

第31回CCSEワークショップ@東海村産業・情報プラザ

2020年2月21日

放射性物質の大気拡散予測モデル の開発と応用

日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究センター
環境・放射線科学ディビジョン
環境動態研究グループ

寺田宏明

本日の内容

1. はじめに

2. 大気拡散予測システム: WSPEEDI-II

- システムの概要
- システムの適用(福島第一原子力発電所事故への対応)
- 高度化への取り組み

3. 局所域高分解能大気拡散モデル: LOHDIM-LES

- 市街地における詳細大気拡散解析

4. 全球大気拡散モデル: GEARN-FDM

- 欧州再処理施設起源 ^{129}I の全球輸送解析

5. まとめと今後の展開

1. はじめに

■ 放射性物質の大気放出

- 原子力施設: 重大事故あるいは通常運転時の気体廃棄物処理
- 地下核実験
- 医療用線源の誤廃棄
- 核テロ etc.

➡ 公衆の放射線被ばくの可能性

■ 対策・対応

【緊急時】

- 放射線防護対策の計画策定、実施判断
- 緊急時モニタリングの計画策定、結果の解析・評価

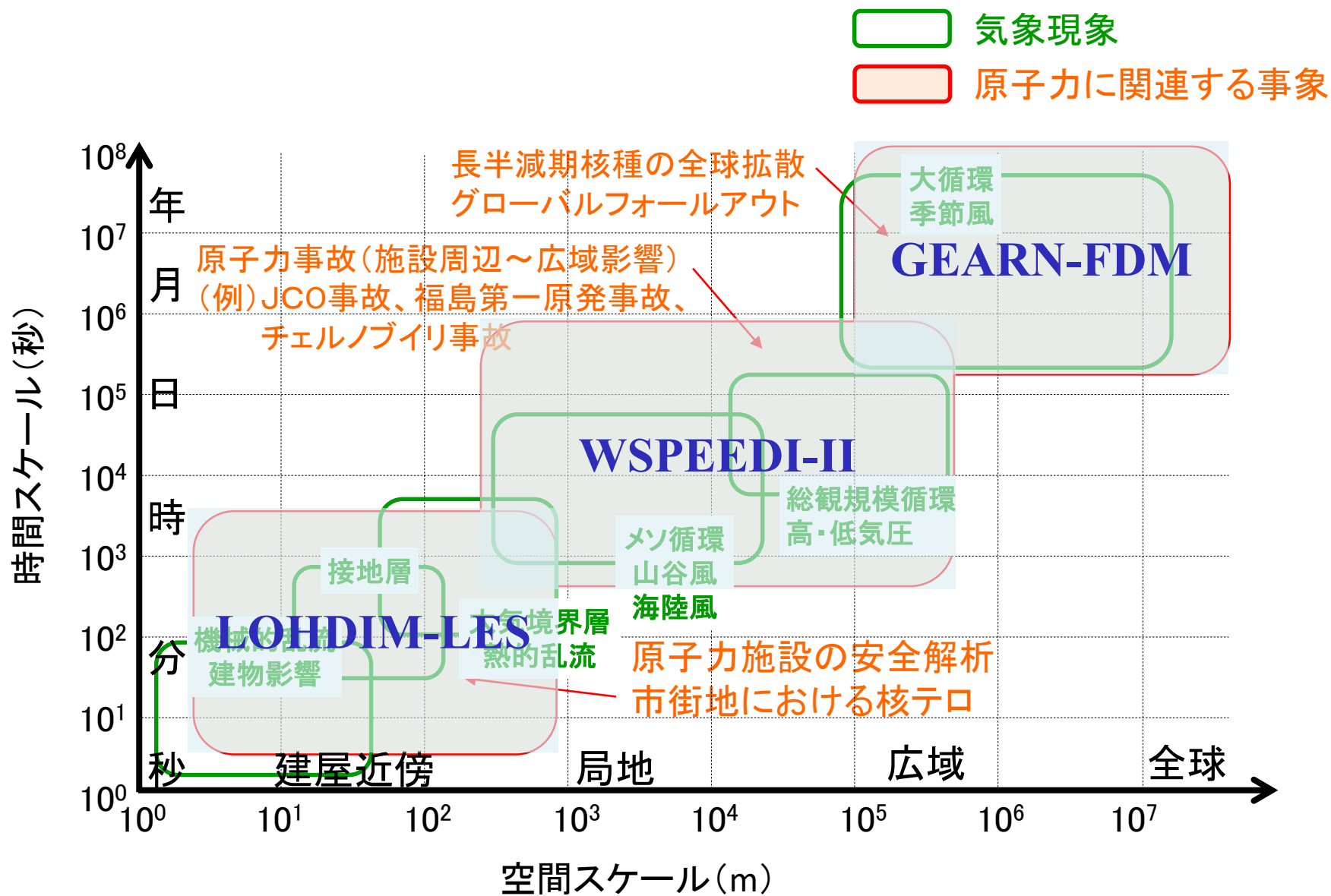
【平常時】

- 安全解析
- 詳細な環境中移行評価（住民の安心と理解、風評被害防止）

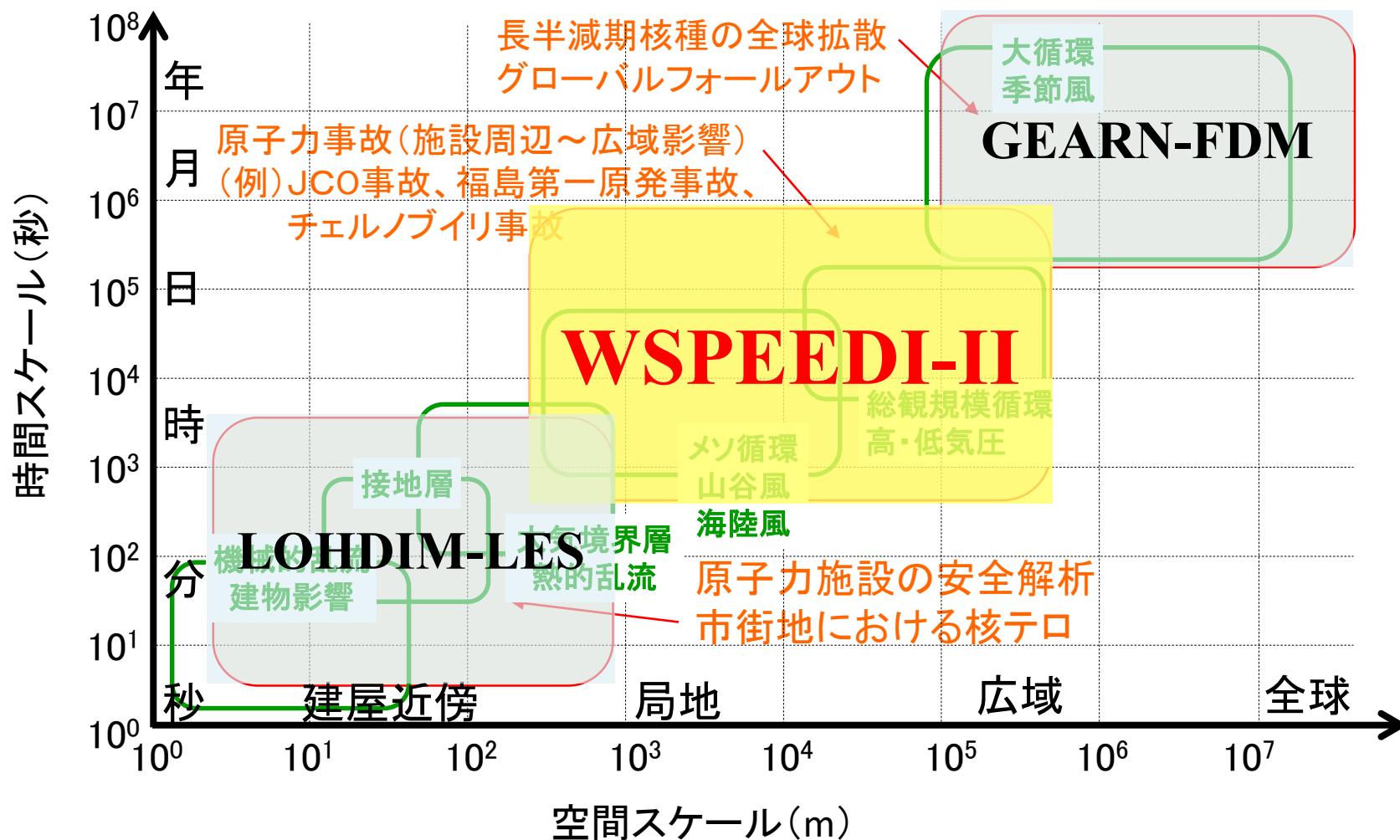


大気拡散予測モデルによる数値シミュレーション

放射性物質の詳細な環境中分布の迅速な把握と将来予測に有効



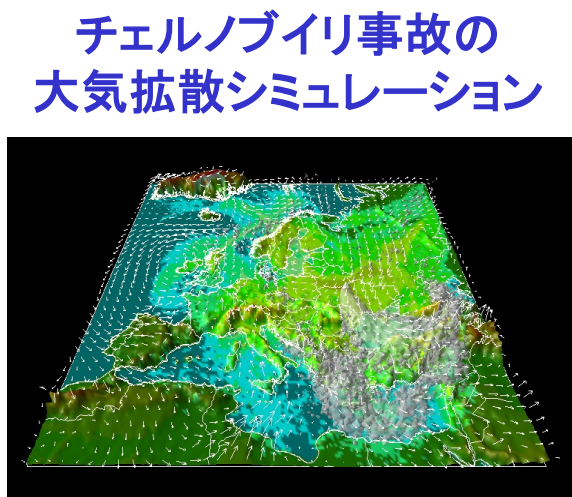
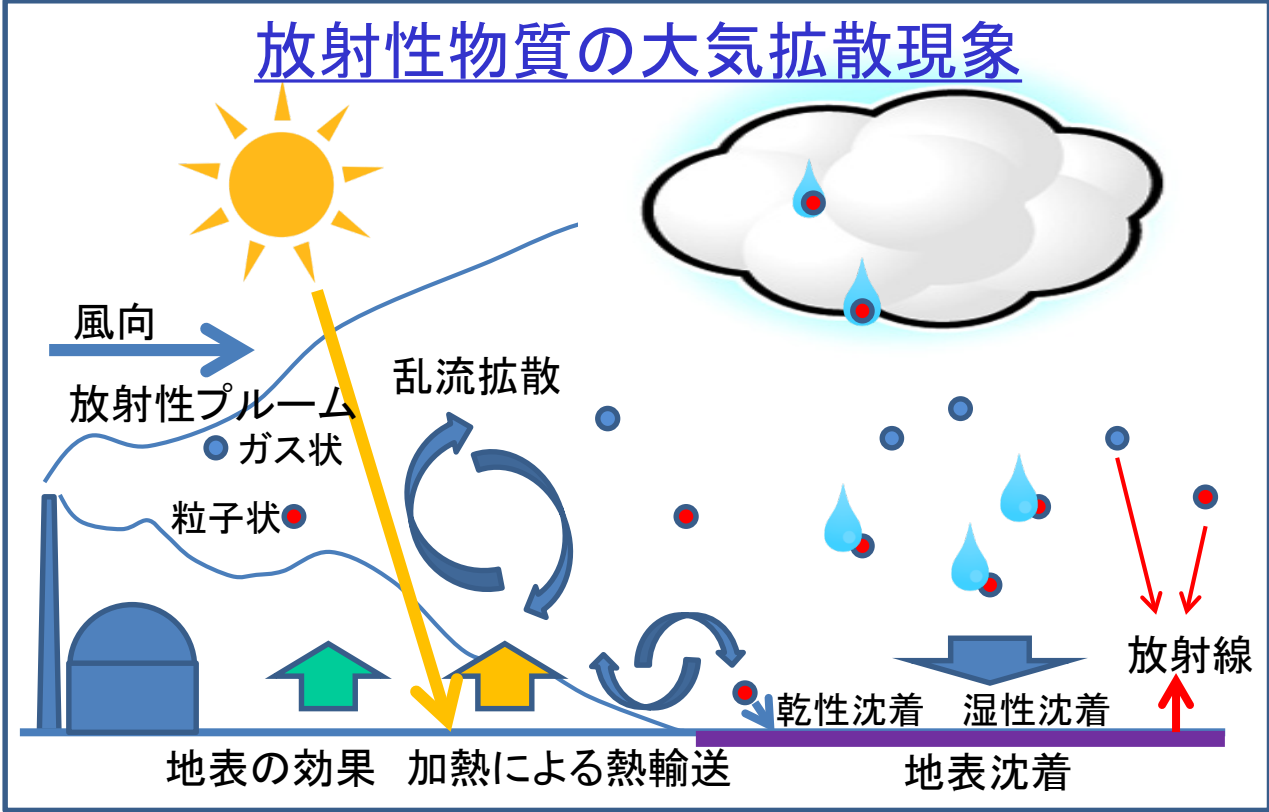
2. 大気拡散予測システム: WSPEEDI-II



