

# 地球惑星科学II

## 第8回

2020年11月19日

# 前回のミニレポートについて

- 海が全て凍ってしまったとする。太陽放射エネルギーを全部使ったとして氷となった海を全部融かすのに何年かかるか？

– 海洋の質量  $M$ :  $1.4 \times 10^{21}$  kg

– 氷の融解熱  $L$ :  $3.3 \times 10^5$  J/kg

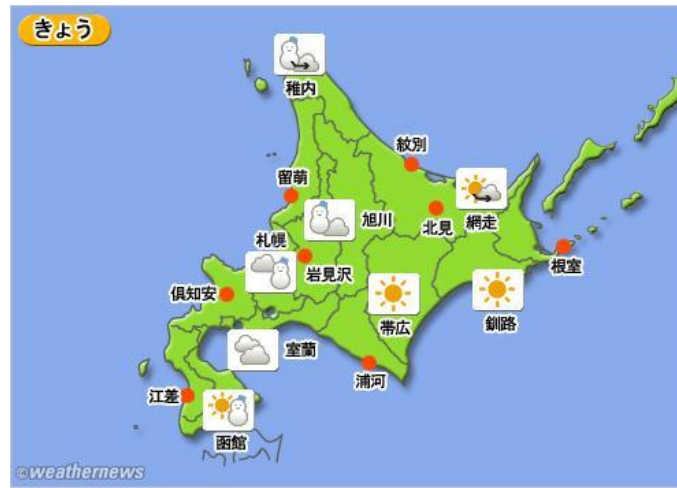
– 1秒あたりの太陽放射吸収量  $S$ :  $1.3 \times 10^{17}$  J/sec

$$T = \frac{M \times L}{S} = \frac{1.4 \times 10^{21} \times 3.3 \times 10^5}{1.3 \times 10^{17}}$$

