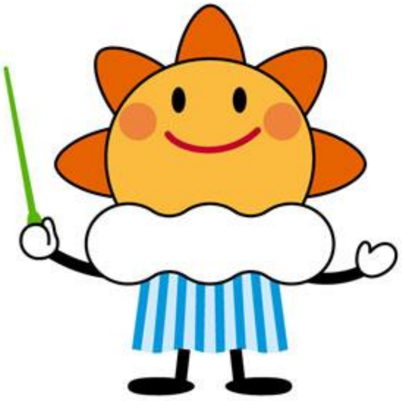
地球惑星科学II
第8回

2021年12月02日

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？

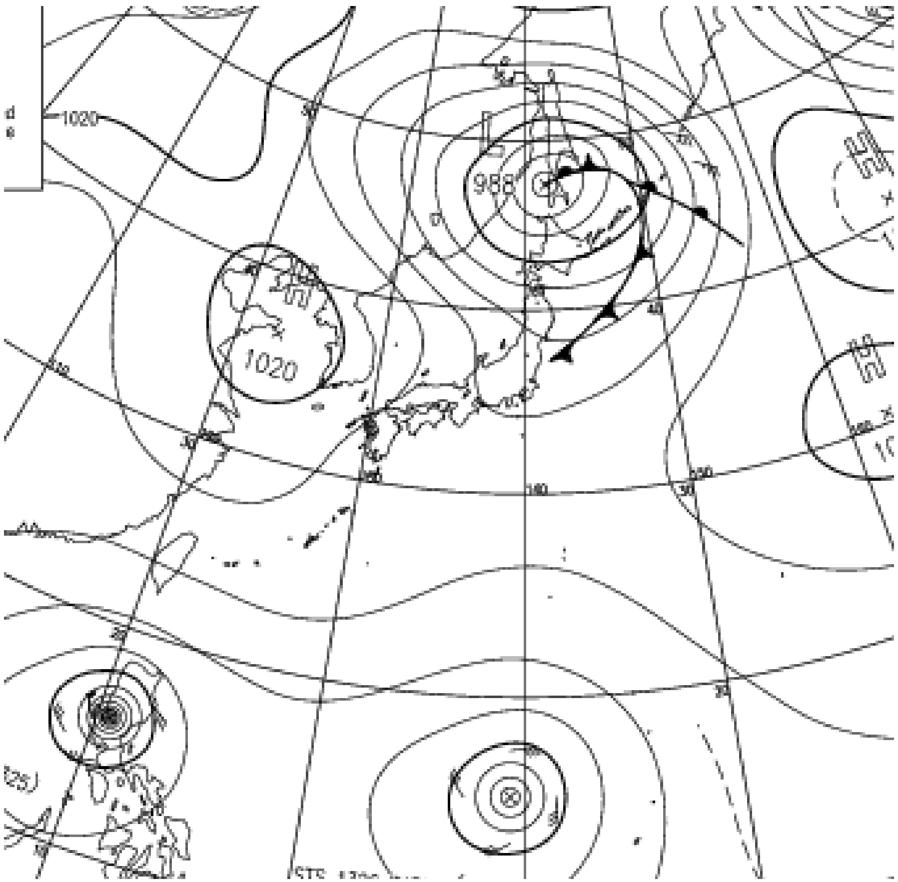
http://www.asahi.com



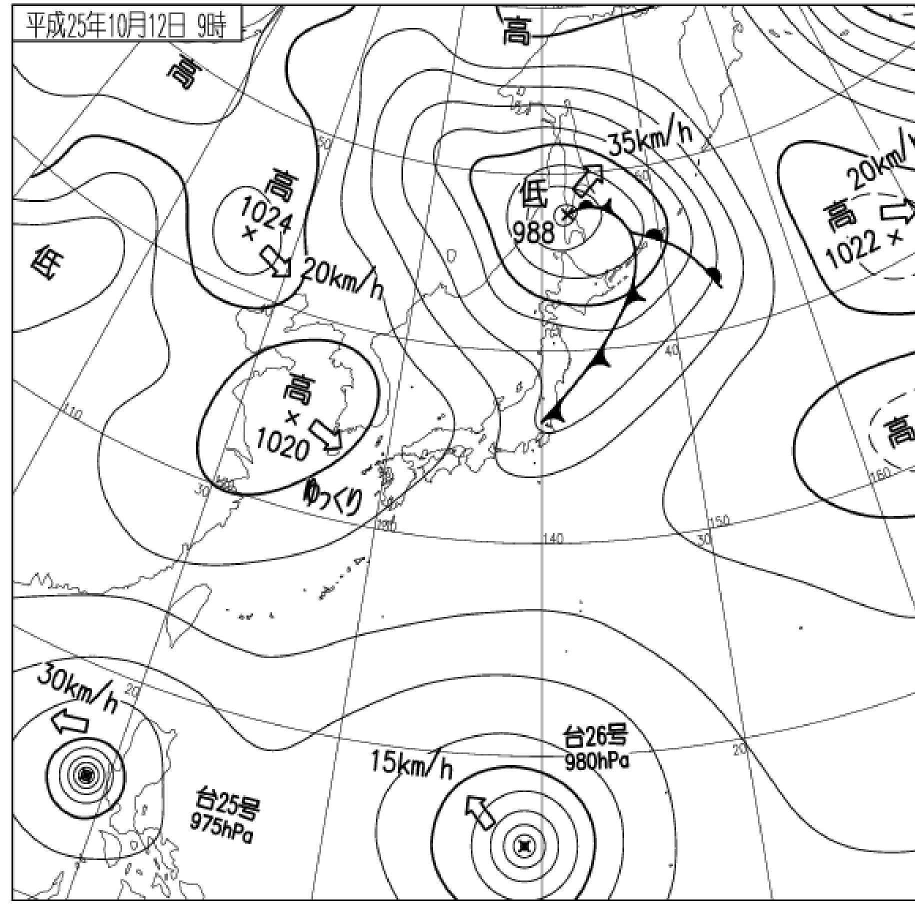
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/harerun.html

