

数値予報モデルと粒子フィルタ

上野 玄太 モデリング研究系 教授

【非静力学モデル (JMANHM)】

変数 圧力 p , 密度 ρ , 温度 T , 風速 $(u \ v \ w)'$

$$\begin{aligned} \text{運動方程式 (3成分)} \quad \frac{du}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u \\ \frac{dv}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v \\ \frac{dw}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu \nabla^2 w \end{aligned}$$

連続の式 $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0$

状態方程式 $p = \rho RT$

熱力学の式 $\frac{d\theta}{dt} = \frac{Q}{C_p \pi} + \kappa \nabla^2 \theta$

補助変数

$$\pi \equiv \left(\frac{p}{p_0} \right)^{R/C_p}$$

$$\theta \equiv \frac{T}{\pi}$$

【観測誤差共分散行列 R_t の最適化による粒子フィルタの改良】

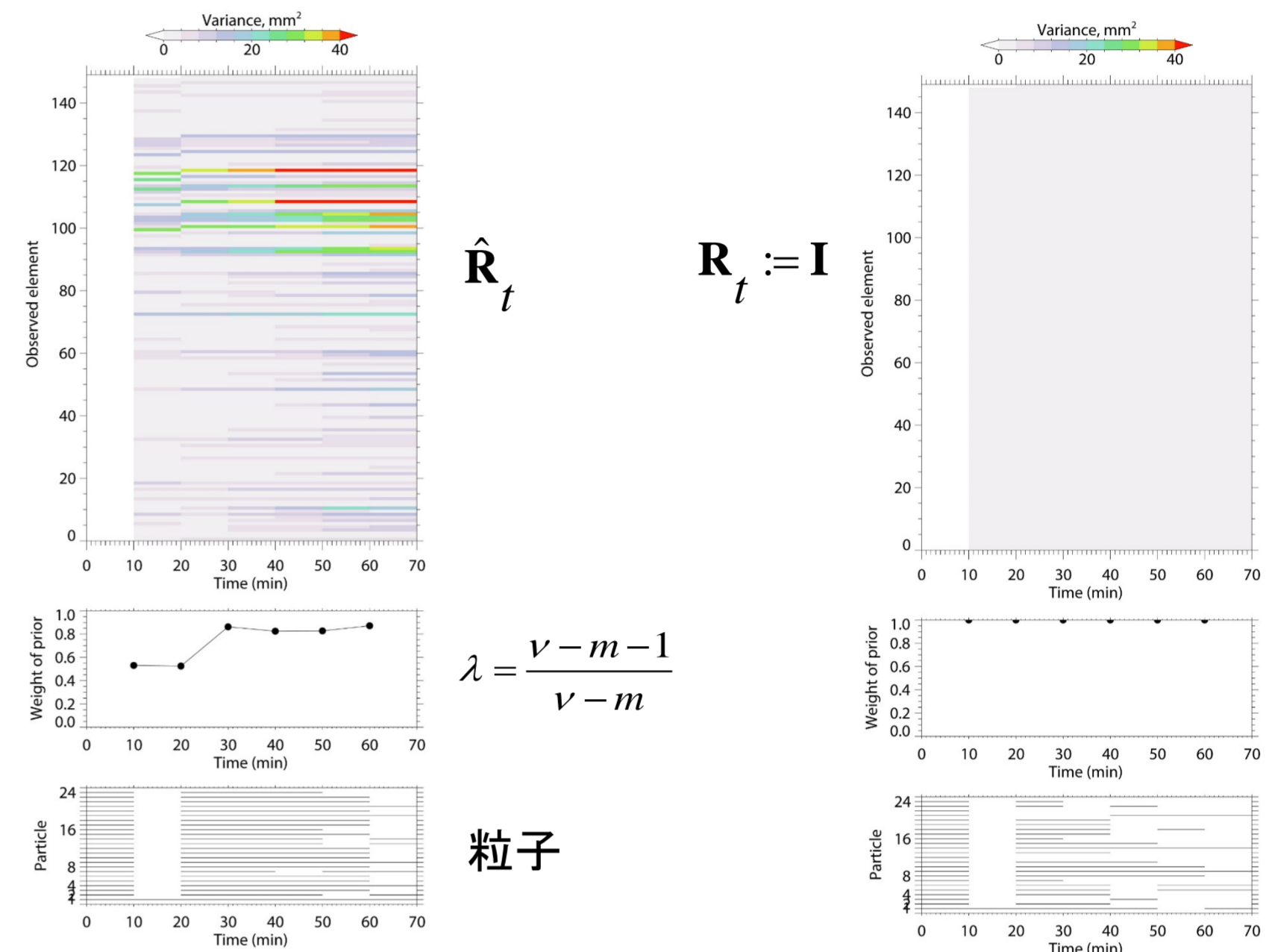
- 粒子フィルタ → 各粒子に重み → リサンプリング
- 重みは粒子の尤度に比例

$$p\left(y_t \mid x_{t|t-1}^{(n)}, R_t\right) \propto \exp\left[-\frac{1}{2}\left(y_t - h_t\left(x_{t|t-1}^{(n)}\right)\right)' R_t^{-1}\left(y_t - h_t\left(x_{t|t-1}^{(n)}\right)\right)\right]$$

