

H24.3.6: JAEA公開ワークショップ

「福島第一原子力発電所事故による環境放出と拡散プロセスの再構築」

原子力機構の活動報告Ⅱ 「大気拡散プロセスの解析」

日本原子力研究開発機構
永井晴康、茅野政道、寺田宏明、
堅田元喜、中山浩成、太田雅和

【WSPEEDI-IIによる大气拡散解析】

■ 局地詳細計算によるプラント北西地域の線量上昇プロセスの解析

6月13日プレス発表:

(<http://www.jaea.go.jp/02/press2011/p11061302/index.html>)

論文発表: G. Katata, et al., 2012: J. Environ. Radioactiv.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X11002335>)

■ 事故発生後2ヶ月間の日本全国の被ばく線量を暫定的に試算

6月15日原子力機構HP技術解説

(<http://www.jaea.go.jp/jishin/kaisetsu03/kaisetsu03.htm>)

■ 東日本域の大气降下量の試算と推定放出量の確認

8月31日厚労省プレス発表、9月6日原子力機構HP技術解説

(<http://nsed.jaea.go.jp/fukushima/data/20110906.pdf>)

■ 放射性物質の拡散シミュレーションの動画

11月11日原子力機構 原子力基礎工学研究部門HPに公開

(<http://nsed.jaea.go.jp/ers/environment/envs/fukushima/index.htm>)

MM5 (PSU/NCAR開発)

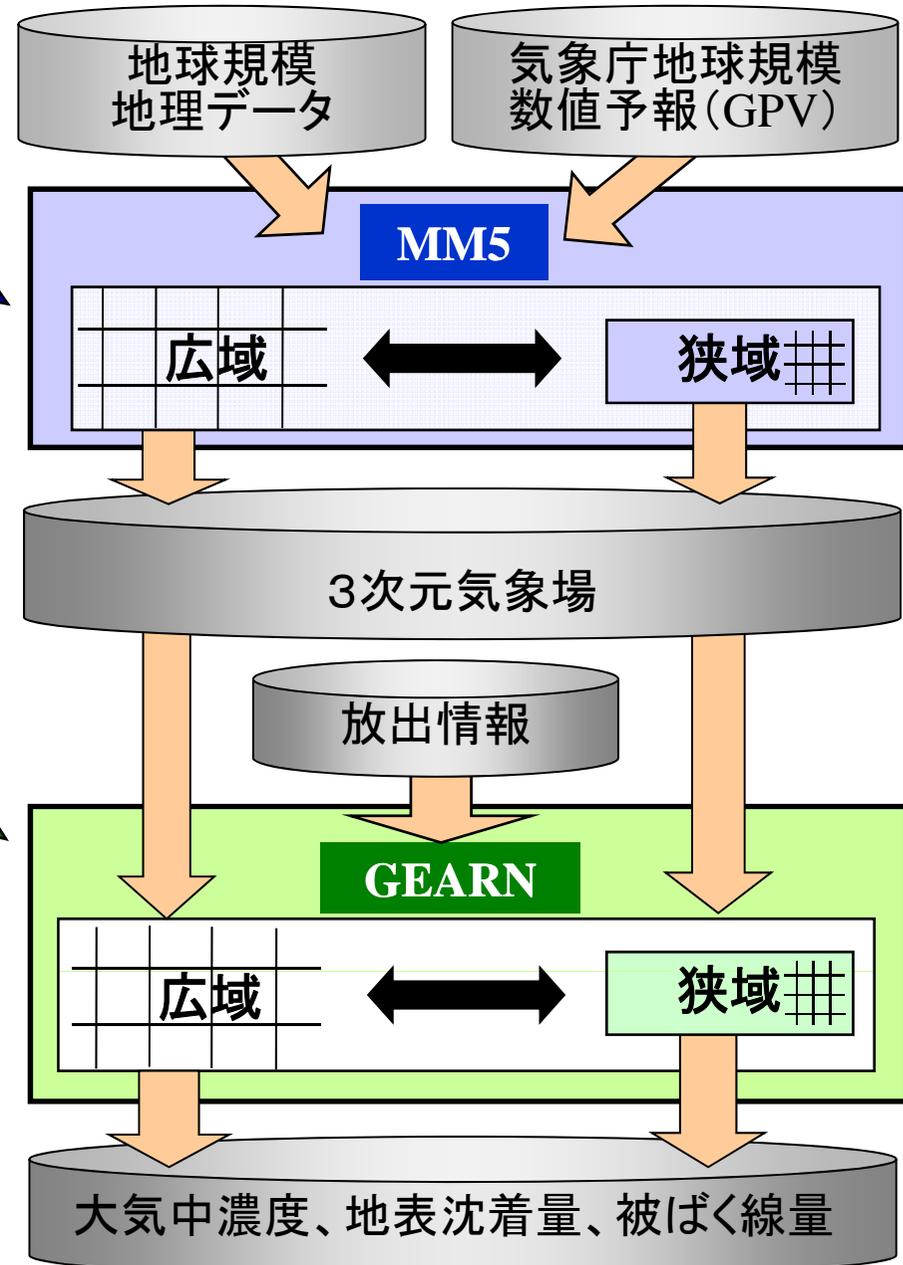
領域気象力学モデル

- 雲・降水、大気放射等の各種物理過程を考慮
- 気流、乱れ、降雨、雲量等の気象変数の予測

GEARN (原子力機構開発)

ラグランジュ型粒子拡散モデル

- 放射性核種の移流・拡散・沈着・崩壊を考慮
- 大気中濃度、地表沈着量、被ばく線量の予測



参考文献: 寺田、他: 緊急時環境線量情報予測システム (世界版) WSPEEDI第2版の開発, 日本原子力学会和文論文誌, 7[3], 257-267 (2008).

■ 座標系

水平: 地図投影面上での距離直交座標(x, y)、鉛直: 地形準拠座標(z*)

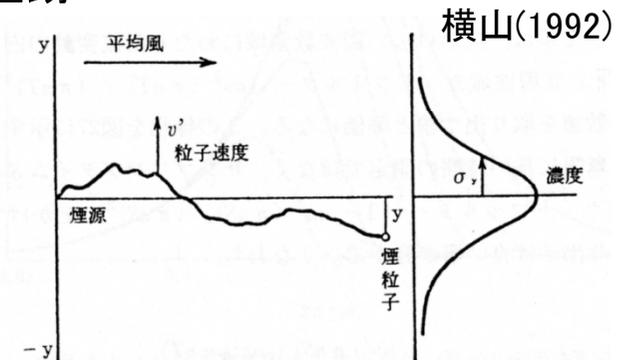
■ 移流拡散方程式 (+マップファクター、沈着、放射性崩壊を考慮)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - w^* \frac{\partial C}{\partial z^*} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_{z^*} \frac{\partial C}{\partial z^*} \right)$$

