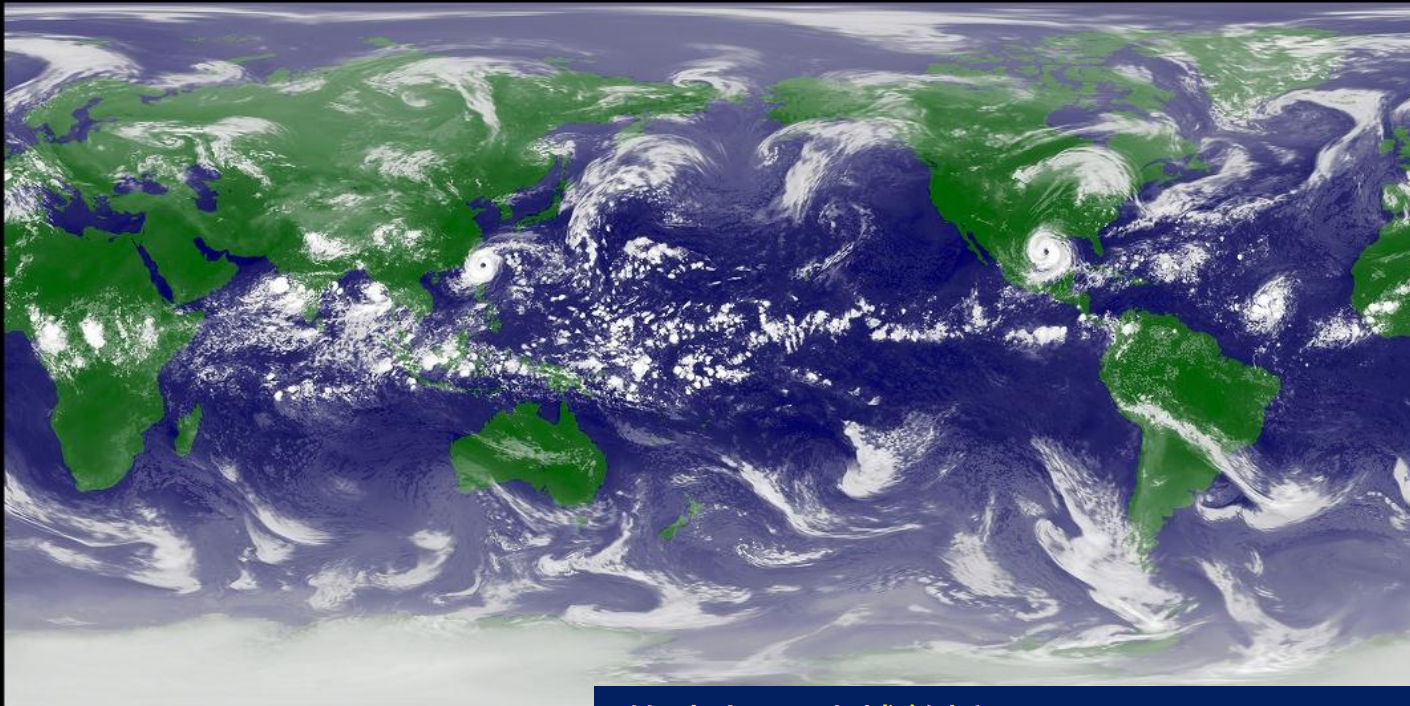
- 鉛直加速度を予報
- 雲・対流に伴う上昇運動を直接表現可能

# モデルの特徴 – このモデルではじめて可能になったこと

- ・ 積雲クラスターを直接表現可能：熱帯に遍在する積乱雲の集団
- ・ 台風の発生、発達などライフサイクルを表現可能

NICAM 7-km 格子

2008091300 Z



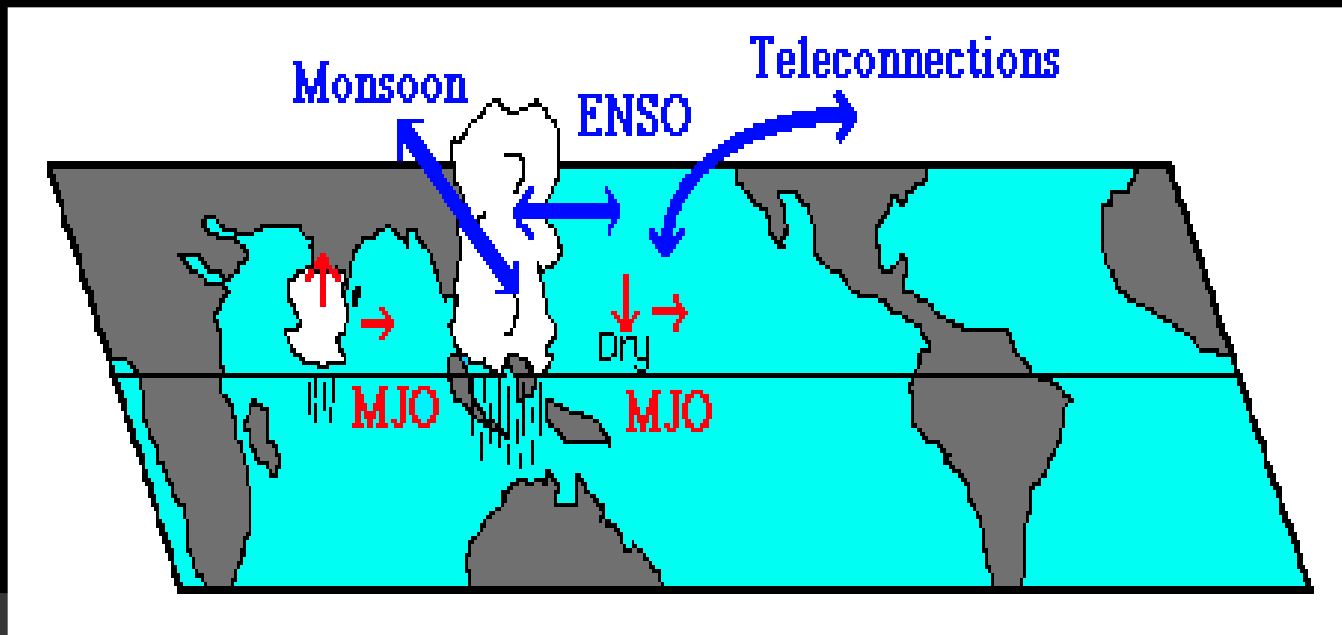
筑波大・田中博教授 (2010, vol.29-1, NAGARE)