$$= 3.6 \times 10^9 \text{秒} \sim 110 \text{年}$$

# 今日のテーマ

- 天気予報はどのように作られているのか？
- 数値予報とは？



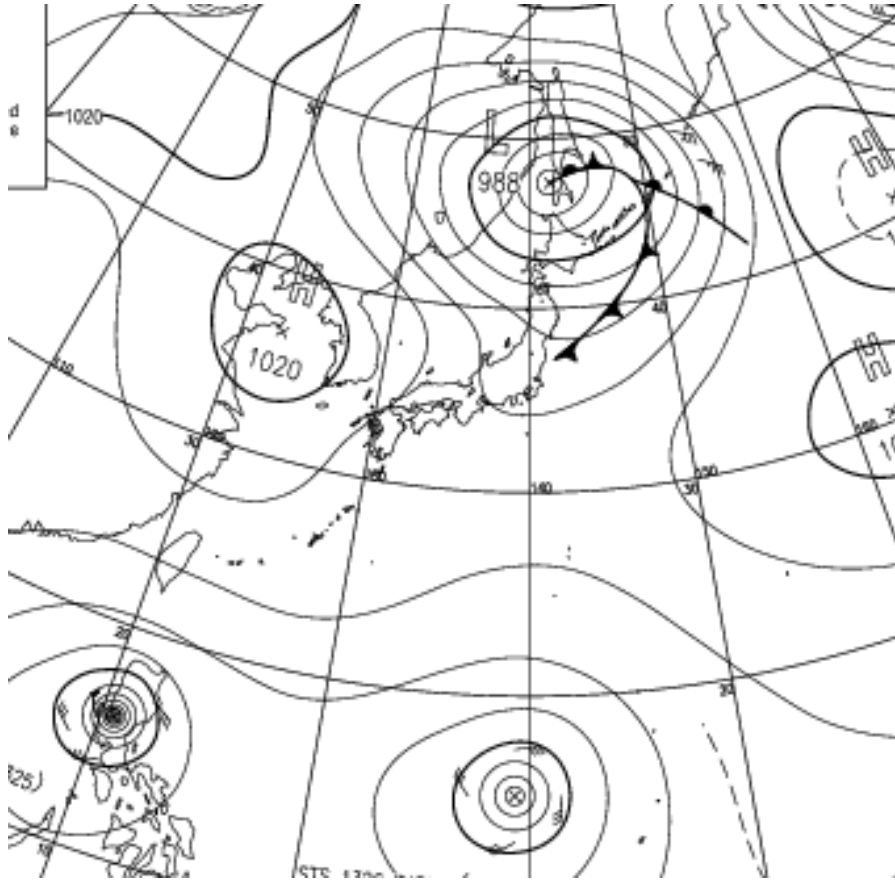
<http://www.asahi.com>

# 初回のミニレポートの回答

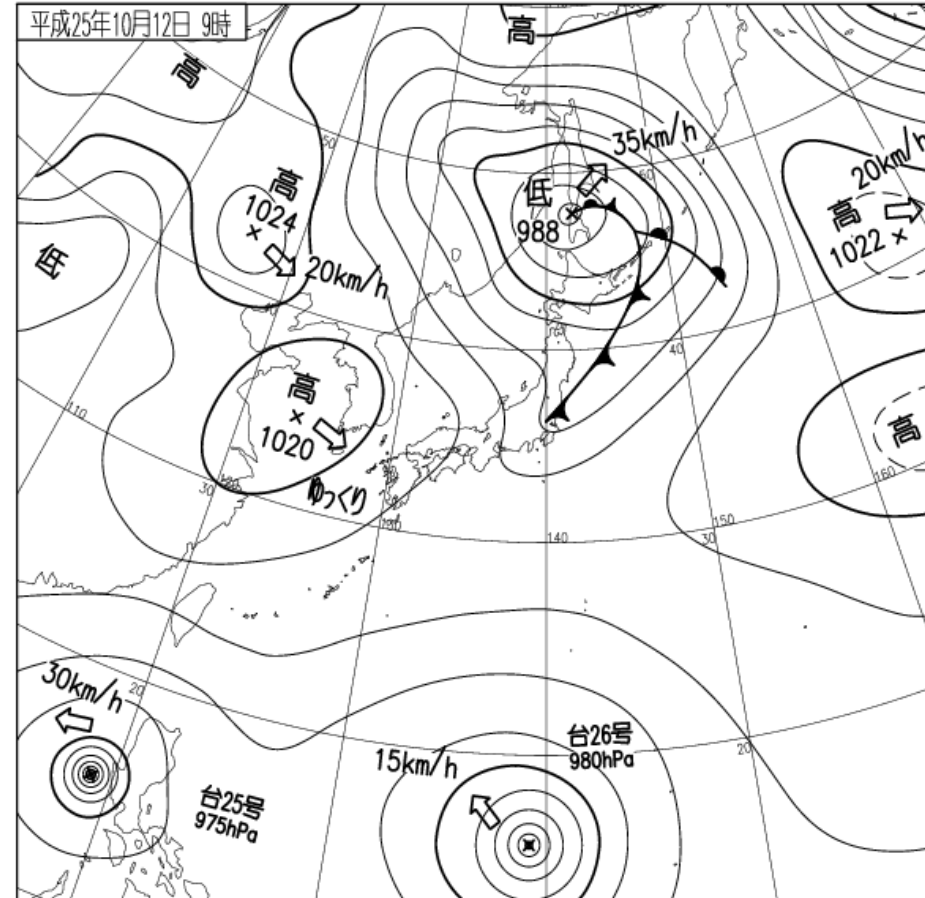
- ……中学の頃「気象予報は統計に基づいているため、あくまで過去の動きに準えただけ」という話を聞き……