天気予報の1例

予報天気図



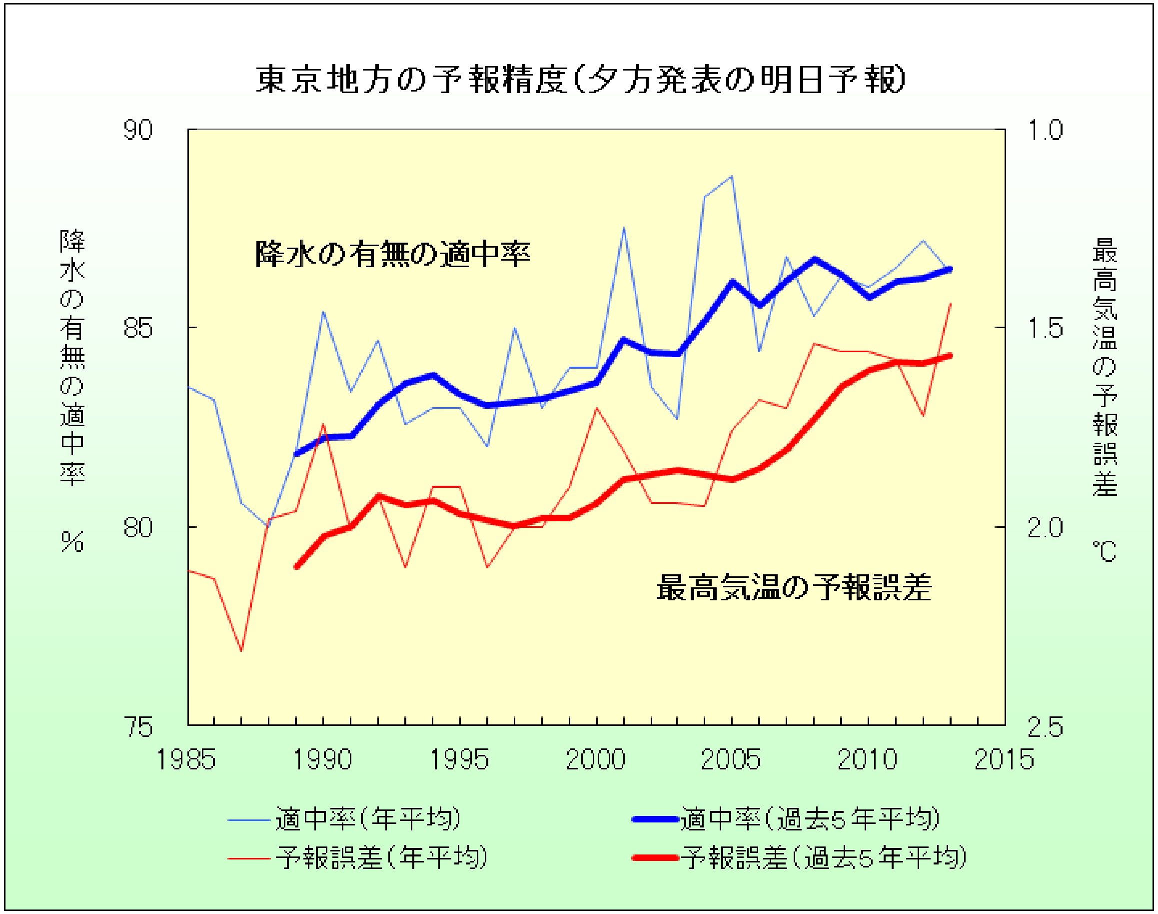
実況天気図



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

予報の精度

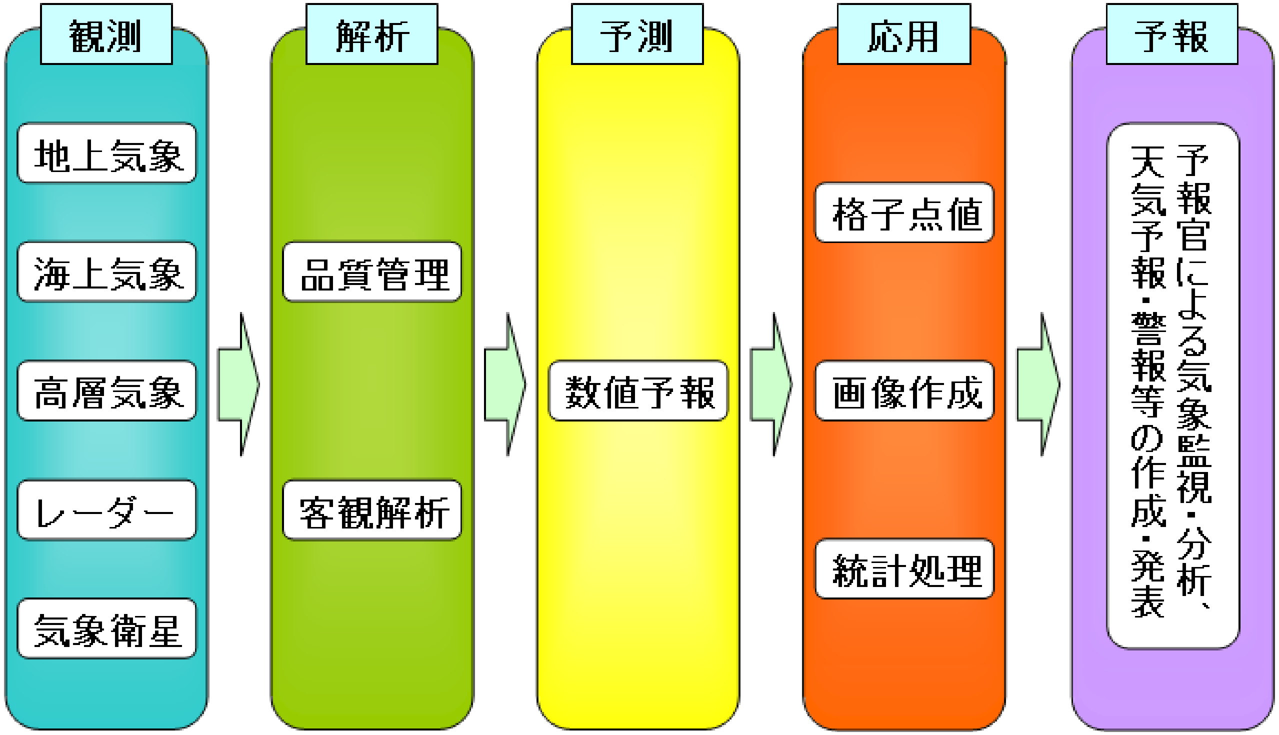
- 精度は年々向上。短期予報はかなり良くあたっている



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

天気予報の手順

- 複数段階の作業がある

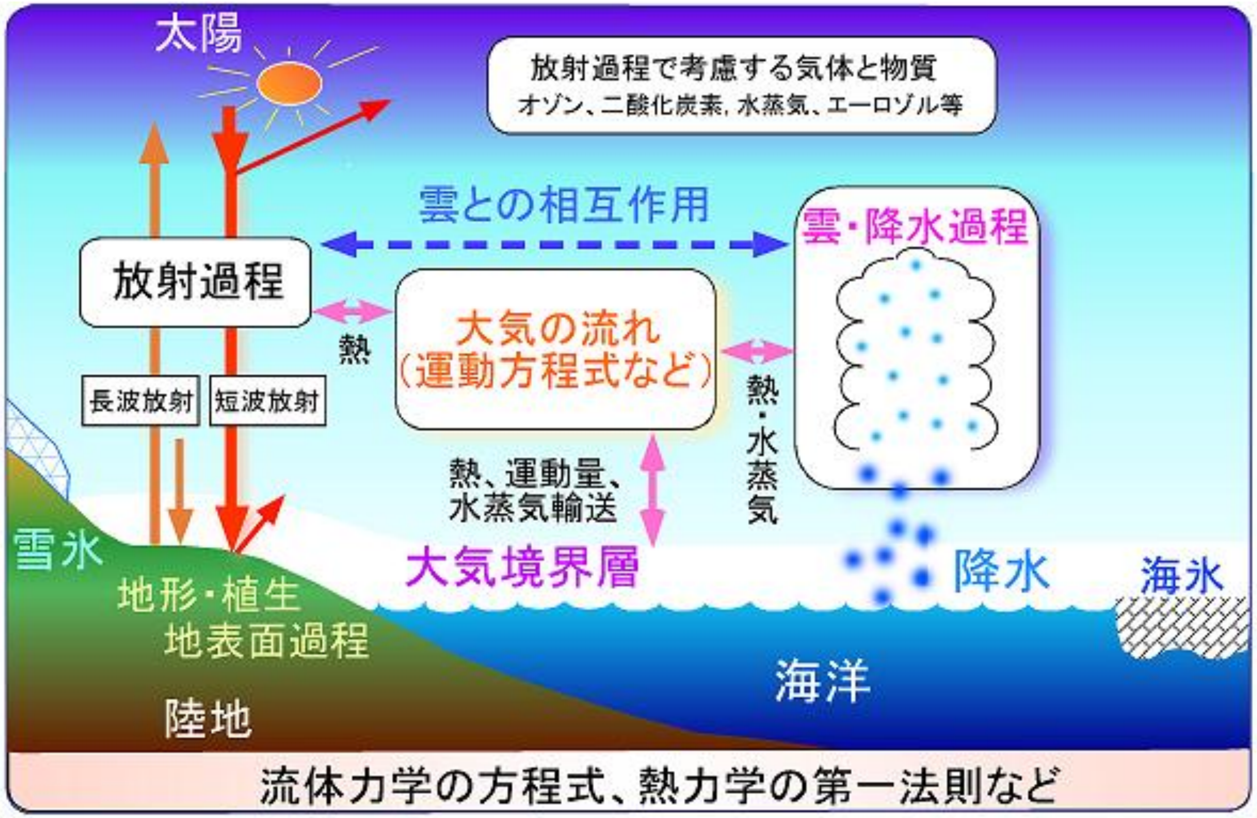


http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/whitep/1-3-1.html

http://www.asahi.com

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



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

基礎方程式

運動方程式

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

$$\frac{dv}{dt} + \left(f + \frac{u\tan\varphi}{a}\right)u = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{a\partial\varphi} + \boldsymbol{F}_{\varphi}$$