# モデルの特徴 – このモデルではじめて可能になったこと

- ・ 積雲クラスターを直接表現可能：熱帯に遍在する積乱雲の集団
- ・ 台風の発生、発達などライフサイクルを表現可能
- ・ 発生のきっかけを与える熱帯域の大気擾乱を表現可能

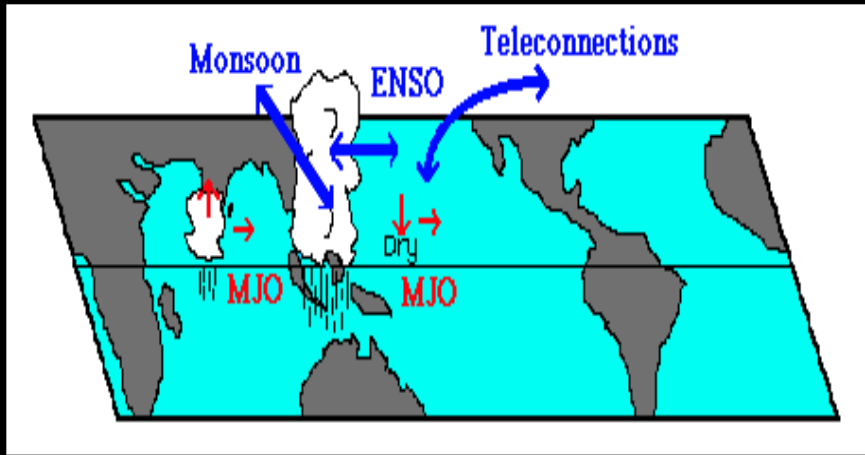
赤道域を東進する大規模な大気の運動

– マッデンジュリアン振動 (MJO: Madden-Julian Oscillation)

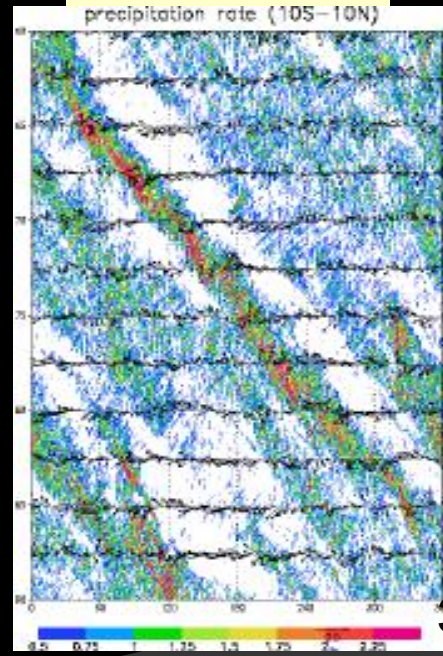


# モデルの特徴 – このモデルではじめて可能になったこと

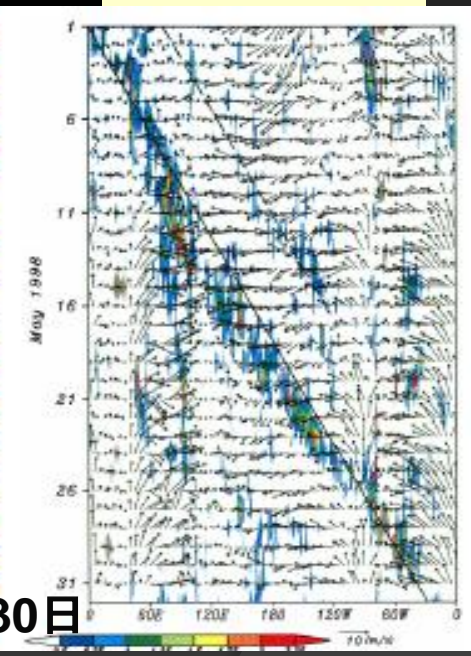
- ・ 積雲クラスターを直接表現可能：熱帯に遍在する積乱雲の集団
- ・ 台風の発生、発達などライフサイクルを表現可能
- ・ 発生のきっかけを与える熱帯域の大気擾乱を表現可能



NICAM計算



観測 TRMM



時間

経度

30日

1. なぜうまくシミュレート(=可視化)できたのか
  - 話題1 NICAMの挑戦・京に至るまでの軌跡
  
2. 台風研究にどんなご利益をもたらすか
  - 話題2 京の夢



# 京で可能となること

## モデルの水平解像度が高くなる

従来型気候モデルの最高解像度：20 km

NICAM(従来)の最高解像度：3.5 km

NICAM(京)の最高解像度：0.4 km (過程研究)

7.0 km (気候研究)