- 昔は過去の統計に基づく天気予報が中心だった。しかし、皆さんが中学生の時には既に数値予報を中心とした天気予報が出されている！
- ただし、天気予報は数値予報のみではない。過去の統計も考慮に入れ総合的な判断がなされている。

# 天気予報の1例

## 予報天気図



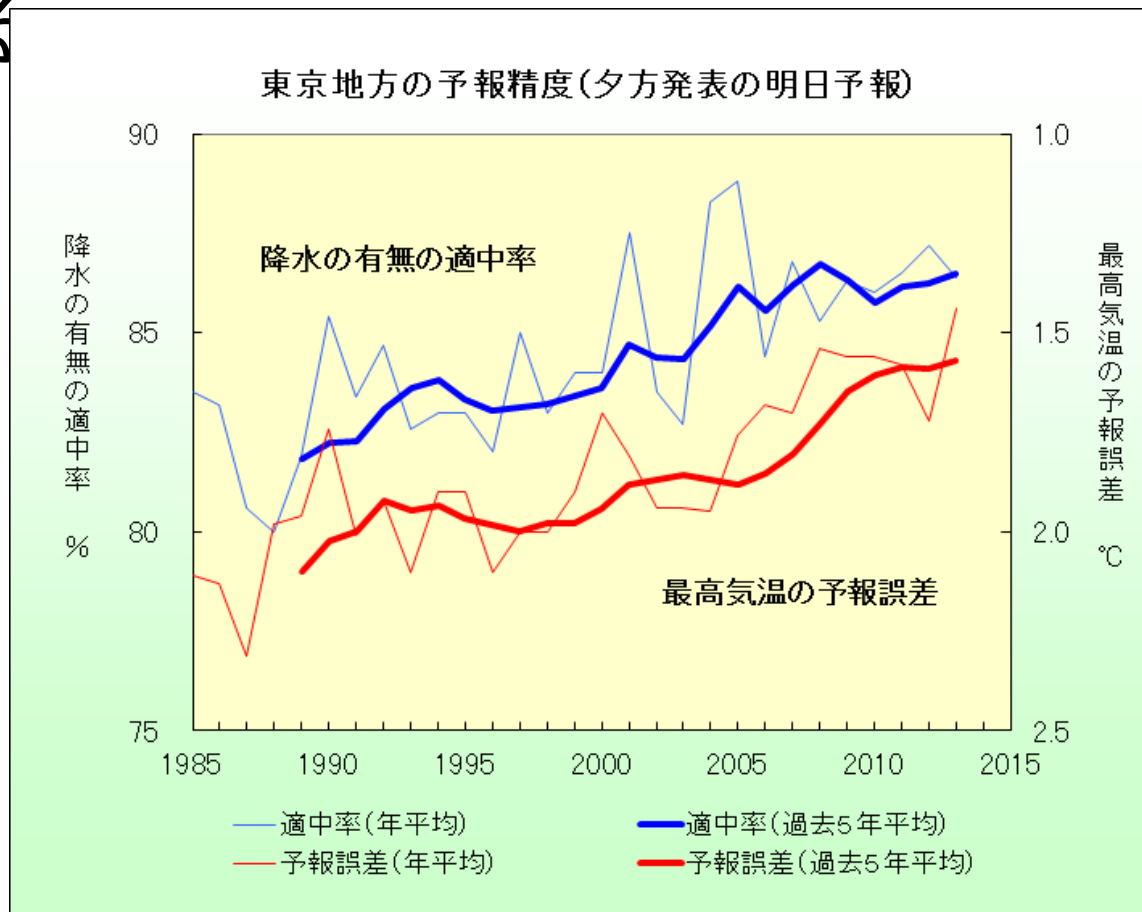
## 実況天気図



気象庁ホームページ(<http://www.jma.go.jp/jp/g3/wc24h.html>)