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

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

水蒸気の式

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

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

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

- 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

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

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

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

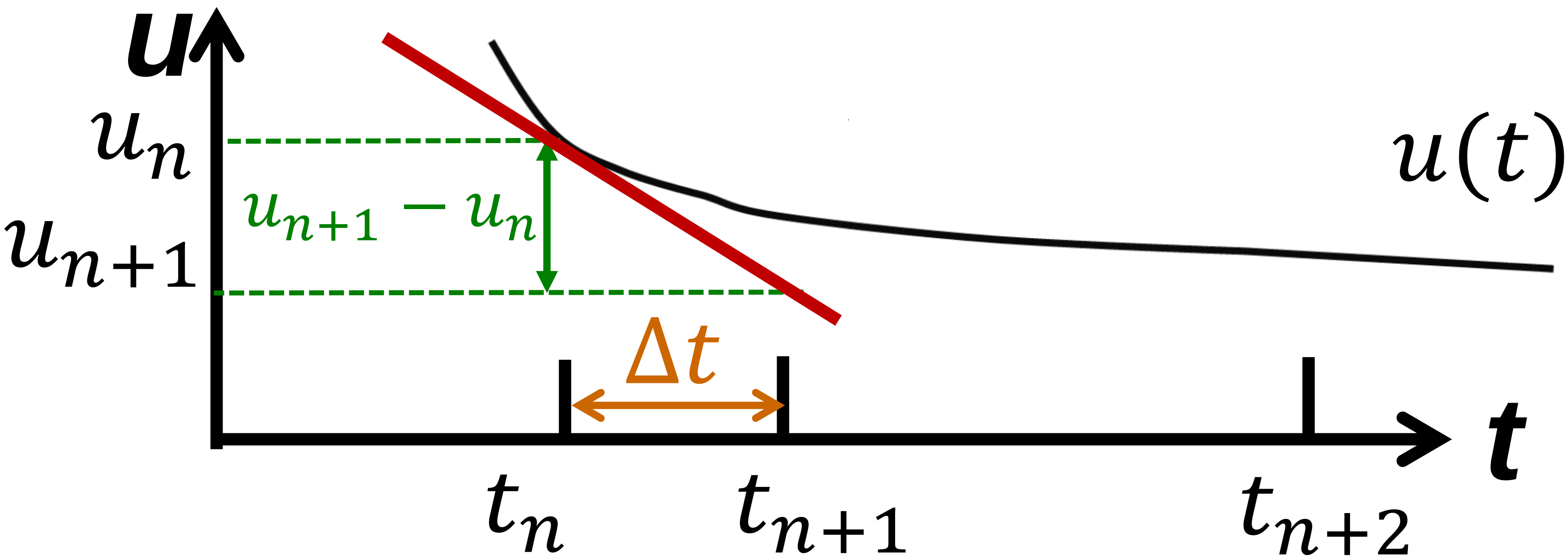
$$u = \frac{u_0}{1 + au_0 t}$$

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

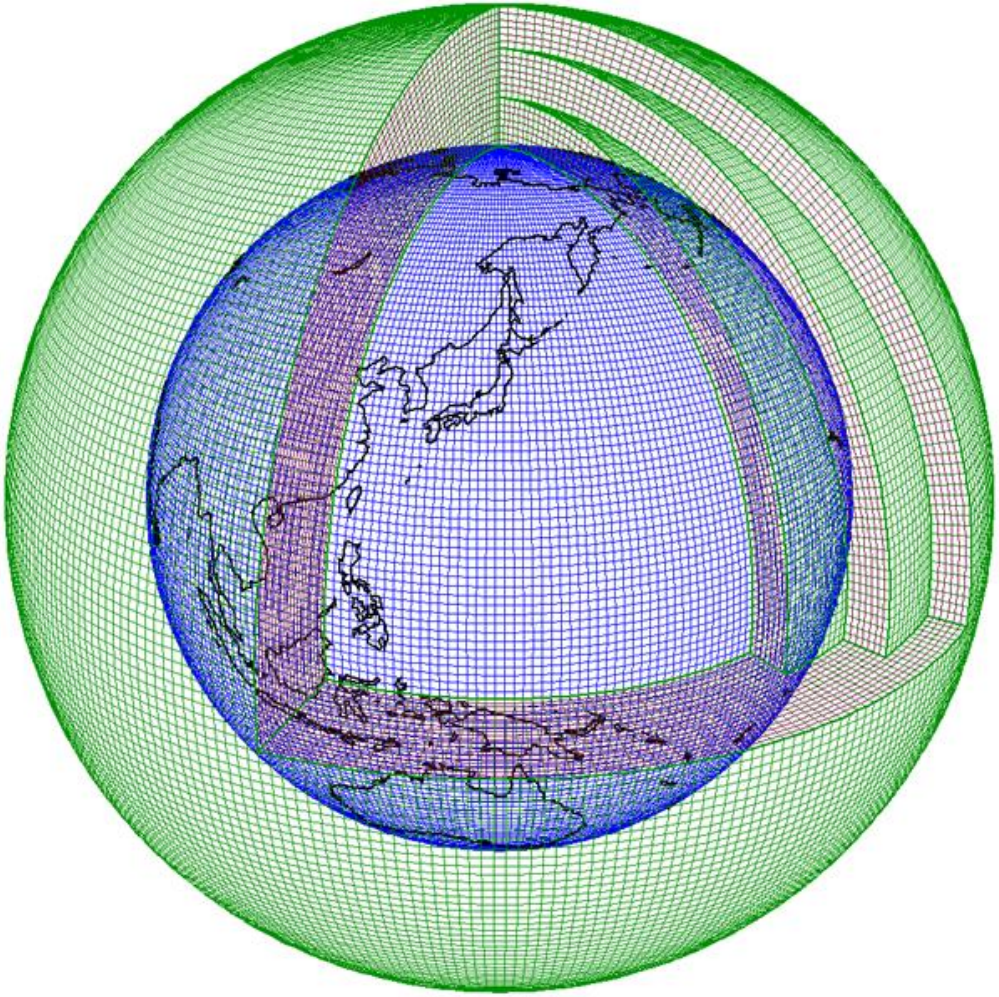
傾きは-au²

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



空間差分化

- **球殻領域を格子点で覆う**

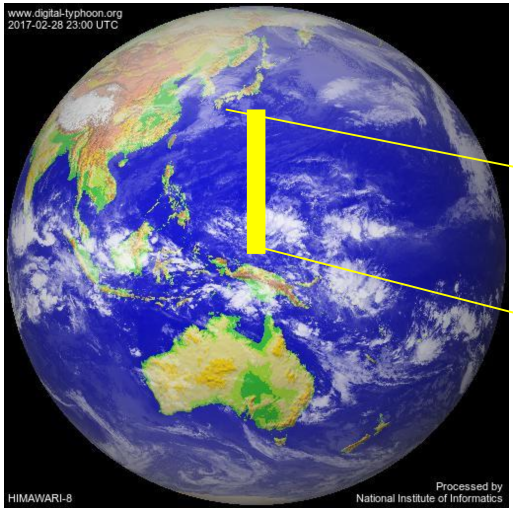