- 台風の雲の基本構成要素である、積乱雲の集団が解像できるようになる

- 渦の種の発達と、大気擾乱や雲との相互作用が精度よく表現できるようになる

# 京の台風研究方針

古くからの  
大問題

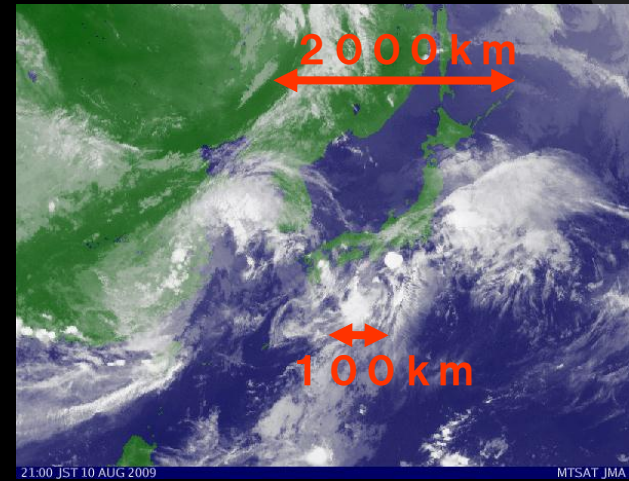
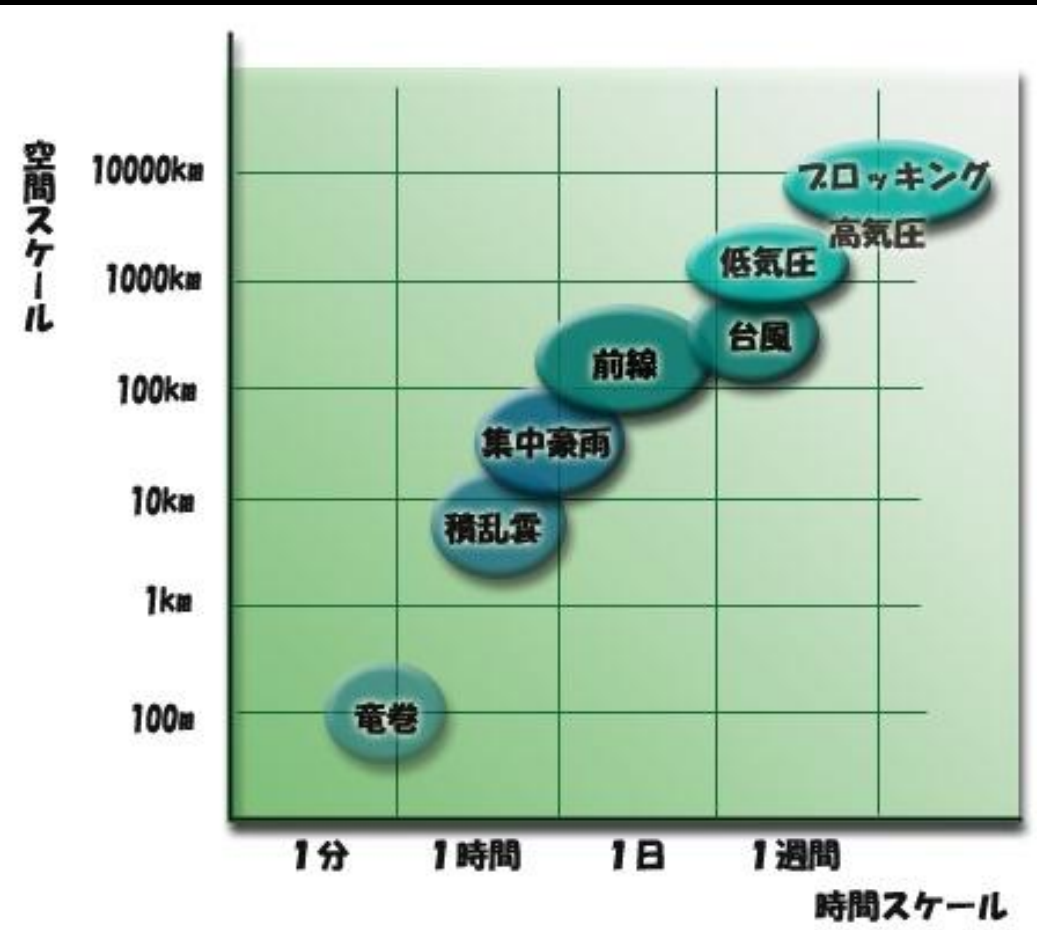
- 1 発生メカニズムの解明・予測  
- 階層構造の形成過程を知る