■ ラグランジュ型輸送計算: 多数の仮想粒子の位置を追跡

$$\begin{aligned} x_{t+\Delta t} &= x_t + u\Delta t + R_x, \\ y_{t+\Delta t} &= y_t + v\Delta t + R_y, \\ z_{t+\Delta t}^* &= z_t^* + w^*\Delta t + R_{z^*} \end{aligned}$$

x, y, z^* : 粒子位置[m]
 u, v, w^* : 風速[m/s]
 Δt : 時間増分[s]
 R_{x,y,z^*} : 拡散項[m]



■ ランダムウォーク法による拡散項 (Ahlstrom, 1977)

$$\begin{aligned} \text{水平: } R_x &= R_y = \sqrt{24K_h\Delta t} (0.5 - R(0)), \\ \text{鉛直: } R_{z^*} &= \left(\frac{\partial K_{z^*}}{\partial z^*} \right) \Delta t + \sqrt{24K_{z^*}\Delta t} (0.5 - R(0)) \end{aligned}$$

$\Delta d_{RMS} = \sigma_h = \sqrt{2K_h\Delta t}$ を使用

K_h : 水平拡散係数 [m²/s]

K_{z^*} : 鉛直拡散係数 [m²/s]

$R(0)$: 0から1までの一様乱数

■ 乾性沈着

$$\frac{dq_n}{dt} = -k v_g q_n$$

q_n : n 番目の粒子の放射能 [Bq]

v_g : 乾性沈着速度 [m/s]

- G. A. Sehmel, Atmos. Environ., 14, 983–1011 (1980) に基づく
- ヨウ素: 3×10^{-3} m/s、セシウム: 1×10^{-3} m/s に設定
- 森林への沈着の場合はそれぞれ5倍とした

$$k = \frac{2}{\Delta z} \left(1 - \frac{z_p}{\Delta z} \right) \quad : \text{各粒子の寄与率(高度に依存)}$$

z_p : 粒子の地上高度 (m)

Δz : 鉛直セル最下層の厚さ (m)

■ 湿性沈着

$$\frac{dq_n}{dt} = -\Lambda q_n$$

q_n : n番目の粒子の放射能 [Bq]
 Λ : 洗浄係数 [1/s]

洗浄係数: H. D. Brenk and K. J. Vogt, Nuclear Safety, 22, (1981)に基づく

$$\Lambda(x, y, z, t) = \alpha(\gamma_{con} \cdot F_{con} + \gamma_{non} \cdot F_{non})^\beta$$

α, β : 核種ごとに定められた定数 ($\alpha = 5 \times 10^{-5}, \beta = 0.8$)

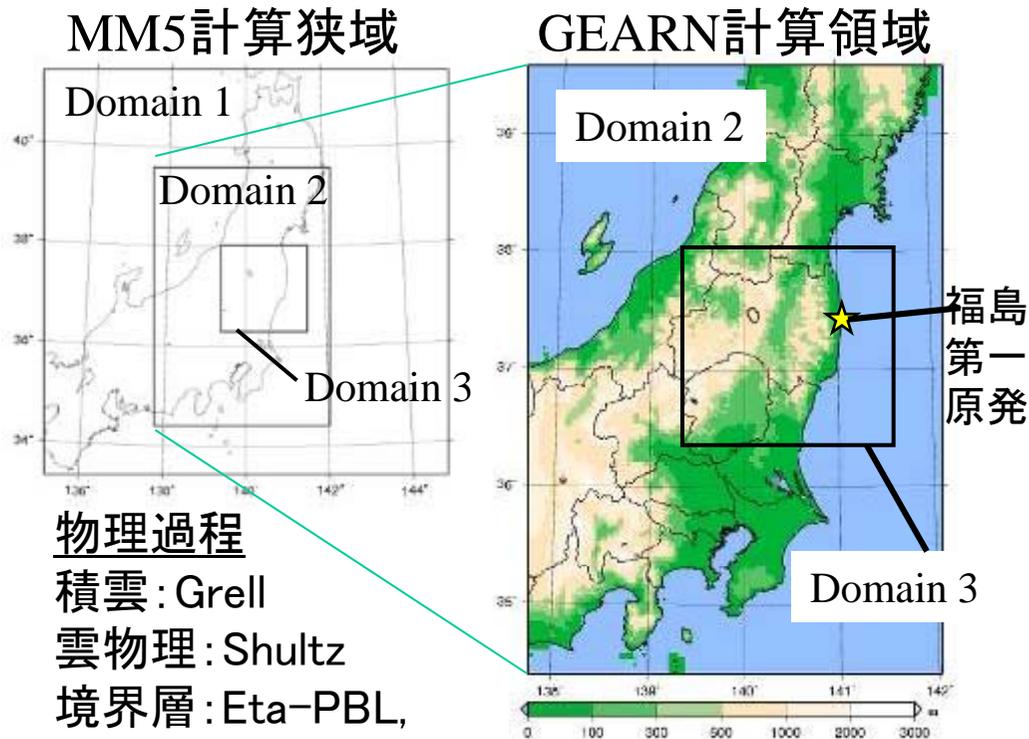
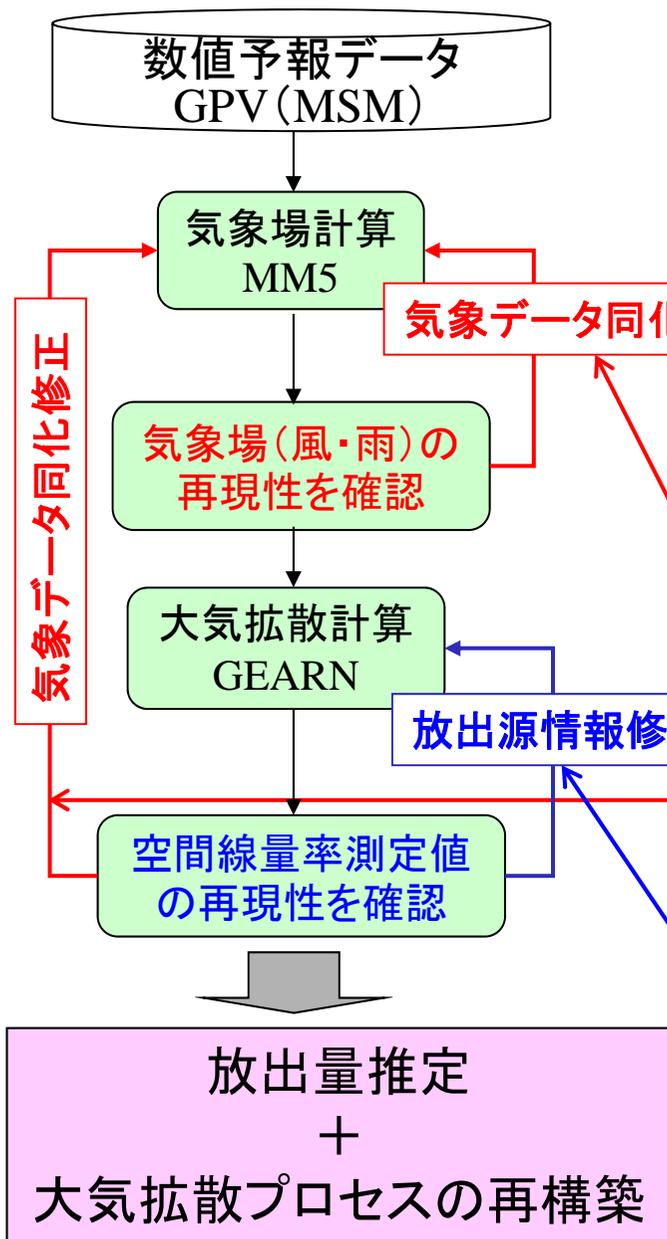
$\gamma_{con}, \gamma_{non}$: 対流性および非対流性降水の降水強度 [mm/h]