# 予報の精度

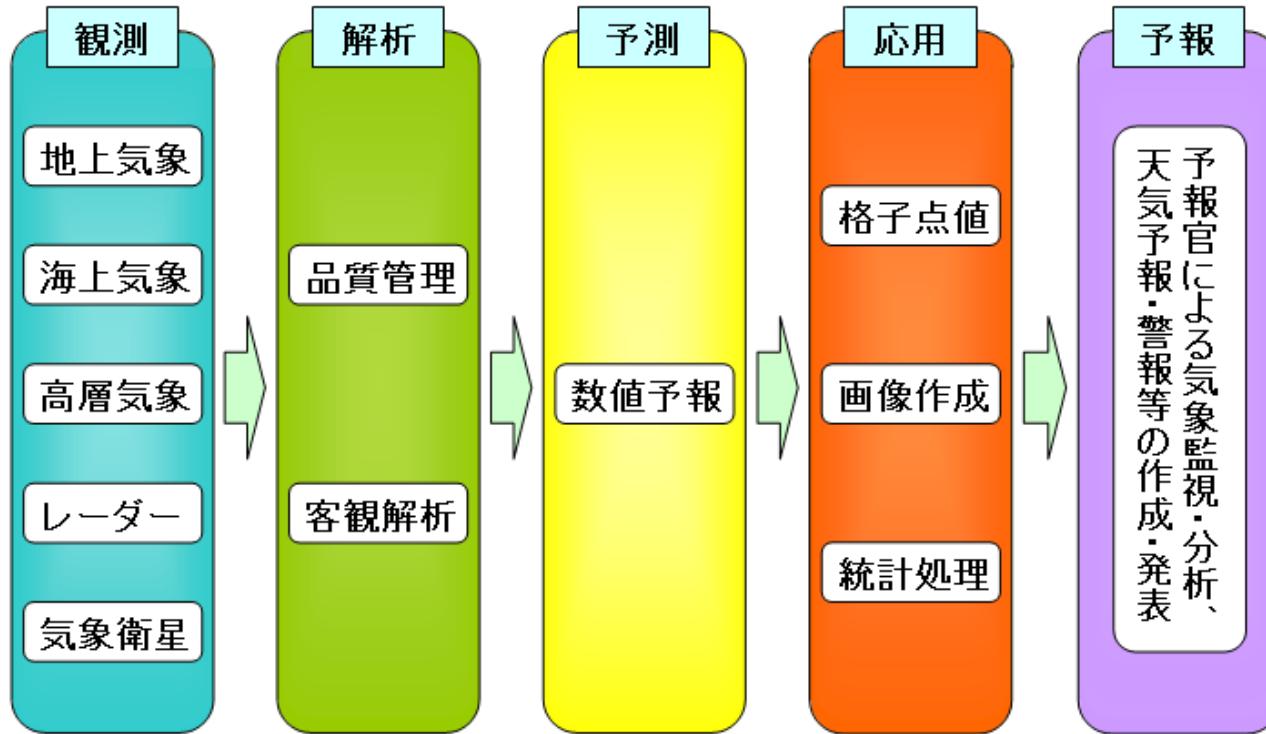
- 精度は年々向上。短期予報はかなり良くあたっている



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

# 天気予報の手順

- 複数段階の作業がある



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

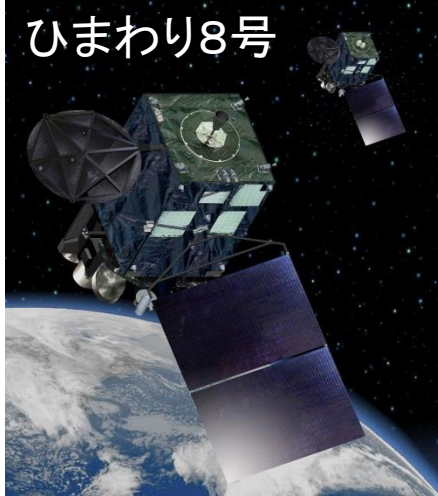


<http://www.asahi.com>

# 気象観測

## 気象観測衛星

ひまわり8号



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

## 地上観測網

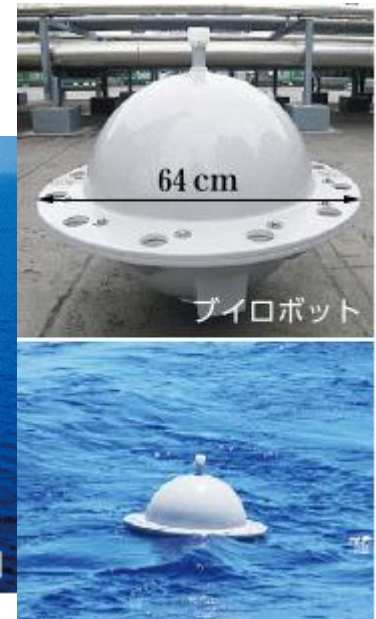


## 気象レーダー



地学図表P.175

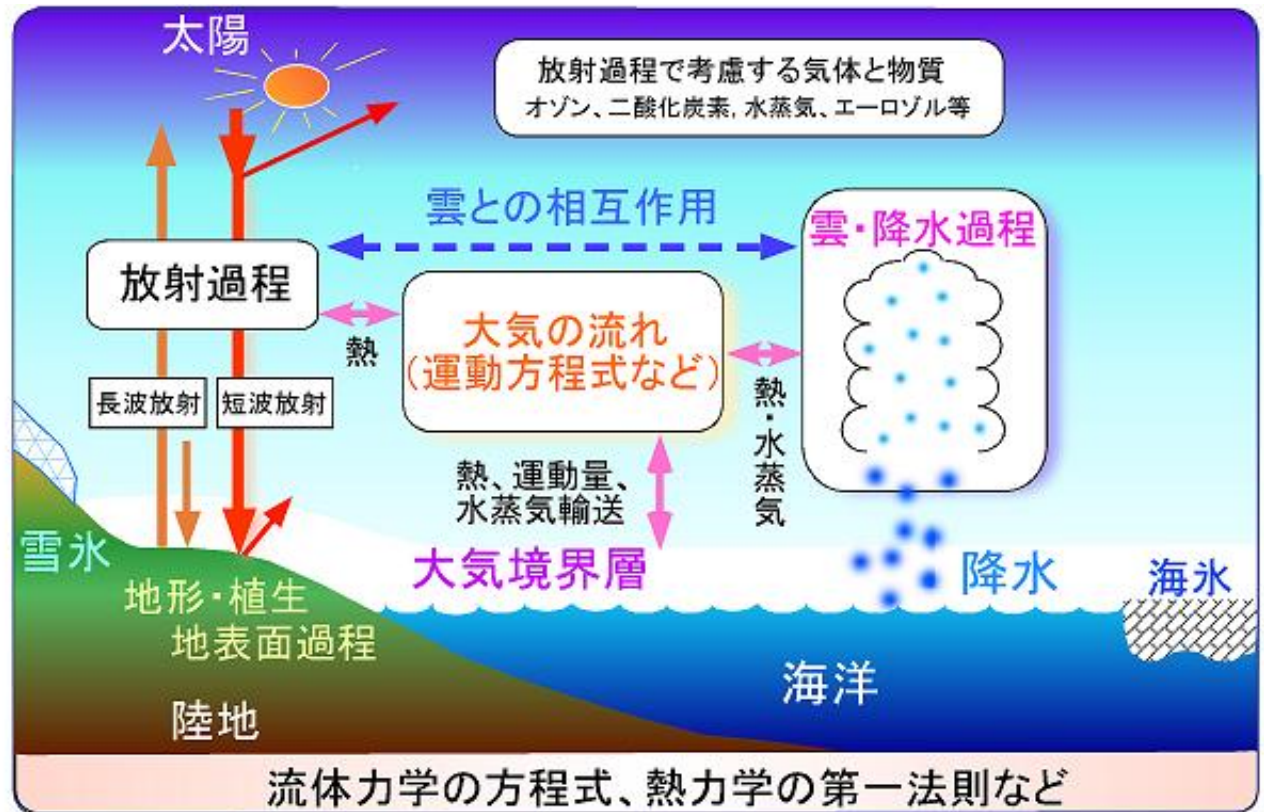
## 海洋観測





# 数値予報

- 複数過程を考慮して計算機で大気状態を求める
- 気象庁では、局地モデル、メソモデル、全球モデル(大気大循環モデル)などを用いた複数の数値予報を実施



# 基礎方程式

運動方程式

$$\frac{du}{dt} - \left( f + \frac{u \tan \varphi}{a} \right) v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{a \cos \varphi \partial \lambda} + F_{\lambda}$$
$$\frac{dv}{dt} + \left( f + \frac{u \tan \varphi}{a} \right) u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{a \partial \varphi} + F_{\varphi}$$

静水圧の式

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

質量保存則

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

熱力学第1法則

$$C_v \frac{dT}{dt} - \frac{p}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt} = Q$$