- 2 将来変化の予測

現在・未来  
の大問題

# 台風は雲の階層構造を含む - 階層構造とは

経験則：風雨の強弱は数10分～数時間の単位で変動する



<http://www.ima.go.jp/jp/qms/>



気象庁

<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-1-3.html>

# 台風モデリングの本質

激しい風雨をもたらす雲の盛衰を適切に表現すること

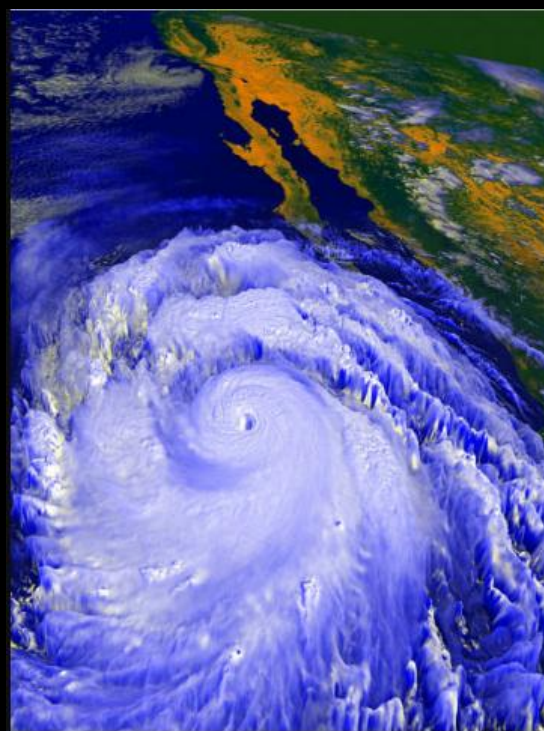
— 階層構造が激しい変化をもたらす

— 将来の気候変化の影響理解の基礎となる



**ハリケーン Irene**

NOAA, Aug. 27, 2011



**ハリケーン Linda**

NOAA, Sep. 9, 1997

# 台風レシピ – どうやって作られる？



## 材料

対流圏（地上  
～10数 km)の  
不安定

適度な強さ  
の渦

積乱雲



暖かい  
海面水温  
(例えば27度以上)

動画 Courtesy  
Dr. Rob Gutro  
(NASA/GSFC)

# 台風のレシピ – どうやって作られる？



## 調理のコツ

- 熱帯大気に渦や雲はたくさん存在する
- 大規模な波や気圧の谷などの助けで台風発生が誘発される

適度な強さ  
の渦



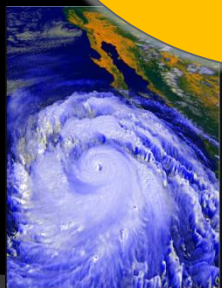
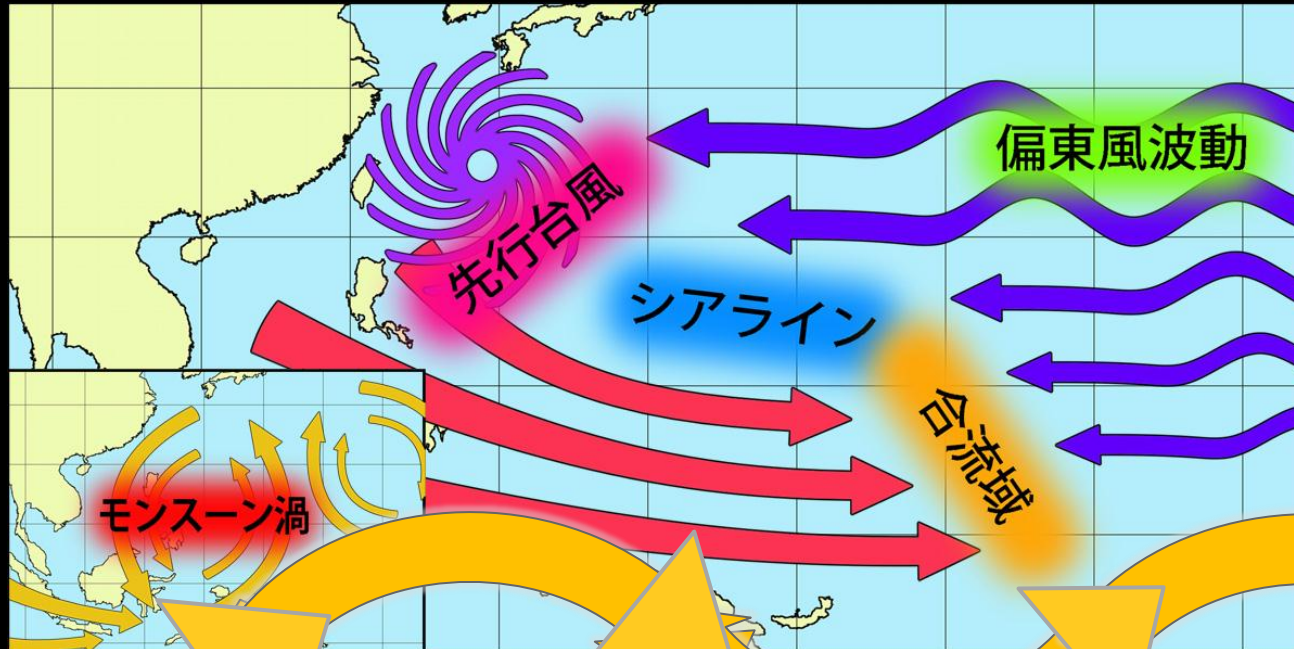
積乱雲