- 重みは R_t を含む
- R_t が小さい → 重みが1粒子に集中 → 退化
- R_t が大きい → 重みが均等 → フィルタ効果なし
- R_t が適切 → 適切なフィルタリングが可能

【データ同化の特徴】

- 変数が多い x_t の次元: $10^5 \sim 10^8$ y_t の次元: $10^3 \sim 10^7$
- 計算アルゴリズム
 - 推定誤差は求めない → アジョイント法 (4D-Var)
 - みなしガウス分布 → アンサンブルカルマンフィルタ
 - やはり非ガウス分布 → 粒子フィルタの改良 (の研究)
- 状態遷移 (物理モデル) は所与、当面固定



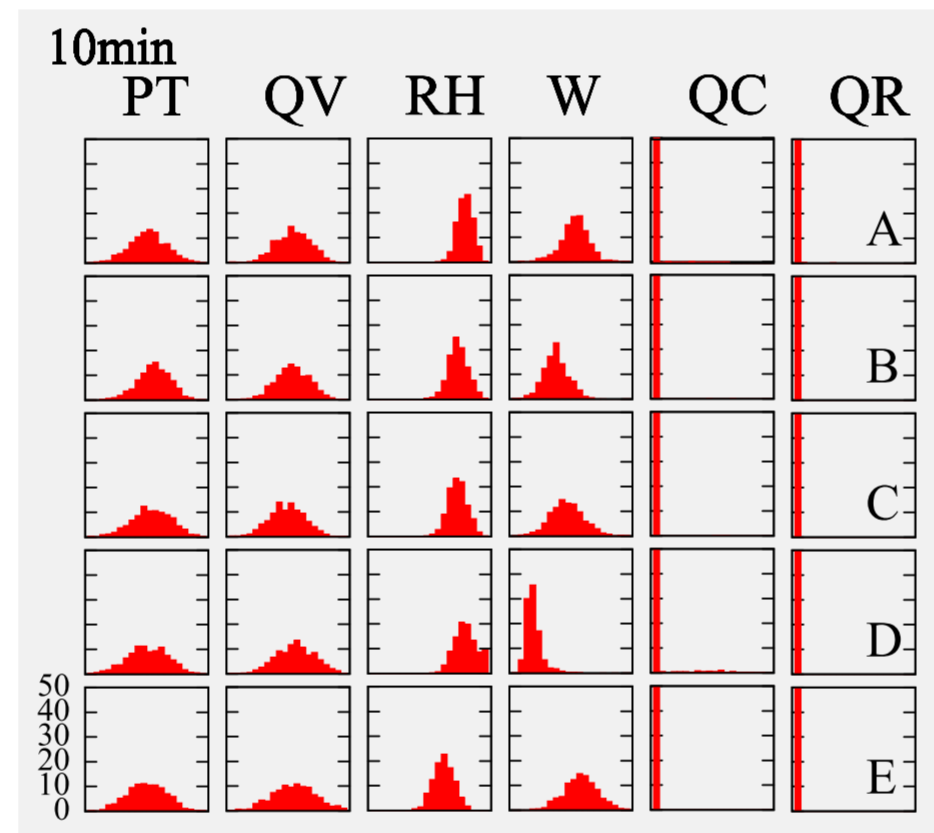
計算例

- $N = 24$ メンバー (2km格子、関東地方水平151x151分割)
- GNSS可降水量 (149点) を10分ごとに同化

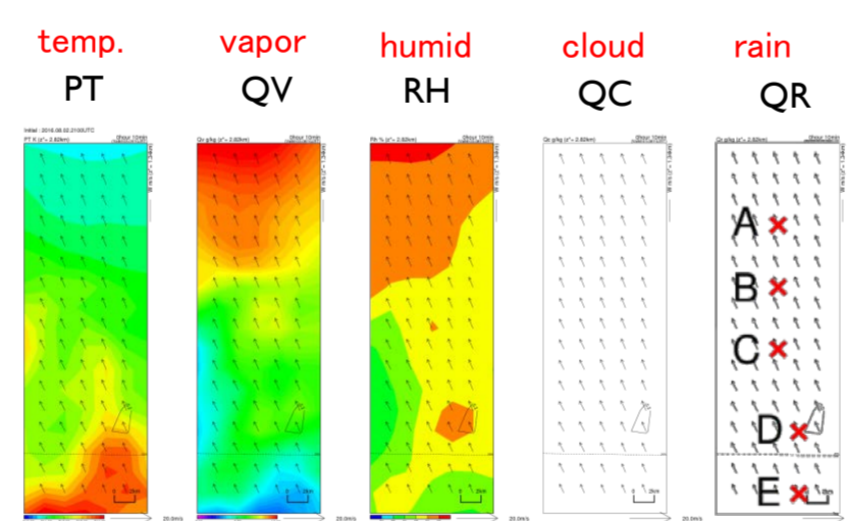
【同化実験】

- $N = 1,000$ メンバー
- 2km格子、関東北部48x48x50分割
- 人工データ (OSSE)
- 90分積分、10分ごとに同化
- R_t は対角行列としている