http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/whitep/1-3-1.html

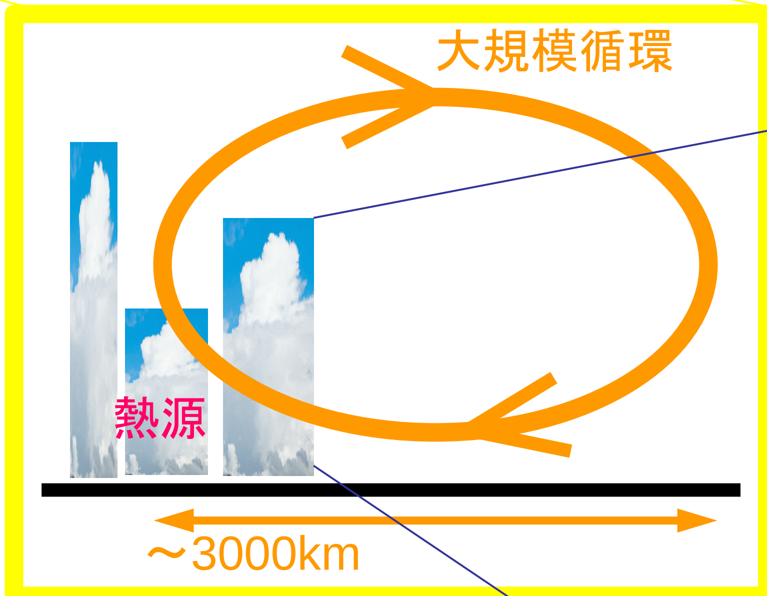
小スケール過程の例：雲過程

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

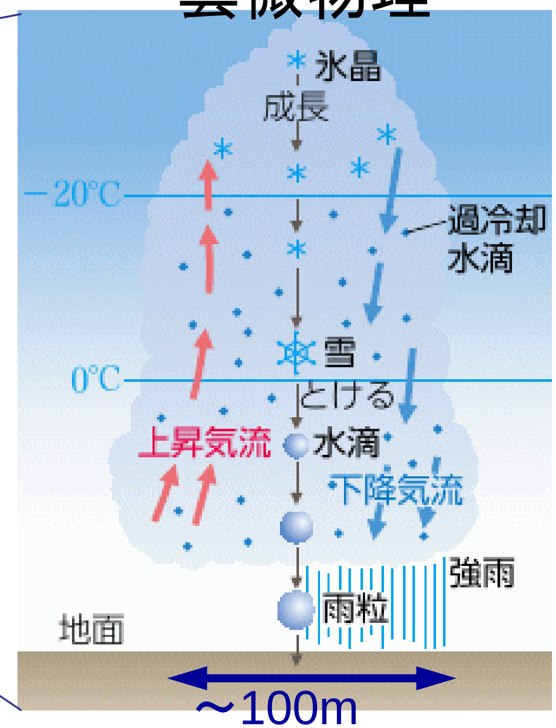
温度変化　　　　　熱源



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



雲微物理



地学図表p.173

- 非常に小さなスケールの雲過程が大規模循環に影響

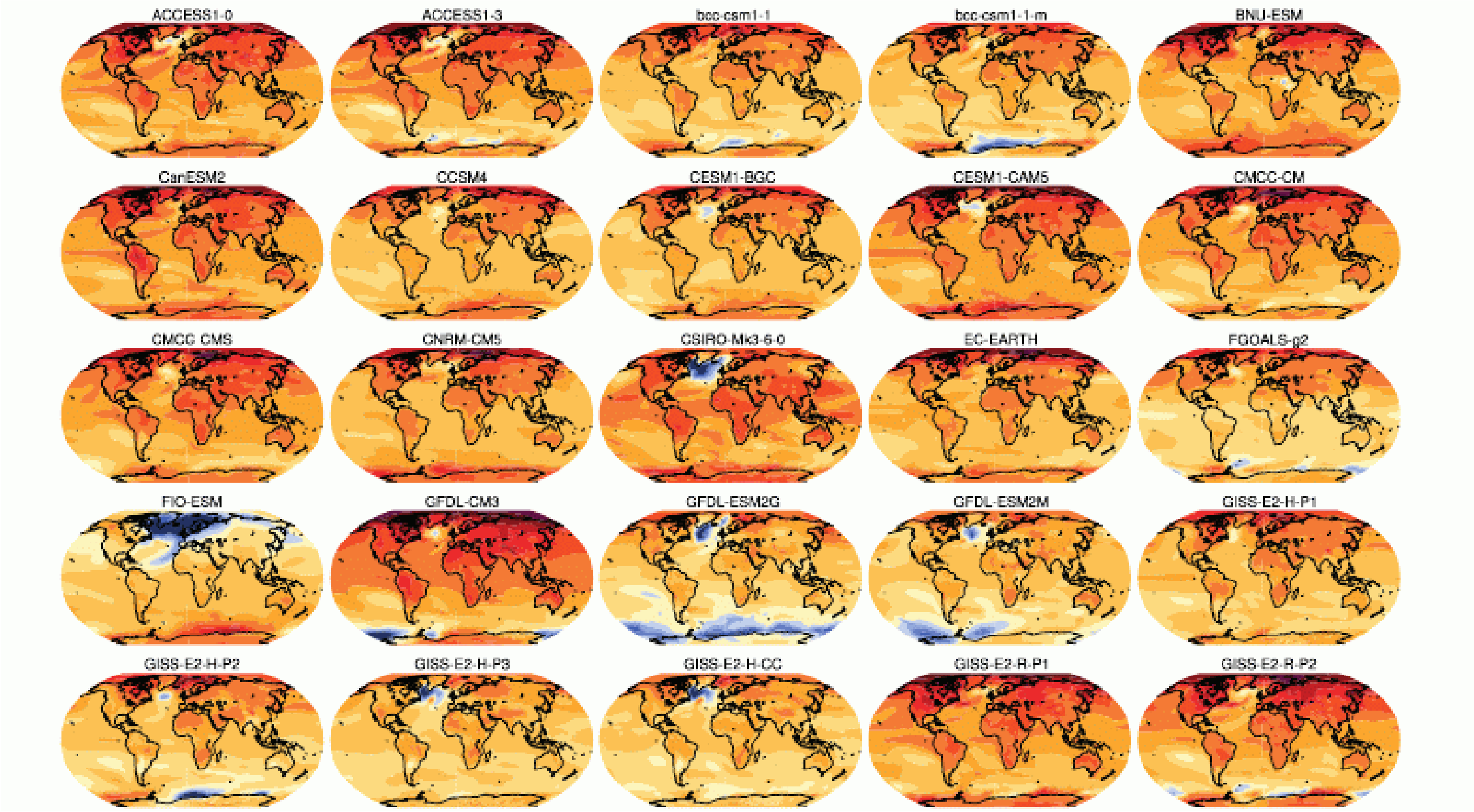
パラメタリゼーション

- 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)