相互作用

# 台風レシピ – どうやって作られる？



調理： 雲と流れの相互作用が台風をうむ



擾乱ごとの役割が示唆されている  
– 京では、これを実証する

図素材提供：  
吉田（理研AICS）

# 京の台風研究方針

古くからの  
大問題

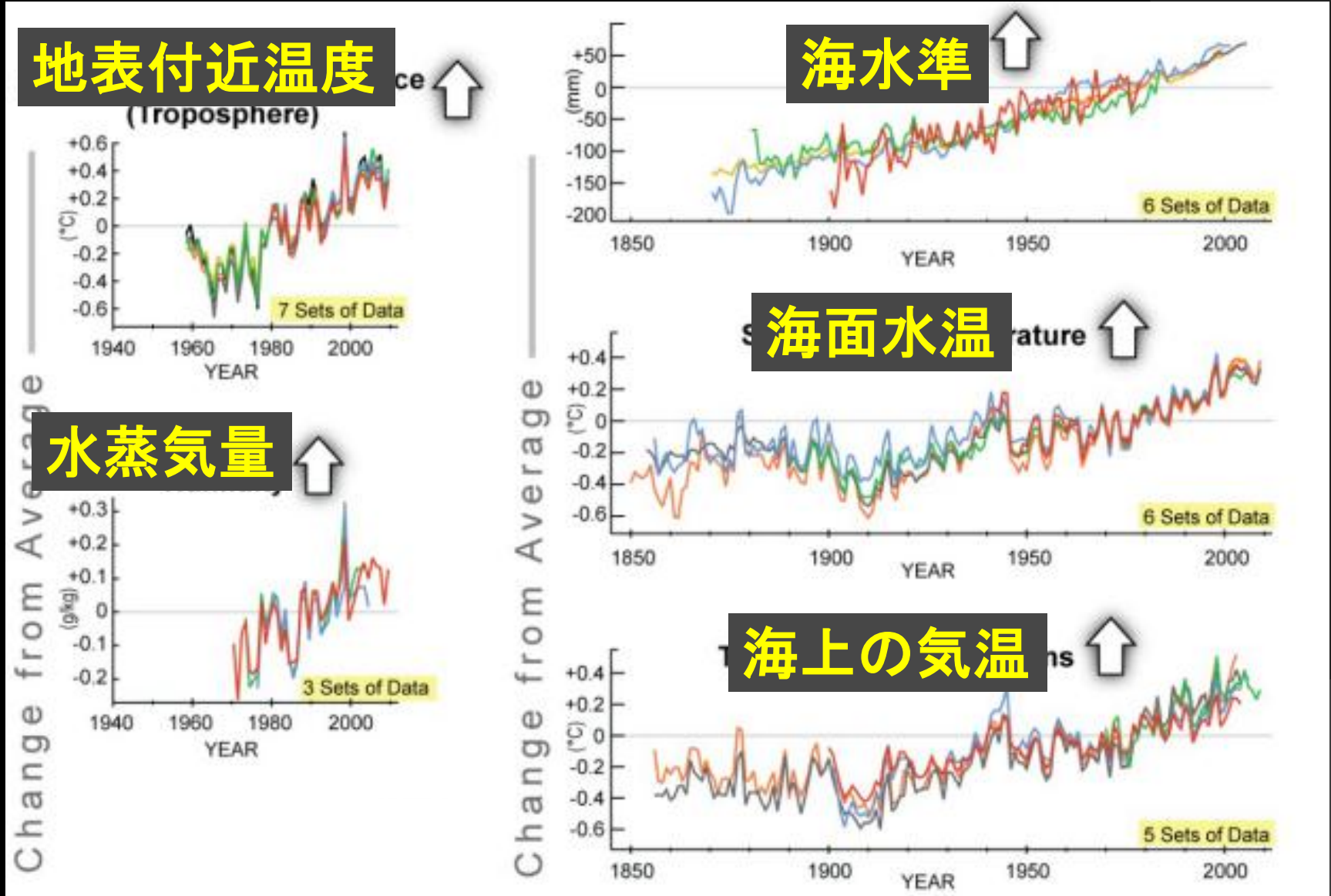
- 1 発生メカニズムの解明・予測  
- 階層構造の形成過程を知る

## 2 将来変化の予測

現在・未来  
の大問題



# 温暖化は進行しているか？ - 観測から・過去数十年以上の推移



Courtesy:

Dr. K. Trenberth (NCAR)

# 京でめざす台風の将来変化研究

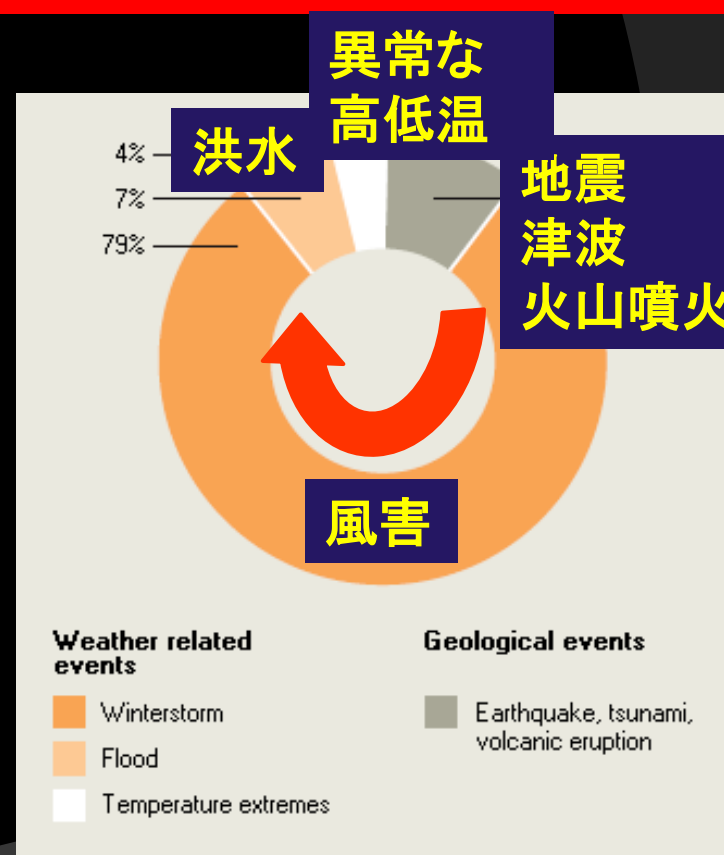
- サイエンス、社会の関心事にストレートにこたえる
- 気候変化がないとしても、台風は脅威である。まして、気候変化が起こったらどうなるかについて、無関心ではいられない