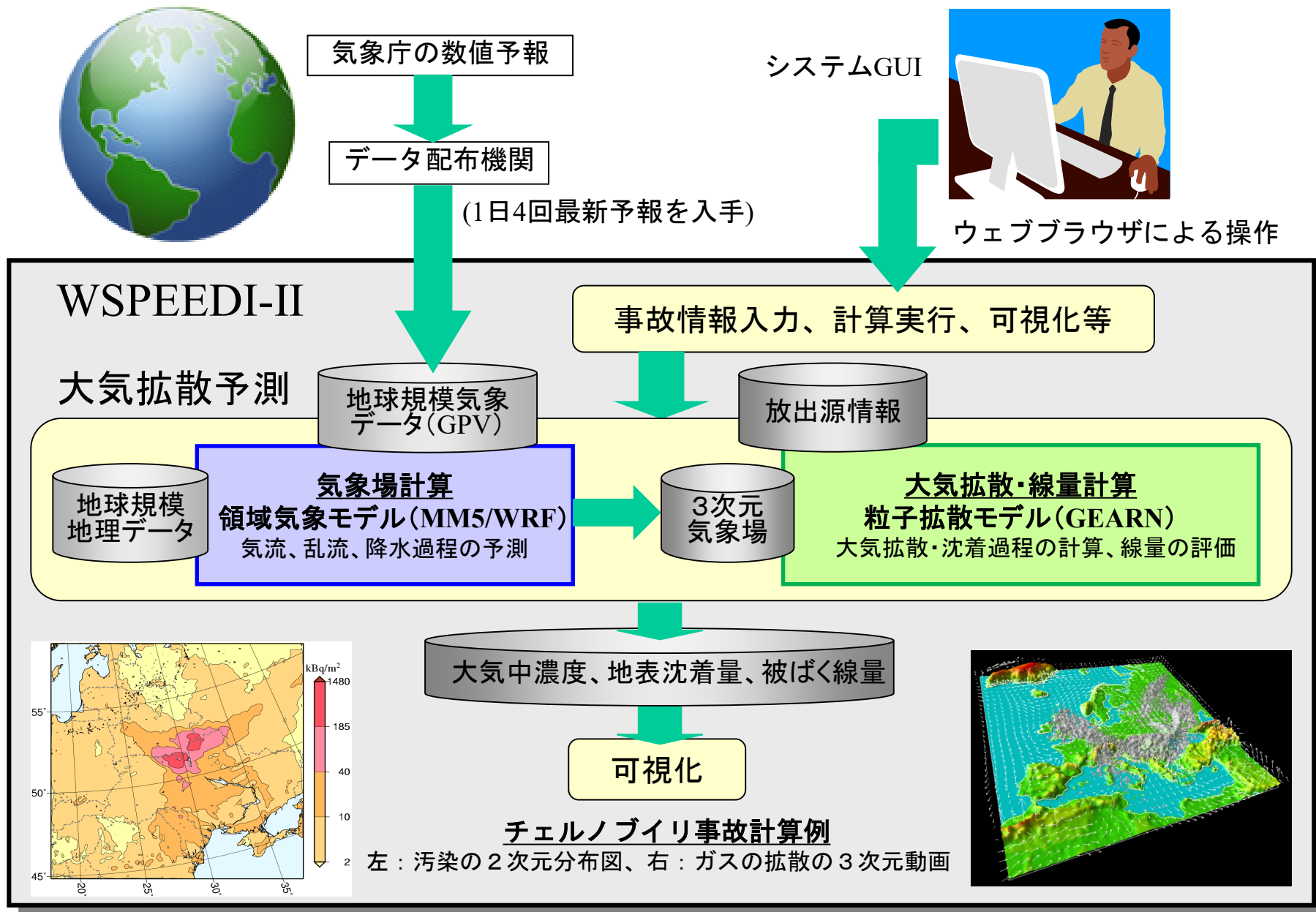
- 【目的】
- 国内外の原子力事故により放出される放射性物質の大気拡散と被ばく線量を、計算シミュレーションで迅速に予測
- 【手法】
- ① 気象モデル計算により、大気中の気流、乱流、降水過程を再現