水蒸気の式

$$\frac{dq}{dt} = S$$

状態方程式

$$p = \rho RT$$

# 数値計算の原理

- 求めるものは温度・風速等の空間分布・時間変化
- そのためには、微分方程式を解く

$$\frac{du}{dt} = \dots \xrightarrow{\text{tで積分}} u(x, y, z, t)$$

- 微分法方程式はどのように解くか？

－ 例題

$$\frac{du}{dt} = -au^2$$

手計算で解く場合

$$\int_{u_0}^u \frac{1}{-au^2} du = \int_0^t dt$$

$$\left[ \frac{1}{au} \right]_{u_0}^u = [t]_0^t$$

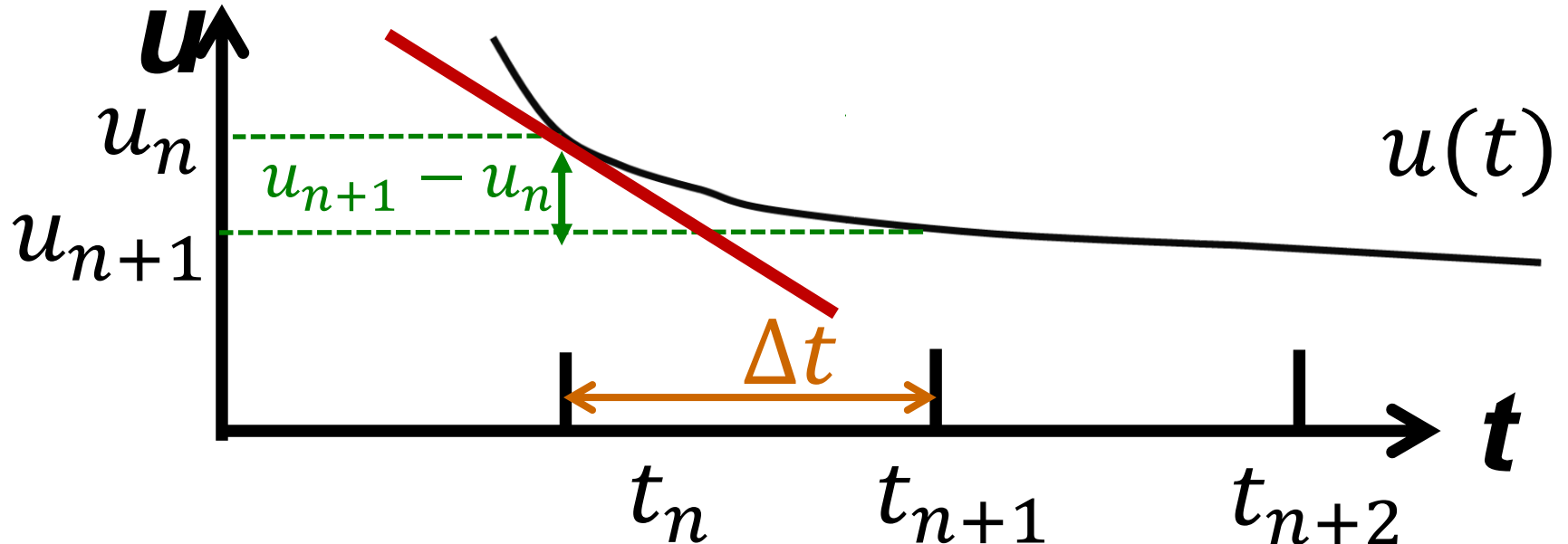
$$\frac{1}{au} - \frac{1}{au_0} = t$$

$$u = \frac{u_0}{1 + au_0 t}$$

# 計算機における時間積分

- 離散的な時刻のみを考える(差分化)
- 各時刻における時間変化率の値を使った「外挿」の繰り返し計算
- 具体例

$$\frac{du}{dt} = -au^2 \quad \longrightarrow \quad \frac{u_{n+1} - u_n}{\Delta t} = -a(u_n)^2$$