気候変化：地球温暖化を含む広義の変化

# 京でめざす台風の将来変化研究

Wind storm – 世界の自然災害  
に起因する保険支払い額の約80%

- どの程度凶暴化するか？
- その頻度は？
- 発生予測は可能か？

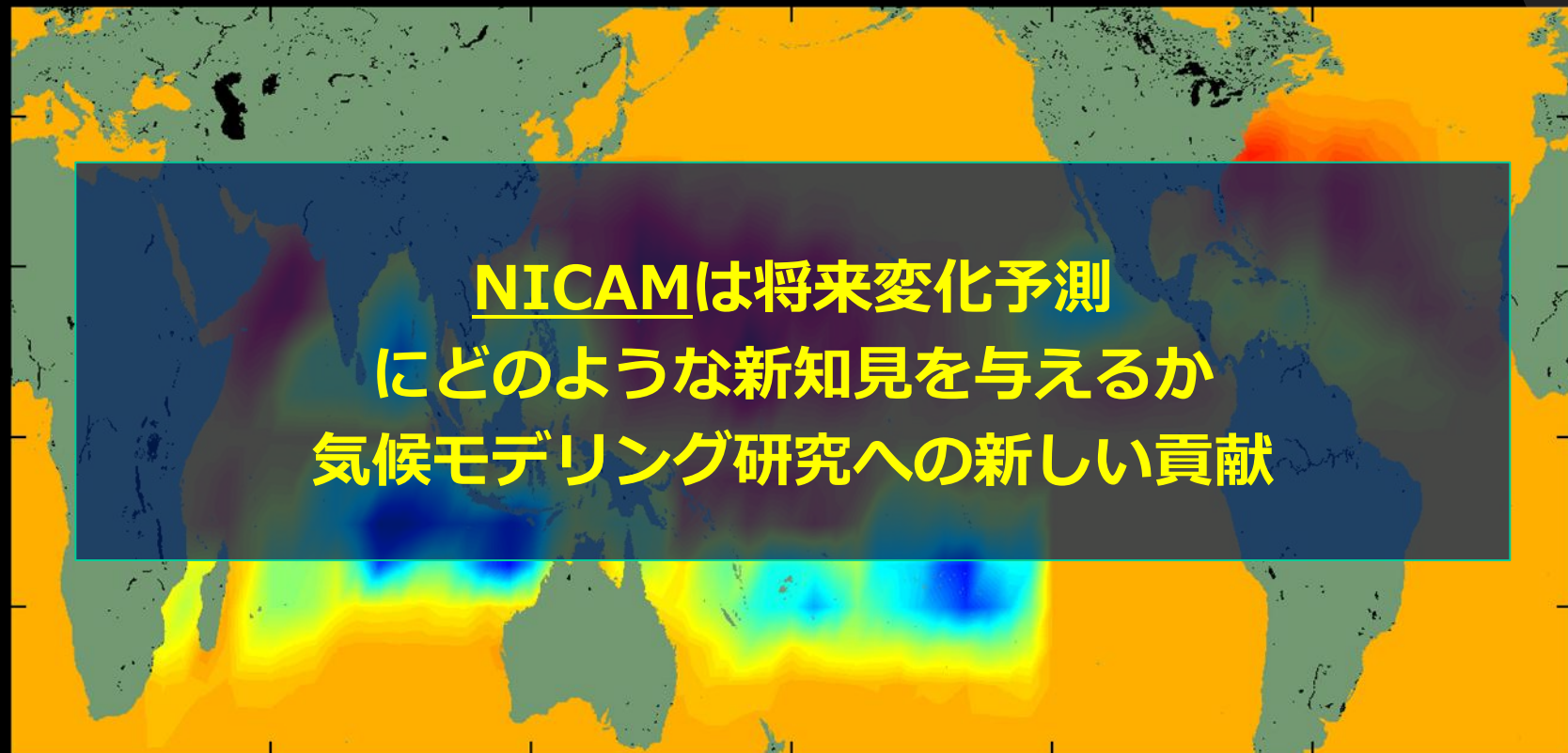


# 問いにこたえるために

- どの程度凶暴化するか？ 強さの表現
- その頻度は？ 環境条件への適切な応答
- 発生予測は可能か？ 雲の成長とトリガー

# 最大の問題: 21世紀末に台風は、どこでどの程度増えるか

## IPCC-AR4参加7モデルの解析・コンセンサス



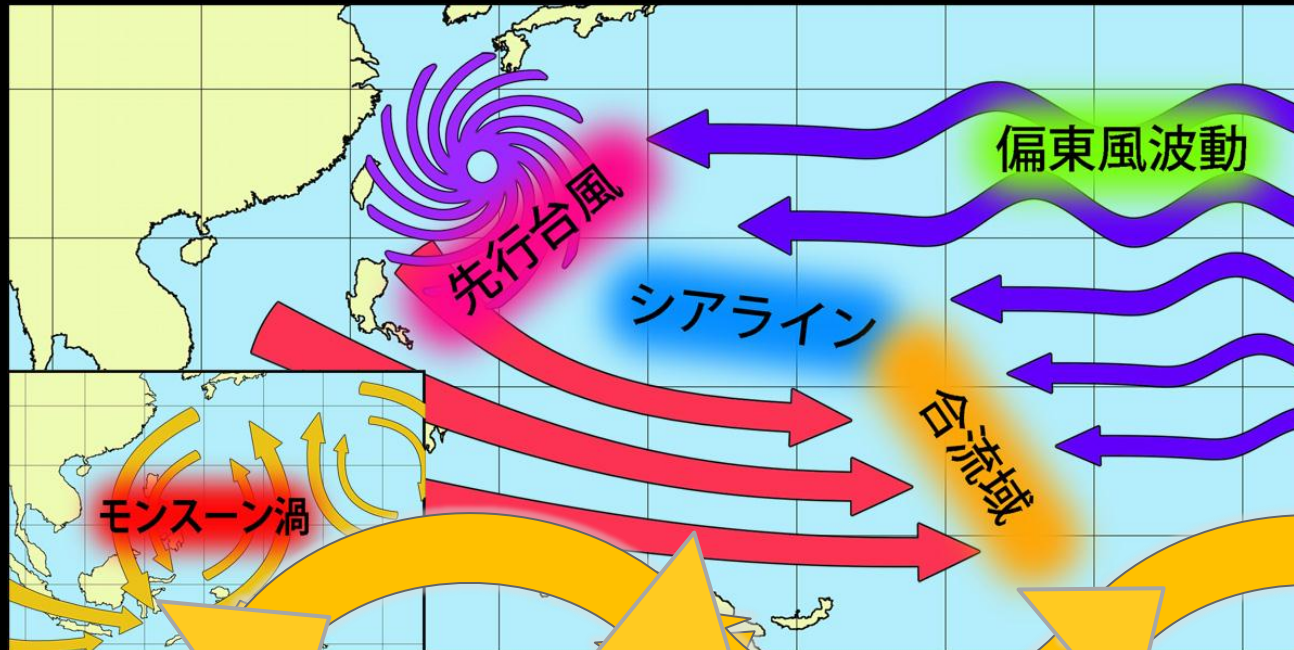
発生密度の差  
「21世紀末の20年間」と「20世紀末の20年間」

Courtesy  
Dr. Kerry Emanuel

# 台風のレシピ – 応用

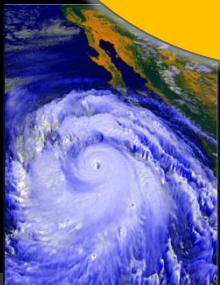


温暖化すると雲と流れの相互作用はどうか？  
– 頻度、強度、台風の雲構造の変化は？



マッデンジュリアン振動

擾乱ごとの役割が示唆されている  
– 京では、これを実証する



図素材提供：  
吉田（理研AICS）

# 台風の研究例 — 従来のNICAMでの研究



## NICAMを用いた台風の将来変化研究の第一歩

- 頻度と強度、雲頂高度の変化を雲クラスター直接計算から示す

Yamada et al. (2010) – ネイチャー誌・研究ハイライト

Oouchi et al. (2010)

- 最先端の台風強度モデルから、中緯度での発生可能性を示す

Emanuel, Oouchi, Satoh, Tomita, and Yamada (2010)

# 台風の研究例 — 従来のNICAMでの研究

雲の直接計算により  
不確定性を払拭

熱帯低気圧の将来変化

頻度減り、雲頂高く、強いもの増える

台風の背が高くなるとは？

台風とは

「下面の暖かい海」と「雲頂付近の低温」の温度差  
を原動力とした熱機関

⇒ 温暖化により、海面水温が高くなるとともに、雲頂  
高度がより高くなり、熱機関がより活発化して、台風が  
強くなると考えられる。

従来型気候モデルの雲の不確定性を排除した  
新しいモデルからの成果

→ IPCC-第4次評価報告書から、新手法により前進

CLIMATE CHANGE

## Fewer, taller, fiercer

Geophys. Res. Lett. doi:10.1029/2010GL042518  
(2010)

Using a climate simulation with greater resolution than conventional models, researchers have found that tropical cyclone clouds will grow taller in a warmer world.

This could explain the increased intensity of storms predicted by the

Yohei Yamada of the Marine-Earth Science in Yokohama and his prototype global cloud model with 14-kilometer simulated spring-to-summer for climate conditions in which carbon dioxide is at the present level. They storm clouds will height frequency will decrease which is consistent with previous findings.

ネイチャー誌  
“Research  
Highlights”

Climate change:  
“Fewer, taller,  
fiercer”,  
Nature, 464,1107.  
(2010年4月)