F_{non} および F_{con} は各セルについての降水発生フラグであり、以下によって決定する

- セル内の雨水+雪+あられの混合比の増加量が0: $F_{non} = 0$
- 雲頂高度より上空のセル: $F_{con} = 0$
- 上記以外の場合: $F_{con} = F_{non} = 1$

MM5の出力を
使用

原発北西部の線量上昇説明：解析手法

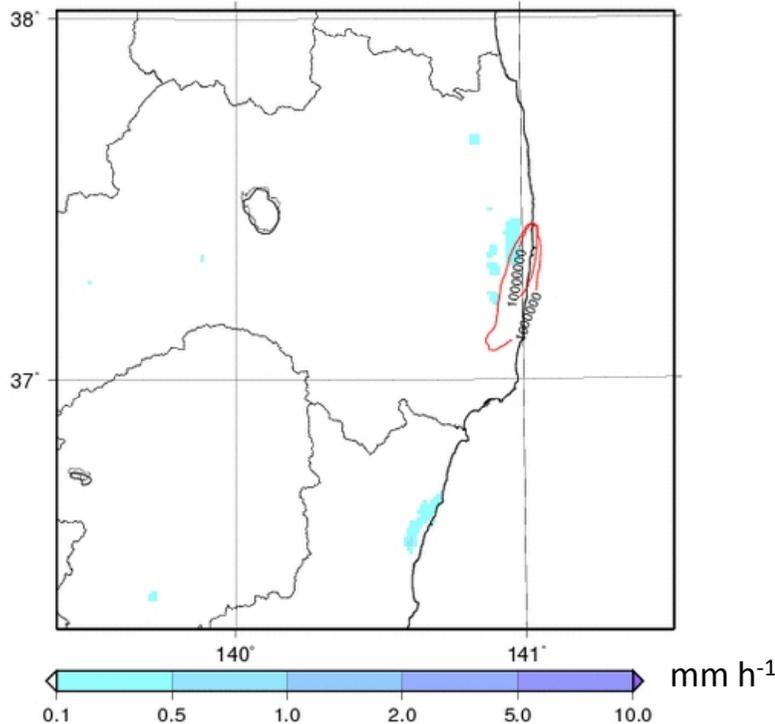


- 気象データ同化 (analysis/observation nudging)
アメダスの気象データ、
福島第一・第二原発の風速・風向データ
- 空間解像度: 9 km (D1), 3 km (D2), 1 km (D3)
- 計算期間: 2011年3月14日 17時~3月17日 0時
- 放出核種: ^{131}I , ^{132}Te (+ ^{132}I), ^{134}Cs , ^{137}Cs
- 放出率: Chino et al. (2011)の推定結果を基に、
空間線量率測定値を再現するように調整