# 今日の計算問題

- 差分式を用いた計算

– 解く式は

$$\frac{u_{n+1} - u_n}{\Delta t} = -a(u_n)^2, \quad a = 1.0$$

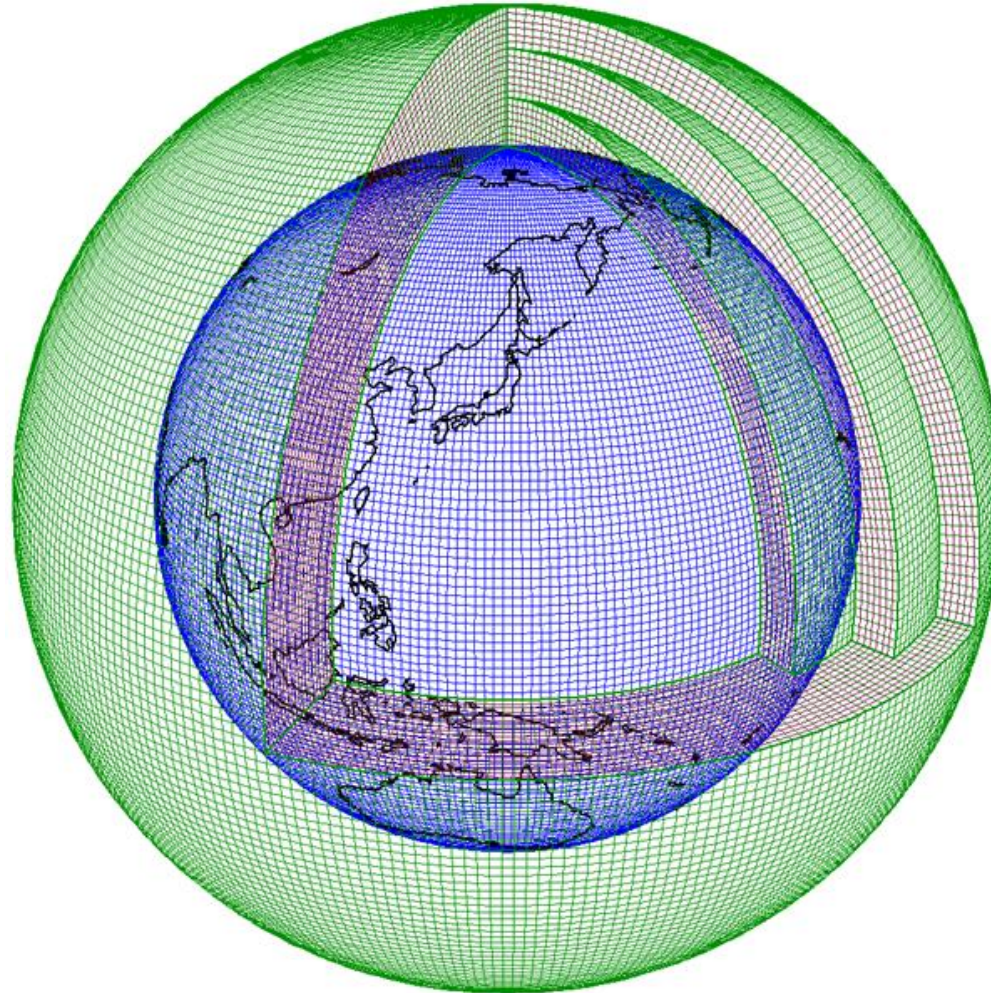
– 次の場合で、 $t = 0.2$ までの $u$ の時間変化を求めよ

$$\Delta t = 0.1, \quad u_0 = 1.0$$

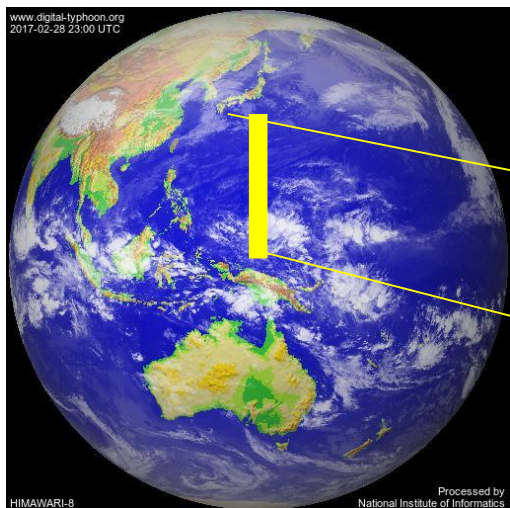
- ここでは正確な数値を計算してください

# 空間差分化

- 球殻領域を格子点で覆う



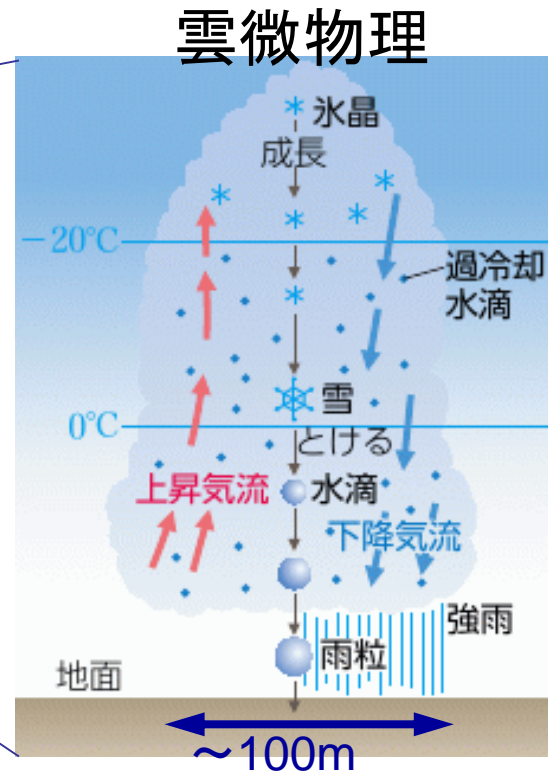
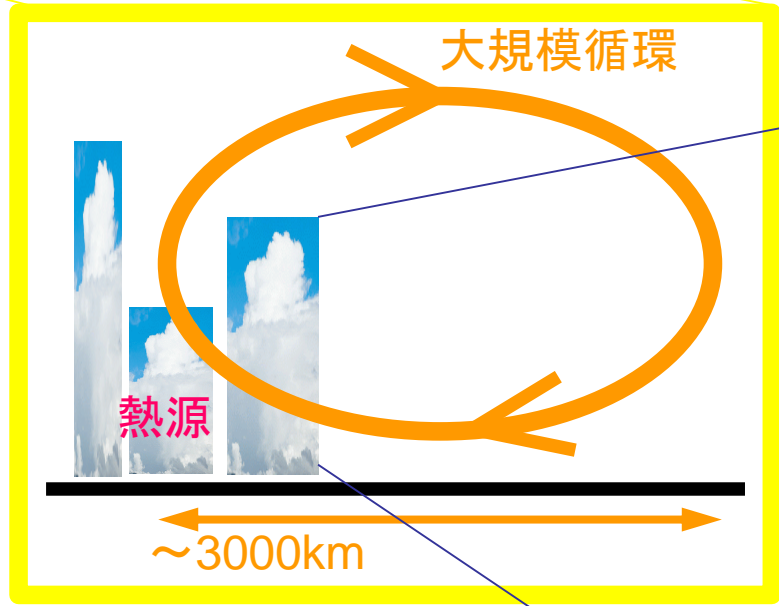
# 小スケール過程の例：雲過程



<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/>

$$C_v \frac{dT}{dt} - \frac{p}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt} = Q$$

温度変化 熱源



- 非常に小さなスケールの雲過程が大規模循環に影響

地学図表p.173

# パラメタリゼーション

- 個々の雲のスケールは格子点間隔より小さい
  - 個々の雲は直接モデルで表現できない
- そこで雲の効果を格子点値のみで表現する
  - 理論や観測結果を駆使する