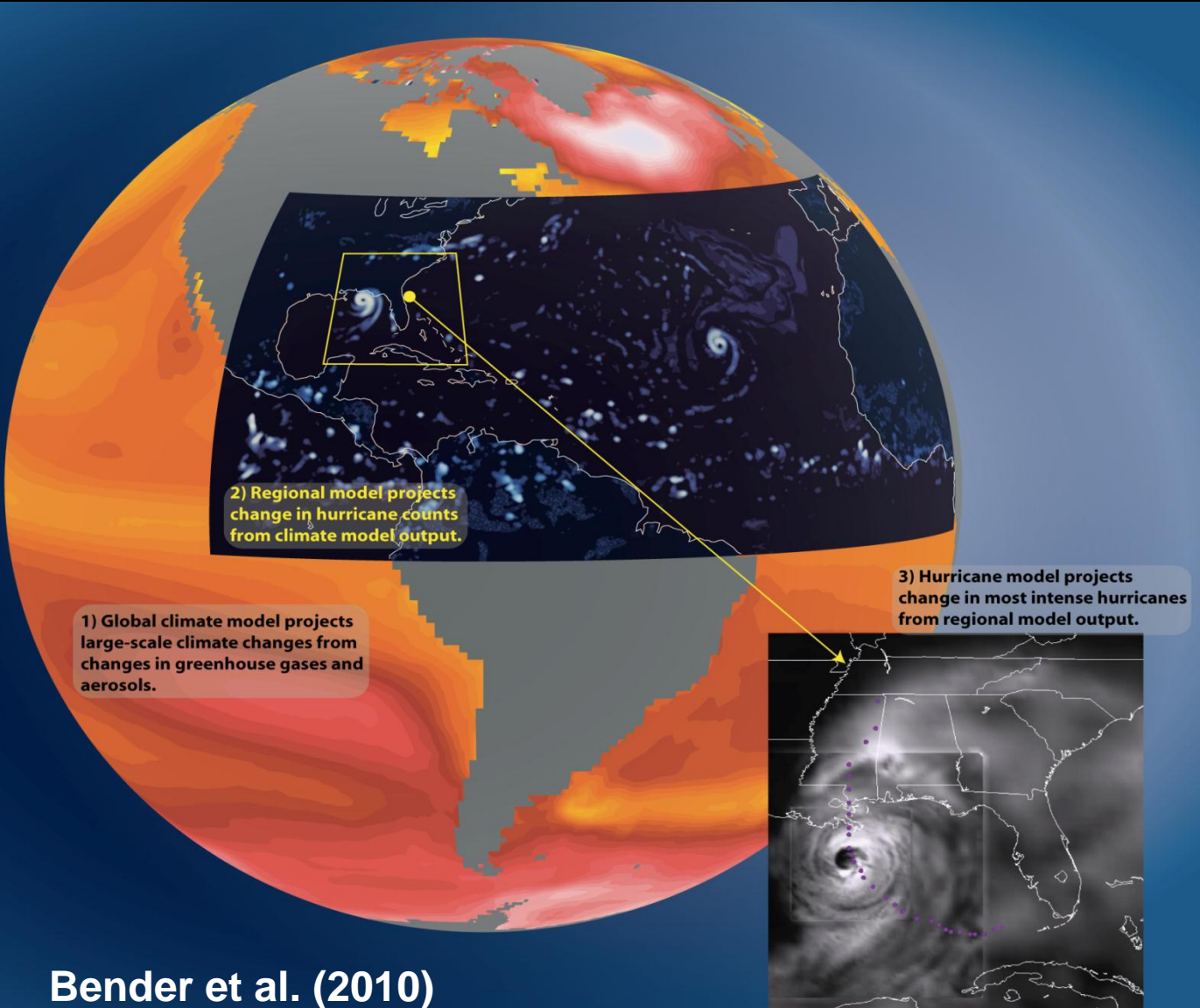
# 台風の研究例 — 従来のNICAMでの研究

(NICAMとダウンスケールモデル)



現在気

温



1) Global climate model projects large-scale climate changes from changes in greenhouse gases and aerosols.

2) Regional model projects change in hurricane counts from climate model output.

3) Hurricane model projects change in most intense hurricanes from regional model output.

Bender et al. (2010)



10)

# 京コンピュータを活用すれば： 台風のこんな研究ができる

## ■ 発生メカニズムの解明

＜渦と雲の相互作用のきっかけを知る＞

- ・ 階層構造の役割、発生に関わる大気擾乱の理解
- ・ 気候変化－大気大循環、水循環との相互作用

## ■ 高精度の将来予測

＜環境変化に対する台風の力学・熱力学変化を予見する＞

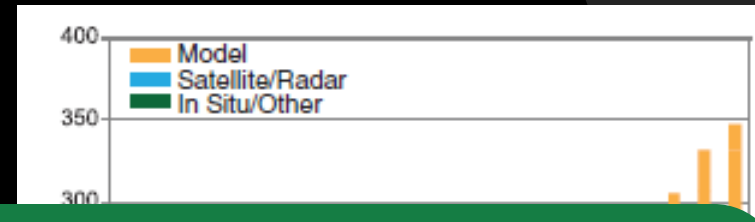
- ・ 発生頻度、分布、強度（風速、雨など）の変化
- ・ 大きさや、水平、鉛直構造の変化

⇒ 防災、減災の基礎となる科学的知見の充実

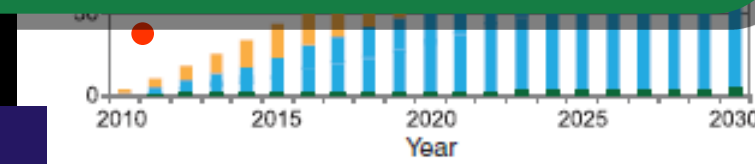
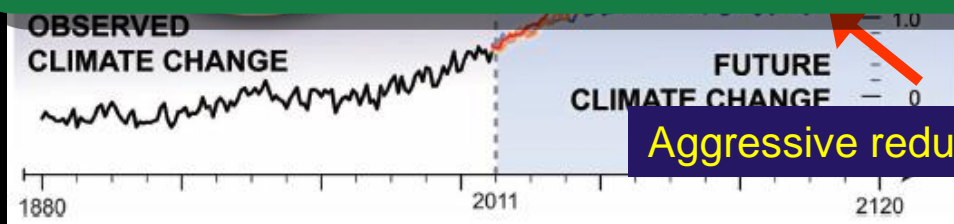
# 計算機の高性能化に伴い、直面しつつある課題 — 将来環境変化とデータ巨大化

地球表面温度 - 現在・将来

データの容量見積もり



**膨大なデータから  
サイエンスの知見をひきだす工夫が必要  
— 情報科学との連携**



地球表面  
全球平均温度

将来予測  
CCSM4による3シナリオ計算

# 謝辞



本発表での計算は、文部科学省の革新プロジェクトの支援のもとで行われ、数値実験は海洋研究開発機構/地球シミュレータセンターの地球シミュレータを用いた。

NICAMの開発、数値実験、解析においてご協力いただいたJAMSTEC、東京大学大気海洋研究所、理化学研究所のみなさまに感謝致します。

また、本スライドの多くは、海洋研究開発機構・大内和良主任研究員にご提供いただきました。

ご清聴ありがとうございました。