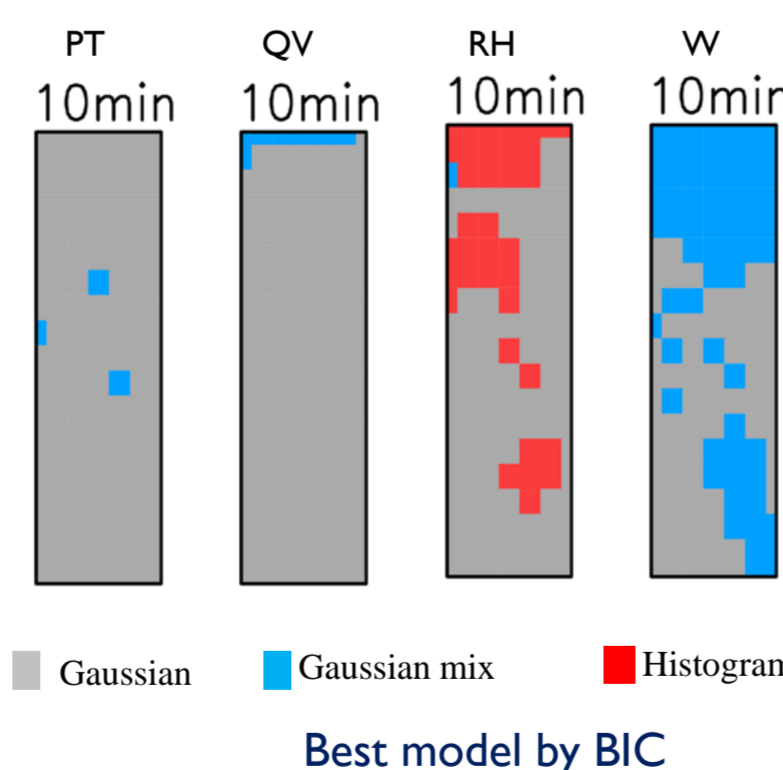
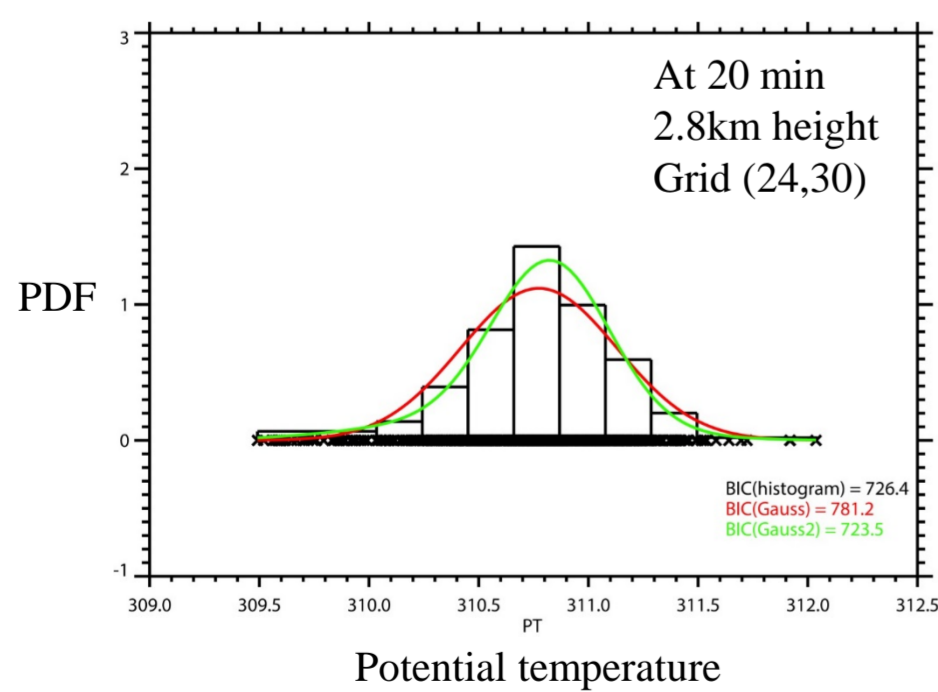
【粒子分布】



【アンサンブル平均】



【粒子分布のモデル表現】



【まとめ】

- 気象庁非静力学モデル (JMANHM) に粒子フィルタの実装を進めている (略称: NHM-PF)
- 観測ノイズ共分散行列 R_t のベイズ推定法を導入 (Ueno and Nakamura, 2016)
- PFの退化の問題が動的に解決できそうである
- 90分間のイベントで、バイアス・バリエーションの減少、雷雨の再現性を確認している
- 粒子分布の解析を継続中

本研究は、科学研究費・基盤研究(B): 粒子フィルタを用いた積乱雲の発生・発達に関する不確実性の解明 (代表・川畑) によるものです。