原発北西部の線量上昇説明：線量上昇過程

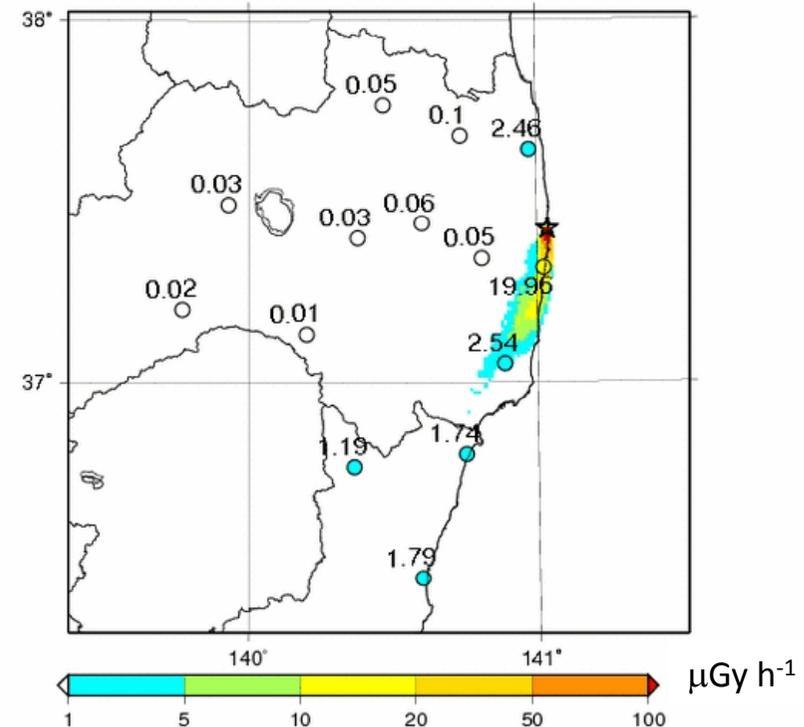
降水量および¹³¹Iの鉛直積算濃度

時刻 (UTC) 2011-03-15_00h



空間線量率

時刻 (UTC) 2011-03-15_00h



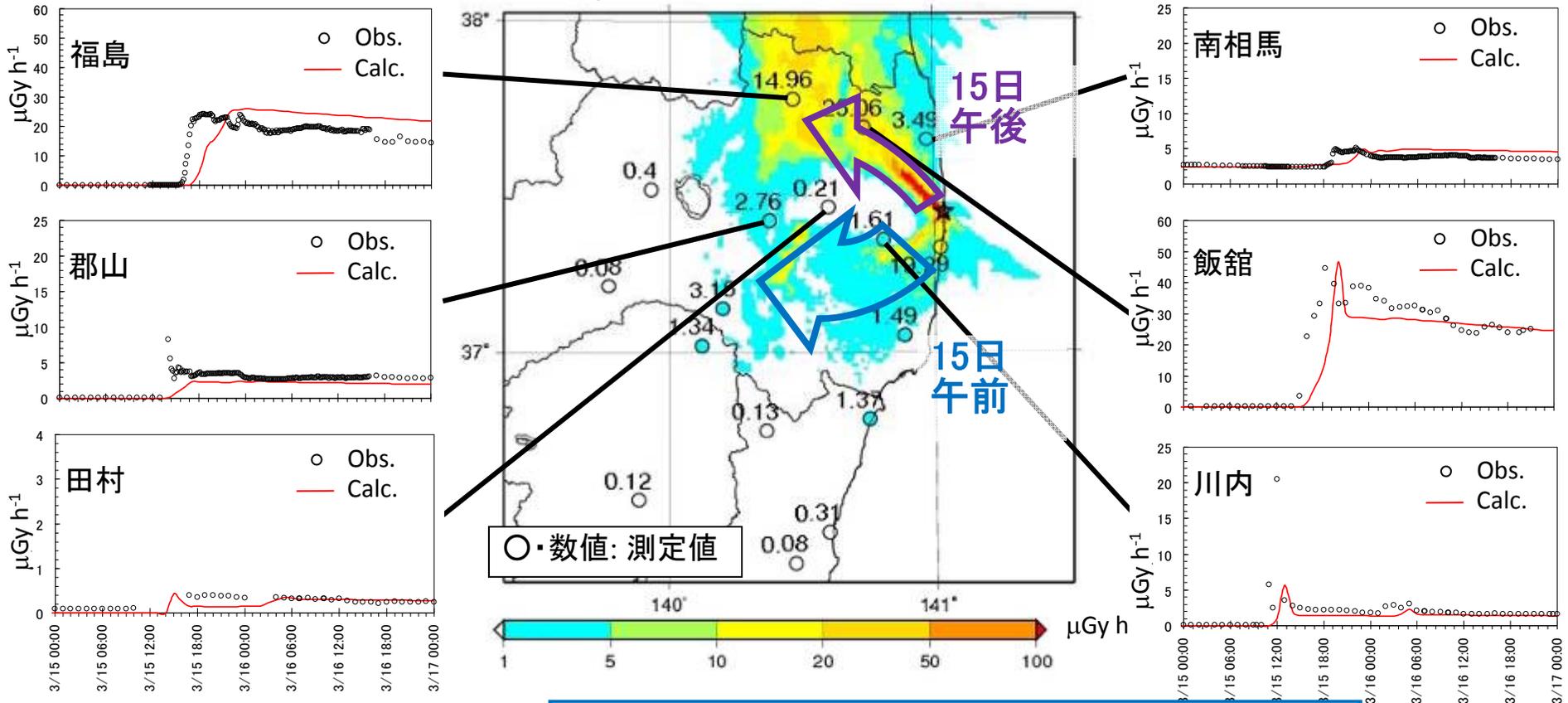
カラー面塗り： 降水量計算値
赤等値線： 地上から上空までの
積算濃度 [Bq m⁻²]

カラー面塗り： 空間線量率の計算結果
○・数値： 空間線量率のモニタリング値

■ 3月16日以降、沈着物質からの線量の分布傾向を概ね再現した

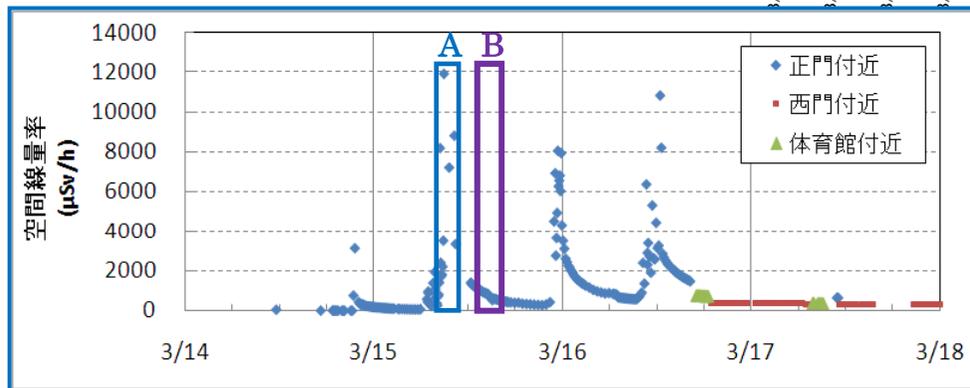
大気放出量推定: 空間線量率による推定結果

空間線量率 (3月16日 21時時点)



福島第一原発における
空間線量率

2号機の圧力低下
 期間A: 3月15日7~11時
 期間B: 3月15日13~15時



東日本域での降水量解析

10/16

■ 計算領域: 東西690km × 南北960km × 鉛直10km

■ 空間分解能: 3kmメッシュ

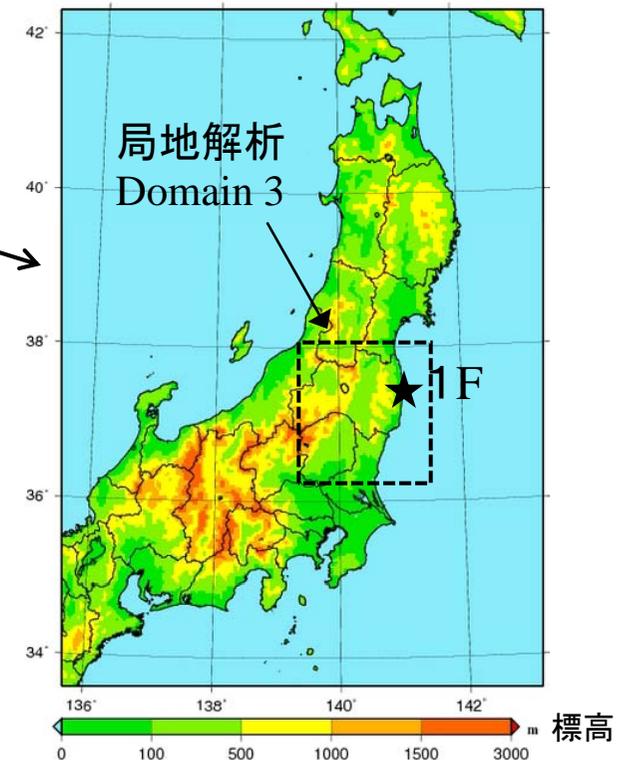
■ 計算期間: 2011年3月12日5時～4月30日24時

■ 気象予測の初期・境界条件

- ・気象庁数値予報格子点値GPV(MSM): 3h間隔
- ・気象庁アメダス、福島第一原発(1F)及び第二原発における観測データの同化により予測値を修正

■ 放出率

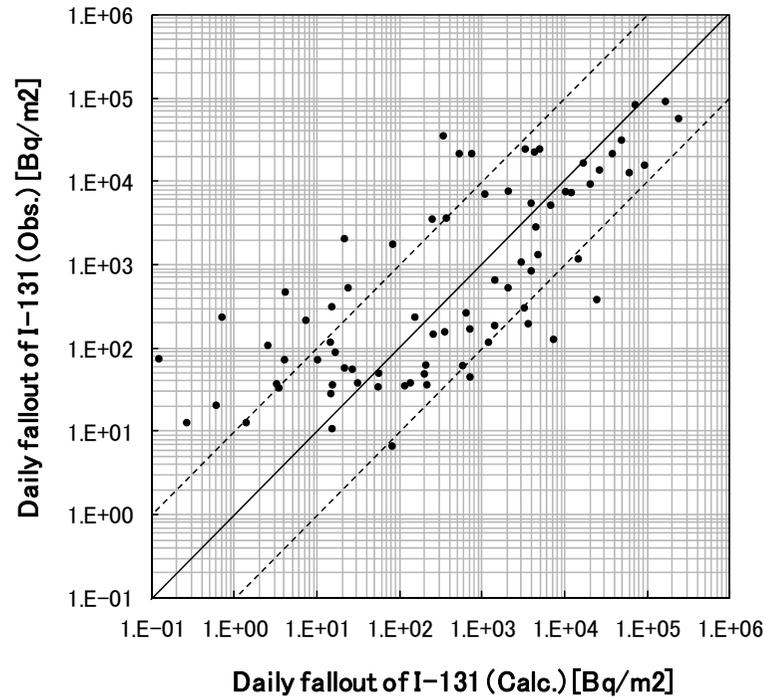
- ・Chino et al.(2011)及び原子力機構が8月22日の原子力安全委員会で報告した推定値(3月21日及び30日については、さらに補正)
- ・4月6日以降は4月5日の放出率が継続すると仮定