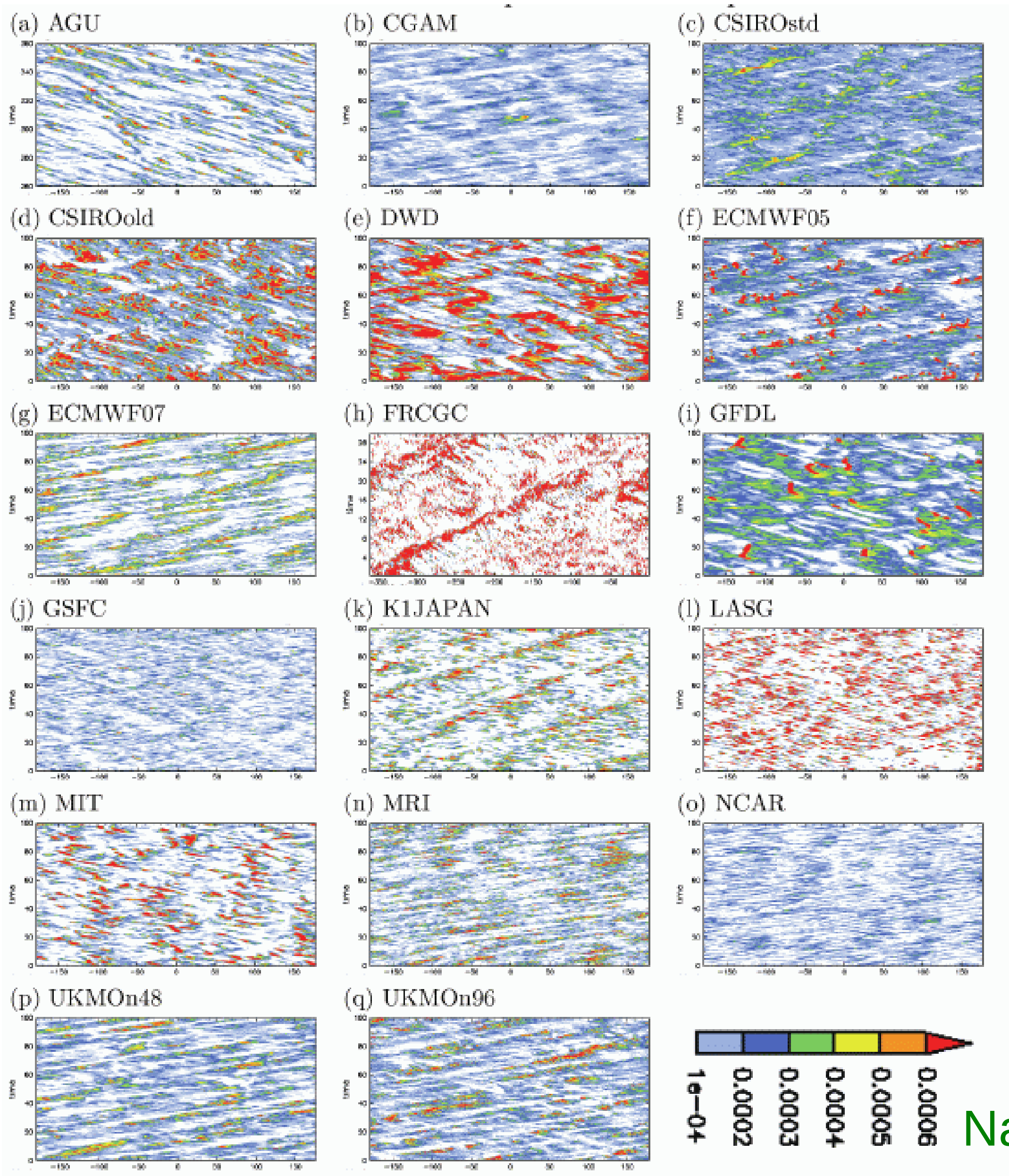
温暖化予測実験:年平均気温の変化量
RCP4.5 2081-2100

IPCC(2013)



大気大循環モデルの不確定性の例(2)

0day



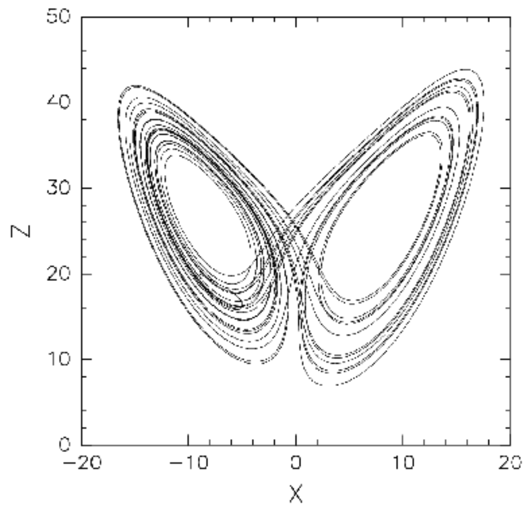
- 表面全部海の場合
- 赤道上の降水の時間変化

Nakajima et al. (2013)