② 拡散モデル計算により、放射性物質の大気拡散・沈着過程を再現

③ 放射性物質の大気中濃度、地表沈着分布から被ばく線量を評価



計算結果の3次元可視化
 ^{137}Cs 大気中濃度、沈着量
分布(放出開始後1日毎)



【検証】

- チェルノブイリ事故の大気拡散シミュレーション
— IAEA, WMO, EC共催のATMES等(1991年)

- 欧州広域拡散実験ETEXの実時間及び事後シミュレーション(1994年)

— 日米欧の参加国の予測性能評価

⇒ 世界トップクラスの性能実証

WSPEEDI第1版完成(1997年)

第2版の性能向上を確認

WSPEEDI第2版開発

【適用】

- アルゲシラス(スペイン)でのCs-137誤焼却事故への対応

— 米国NARACとの共同拡散評価

⇒ 国際情報交換の活用

- IAEA緊急時対応訓練ConvExに併せた大気拡散シミュレーション

— 日米欧システムの共同参加

⇒ 国際情報交換の活用

- 稲ウンカの中国大陸からの飛来予報

— 農水省2004年10大研究成果

⇒ 他分野への活用で有用性実証

- 北朝鮮核実験対応(2009年5月、2013年2月、2016年1、9月、2017年9月)

— 文部科学省に予測情報提供

⇒ 国の有事対応に貢献

- 福島第一原子力発電所事故への対応

— 大気放出量の推定、大気拡散解析

⇒ 事故対応に貢献

【放出量推定】 原子力安全委員会への協力

- 暫定放出量推定: 原子力安全委員会発表(4月12日、5月12日)
⇒ M. Chino, et al., 2011: J. Nucl. Sci. Technol., 48, 1129–1134
- 3月12～15日の放出量の再評価: 原子力安全委員会発表(8月22日)
⇒ G. Katata, et al., 2012: J. Environ. Radioactiv., 109, 103–113
- 新規データと改良モデルを用いた放出源情報の詳細評価
⇒ G. Katata, et al., 2015: Atmos. Chem. Phys., 15, 1029–1070
- 被ばく線量評価のための放出源情報と大気拡散解析の精緻化
⇒ H. Terada, et al., (in print): J. Environ. Radioactiv. (Doi:10.1016/j.jenvrad.2019.106104)