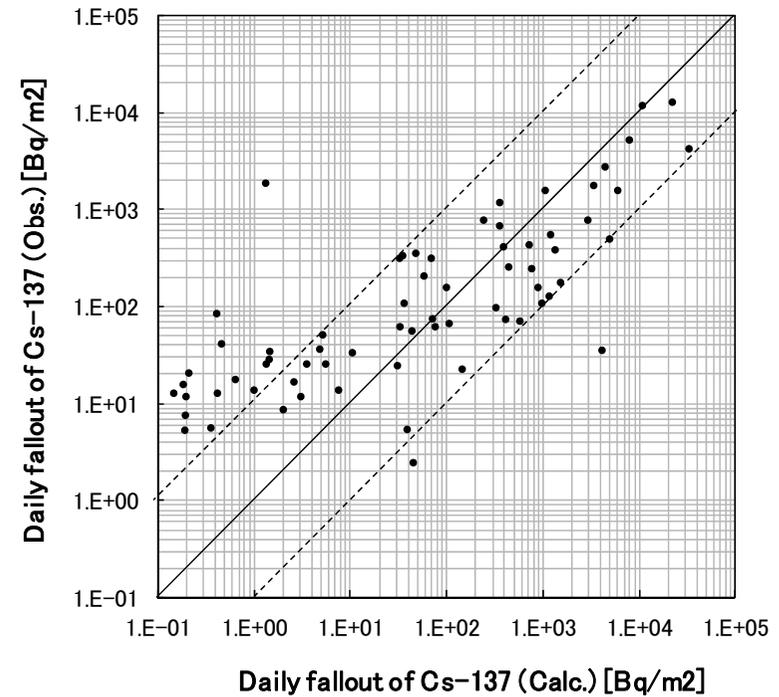
広域拡散計算と降水量測定値との比較による推定放出率の妥当性確認

東日本域での降下量解析: 降下量比較(統計値) 11/16

^{131}I 日降下量の散布図



^{137}Cs 日降下量の散布図

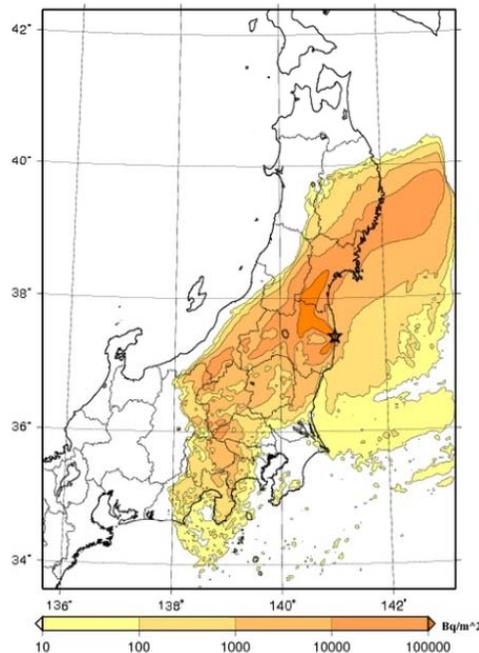
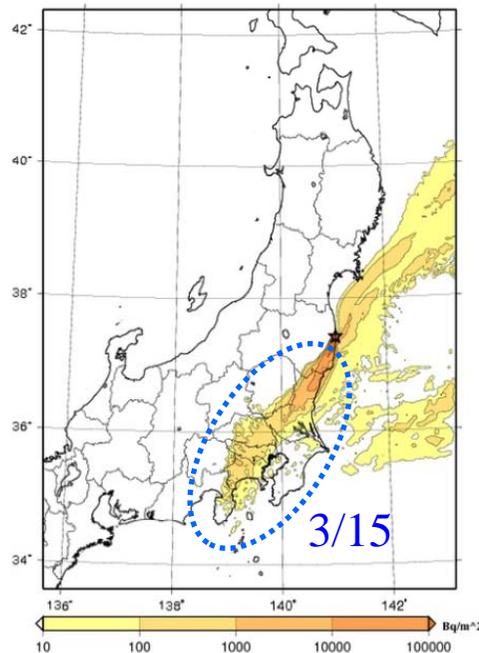
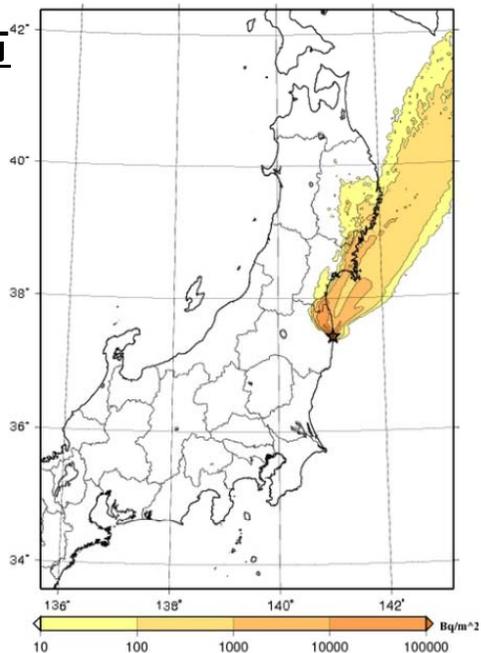


Radionuclides	FA2 (%)	FA5 (%)	FA10 (%)	Correlation coefficients
^{131}I	22.4	48.7	65.8	0.75
^{137}Cs	26.5	48.5	70.6	0.72