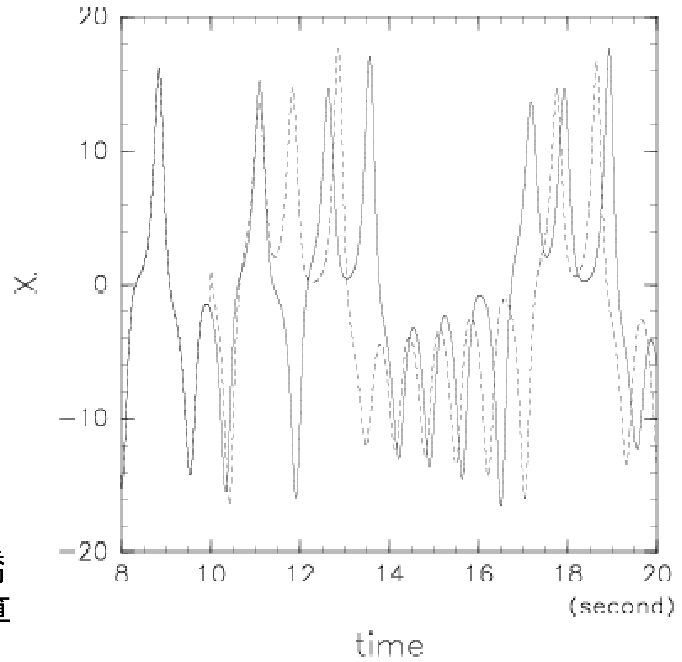
長期天気予報は原理的に不可能

- 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

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



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態を求めるもの）