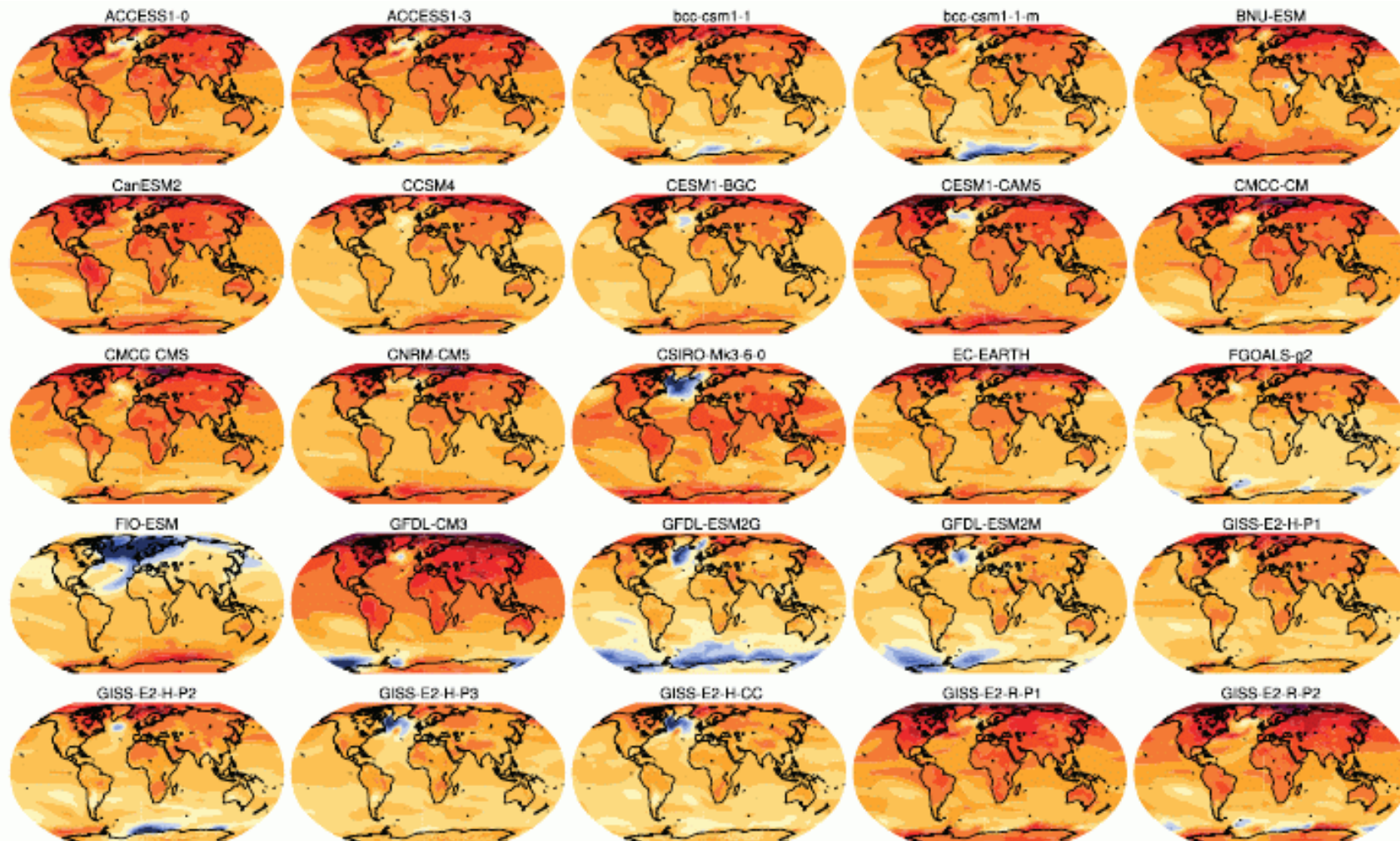




# 大気大循環モデルの不確定性の例(1)

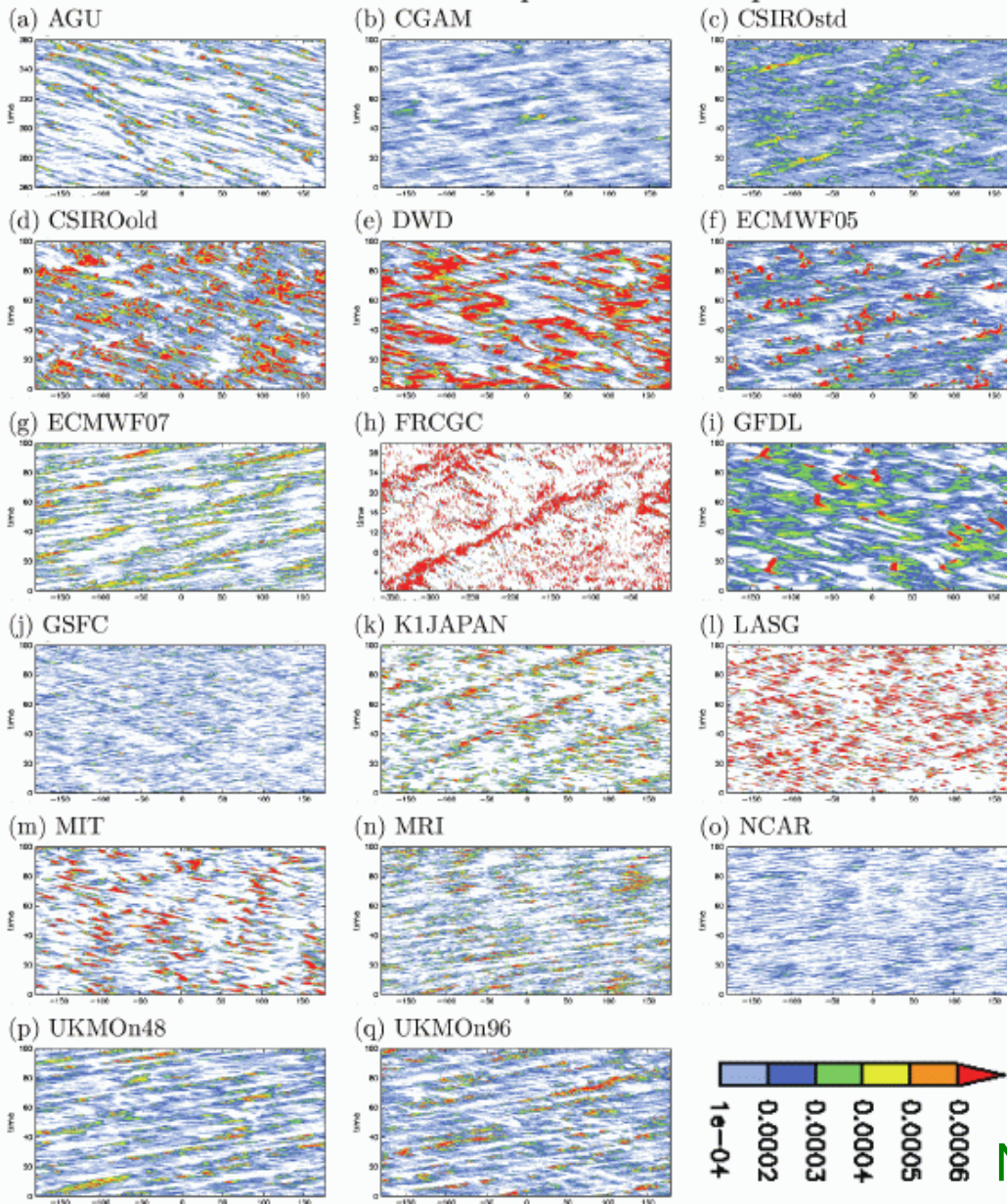
温暖化予測実験: 年平均気温の変化量  
RCP4.5 2081-2100

IPCC(2013)



# 大気大循環モデルの不確定性の例(2)

↑  
Oday



- 表面全部海の場合
- 赤道上の降水の時間変化

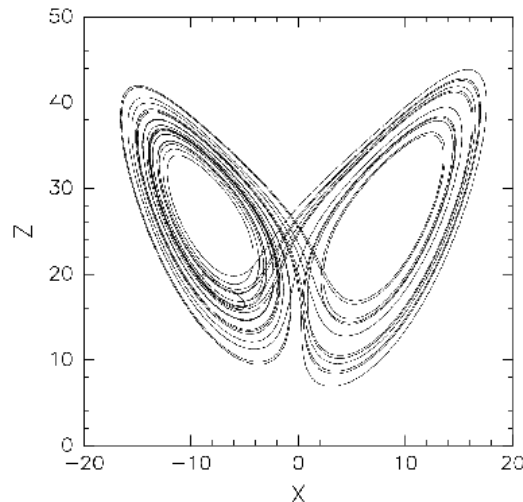


Nakajima et al. (2013)

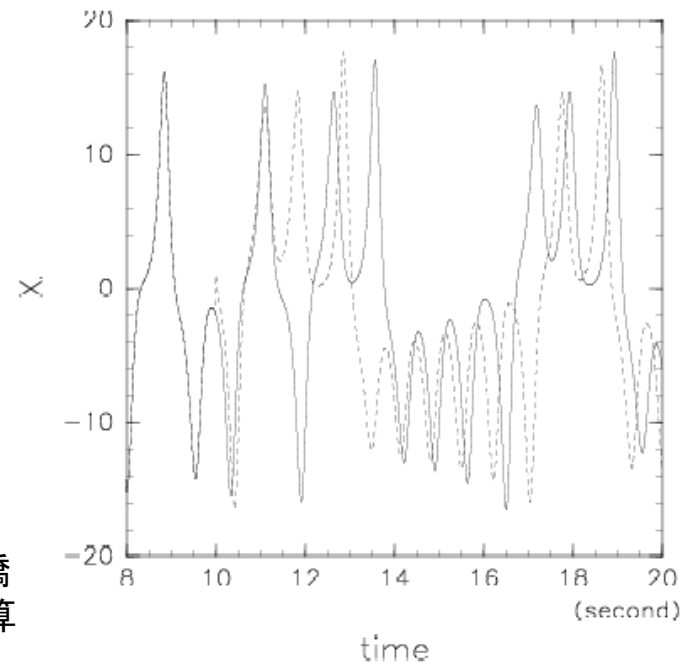
# 長期天気予報は原理的に不可能

- 流体系では「カオス」が発生
  - 初期値におけるわずかなズレが大きく成長
  - 例：ローレンツカオス

$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= \sigma(Y - X), \\ \frac{dY}{dt} &= rX - Y - XZ, \\ \frac{dZ}{dt} &= XY - bZ\end{aligned}$$



宇宙理学専攻・村橋  
究理基君による計算



- 数値予報は2週間程度までと言われている  
(温暖化実験は平均的状态を求めるもの)