東日本域での降水量解析：日降水量・降雨分布^{12/16}

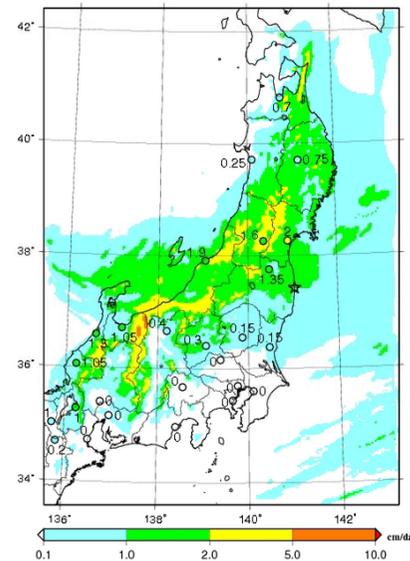
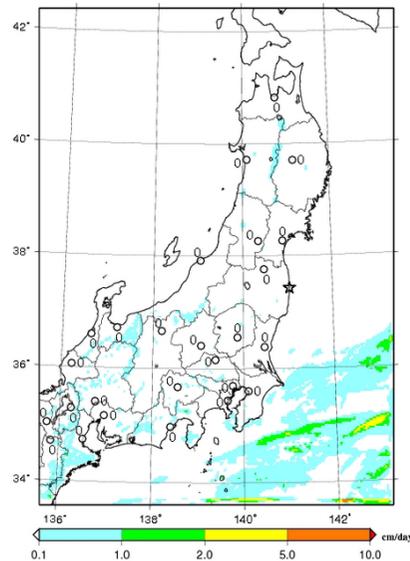
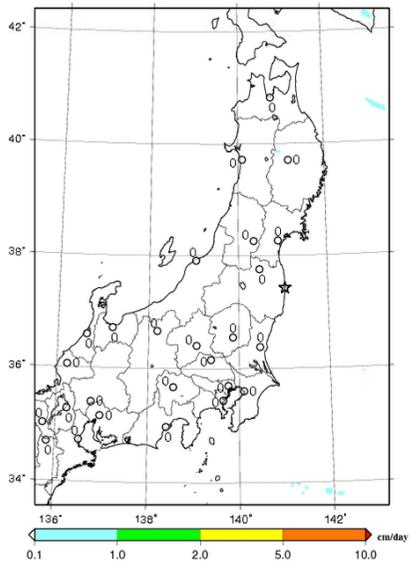
9 JST Mar. 12 - 9 JST Mar. 13 9 JST Mar. 14 - 9 JST Mar. 15 9 JST Mar. 15 - 9 JST Mar. 16

日降水量分布



日降水量分布

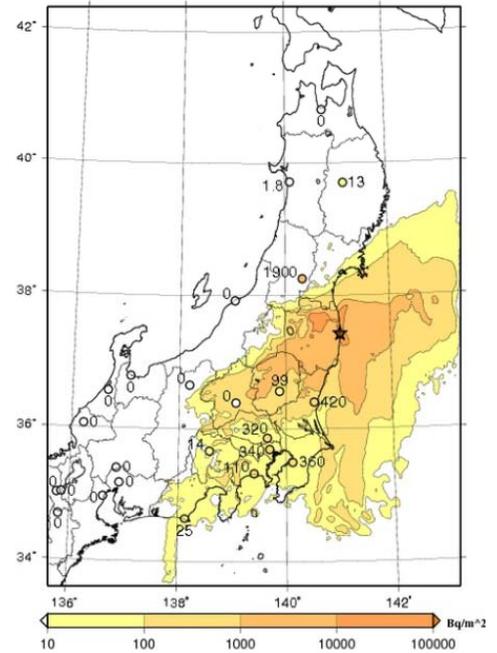
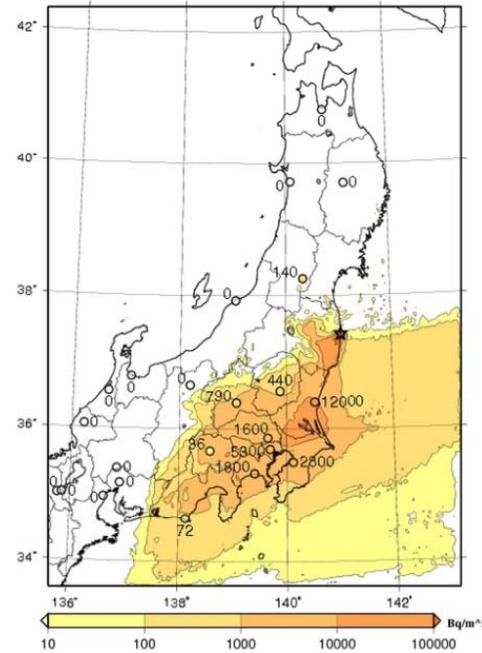
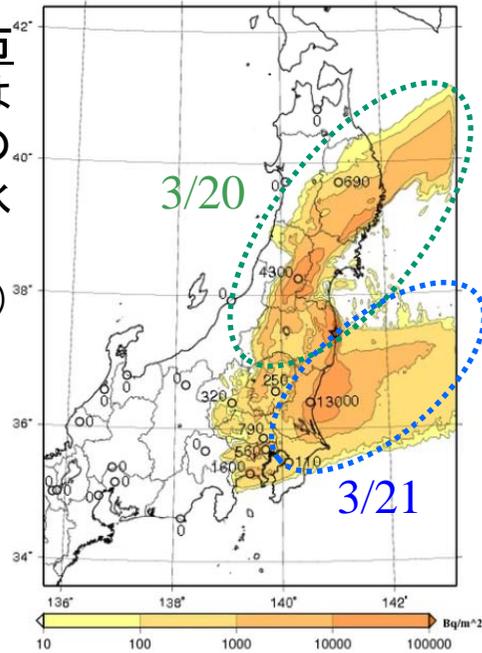
図中の数値は
気象官署の日
降水量観測値



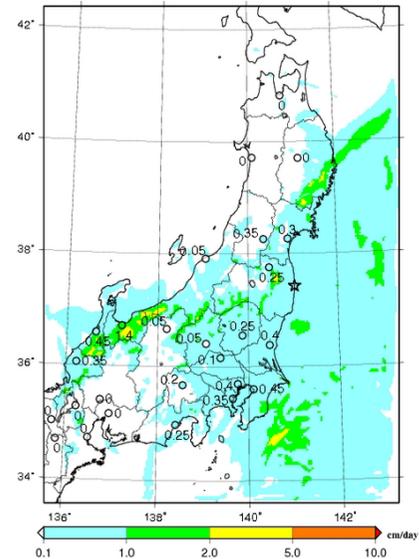
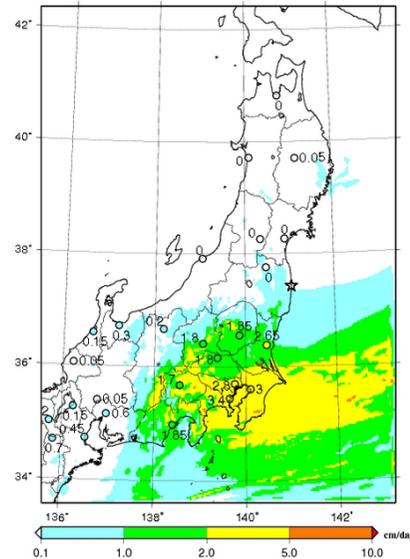
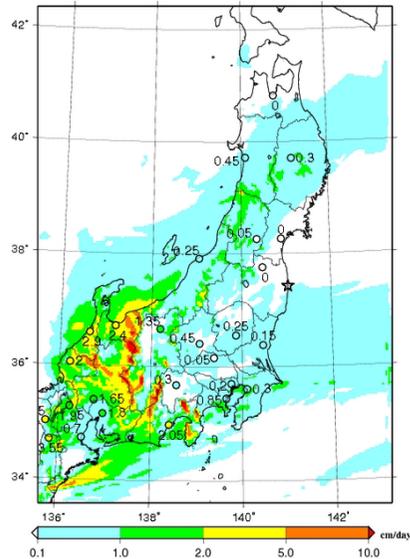
東日本域での降下量解析：日降下量・降雨分布2^{13/16}

9 JST Mar. 20 - 9 JST Mar. 21 9 JST Mar. 21 - 9 JST Mar. 22 9 JST Mar. 22 - 9 JST Mar. 23

日降下量分布
 図中の数値は
 文部科学省の
 環境放射能水
 準調査結果
 (定時降下物)



日降水量分布
 図中の数値は
 気象官署の日
 降水量観測値

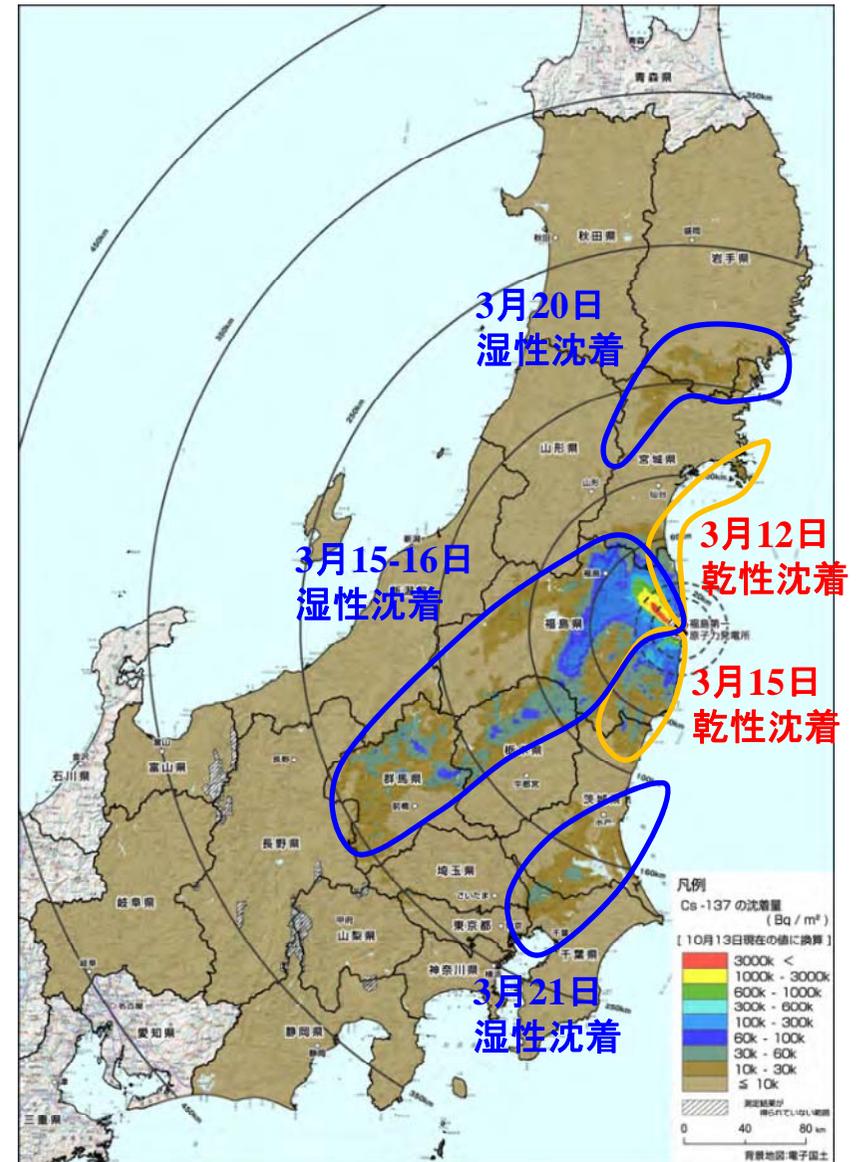
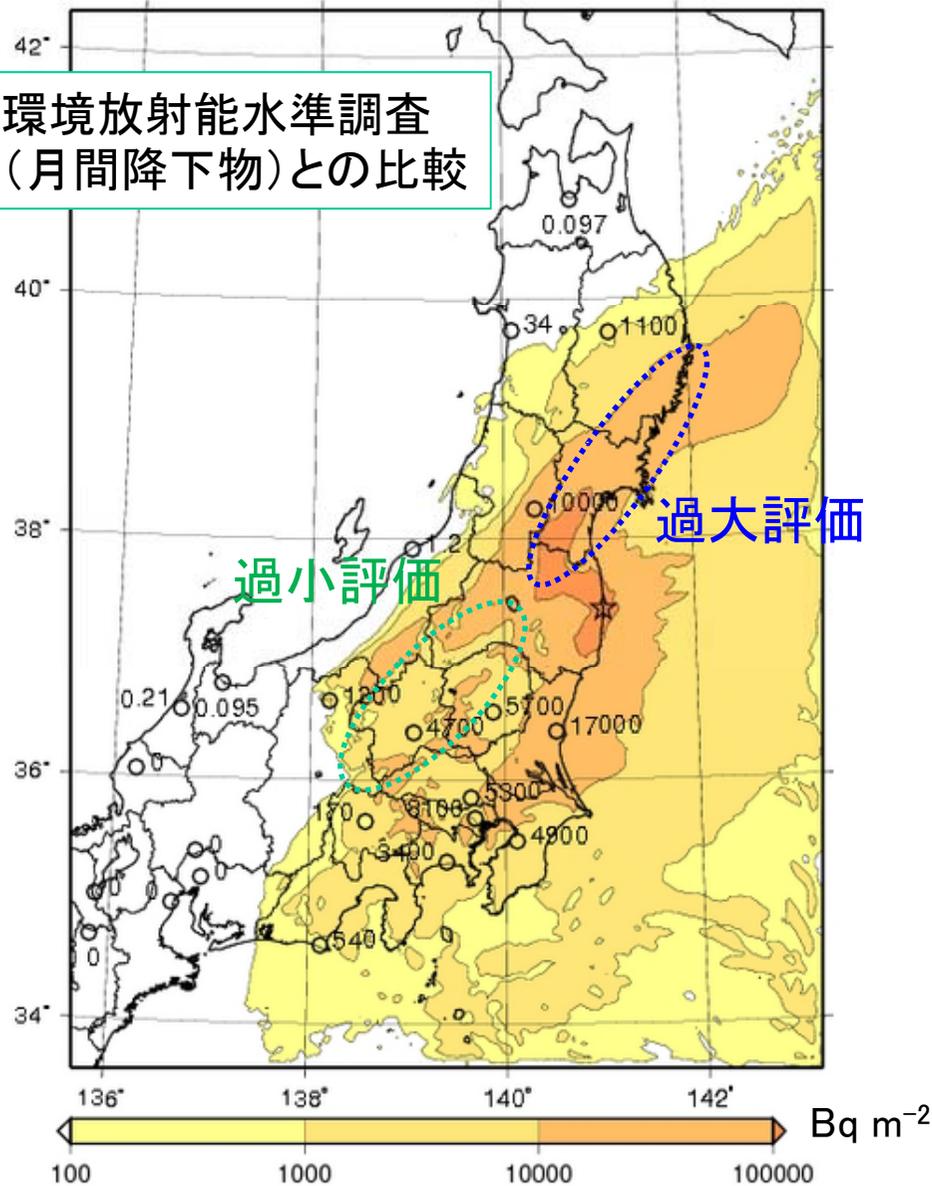


東日本域での降水量解析：¹³⁷Cs沈着過程

積算値：3月31日24時まで

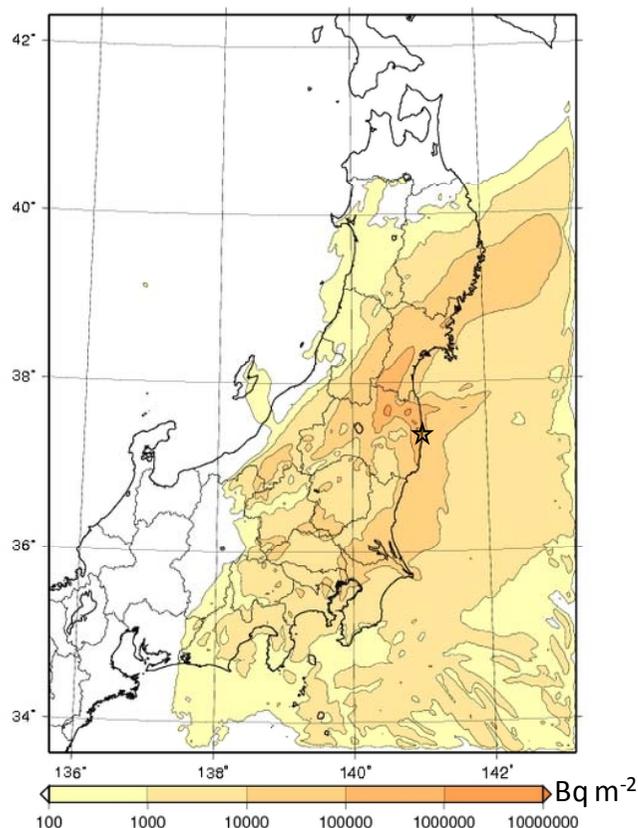
文科省航空機モニタリングの¹³⁷Cs沈着量

環境放射能水準調査
(月間降下物)との比較

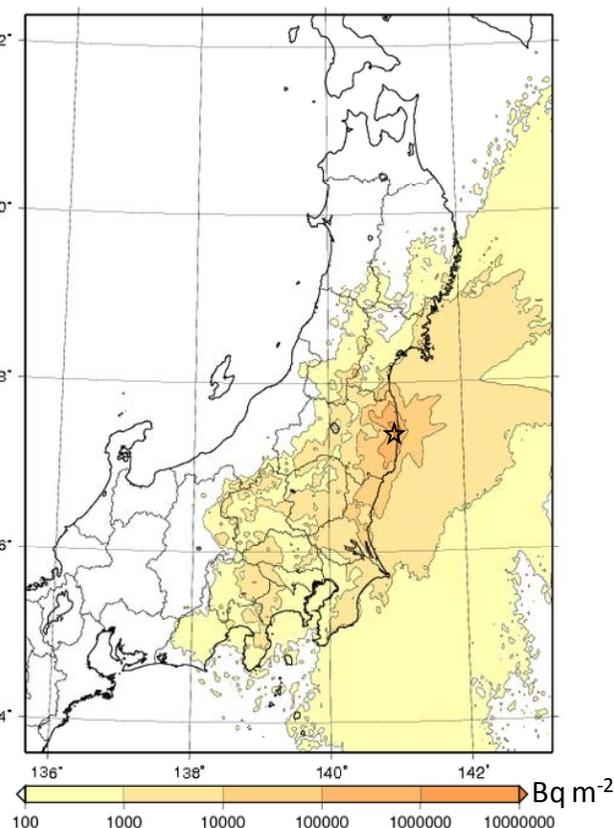


^{137}Cs 沈着量分布(4月末まで)の特徴

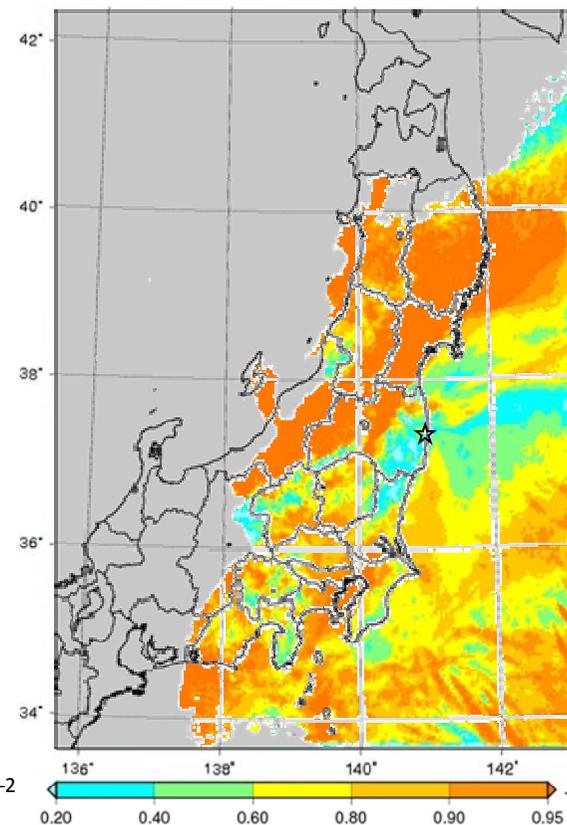
湿性沈着量分布



乾性沈着量分布



湿性沈着量/総沈着量



沈着場所	陸上	海上	計算領域外
総放出量に対する割合	37%	21%	42%

解析結果

- 福島県中通りの線量上昇とサイト北西方向の高線量地帯は、3月15日午前と午後に出された高濃度プルームの湿性沈着で形成
- 放出点周辺のダストサンプリングデータや空間線量率から推定した放出率の妥当性を広域の降下量測定値と拡散解析結果の比較により確認
- 東日本域での降下量・線量分布の形成過程を特定
 - 3月12日乾性沈着： 南相馬～女川原発周辺
 - 3月15日乾性沈着： いわき市～茨城県北部
 - 3月15-16日湿性沈着： 原発北西部、福島県中通り、栃木県、群馬県
 - 3月20日湿性沈着： 宮城県北部～岩手県南部
 - 3月21日湿性沈着： 茨城県南部～千葉県北西部
- ^{137}Cs 沈着割合：陸上37%、海上21%、計算領域外(大部分は太平洋)42%

今後の課題

- 気象・拡散モデル、沈着過程の改良による、沈着量計算の過大評価と過小評価の改善と高精度な大気拡散過程の再構築