【大気拡散解析】

- 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を解析
⇒ 原子力機構プレス発表(<http://www.jaea.go.jp/02/press2011/p11061302/index.html>)
G. Katata, et al., 2012: J. Environ. Radioactiv., 111, 2–12
- 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
⇒ 原子力機構HP技術解説 (<http://www.jaea.go.jp/jishin/kaisetsu03/kaisetsu03.htm>)
- 東日本域の大気降下量の試算と推定放出量の確認＋沈着過程の解析
⇒ H. Terada, et al., 2012: J. Environ. Radioactiv., 112, 141–154
- 炉内事故進展解析との融合による放出に寄与した原子炉の推定
⇒ M. Chino, et al., 2016: Sci. Rep. 6, 31376

[暫定放出量推定]

4月5日までの暫定放出量を早期に推定
M. Chino, et al., 2011: JNST, 48,1129-1134

[放出量再推定]

3月12～15日の放出量を再推定
G. Katata, et al., 2012: J. Environ. Radioactiv.,
109, 103-113



広域拡散計算と日降水量測定値の比較により推定放出率の妥当性確認

H. Terada, et al., 2012: J. Environ. Radioactiv., 112, 141-154

放出量推定手法の概念

計算値

1Bq/hの単位放出を仮定

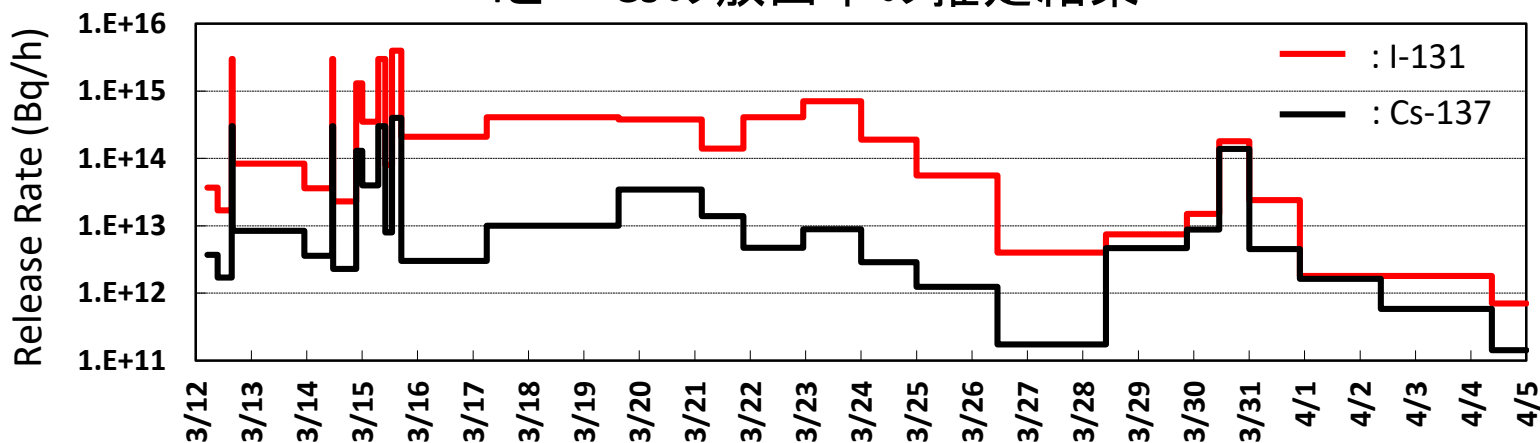
測定点の大気中濃度、
空気吸収線量率を算出

測定値

大気中濃度、
空気吸収線量率

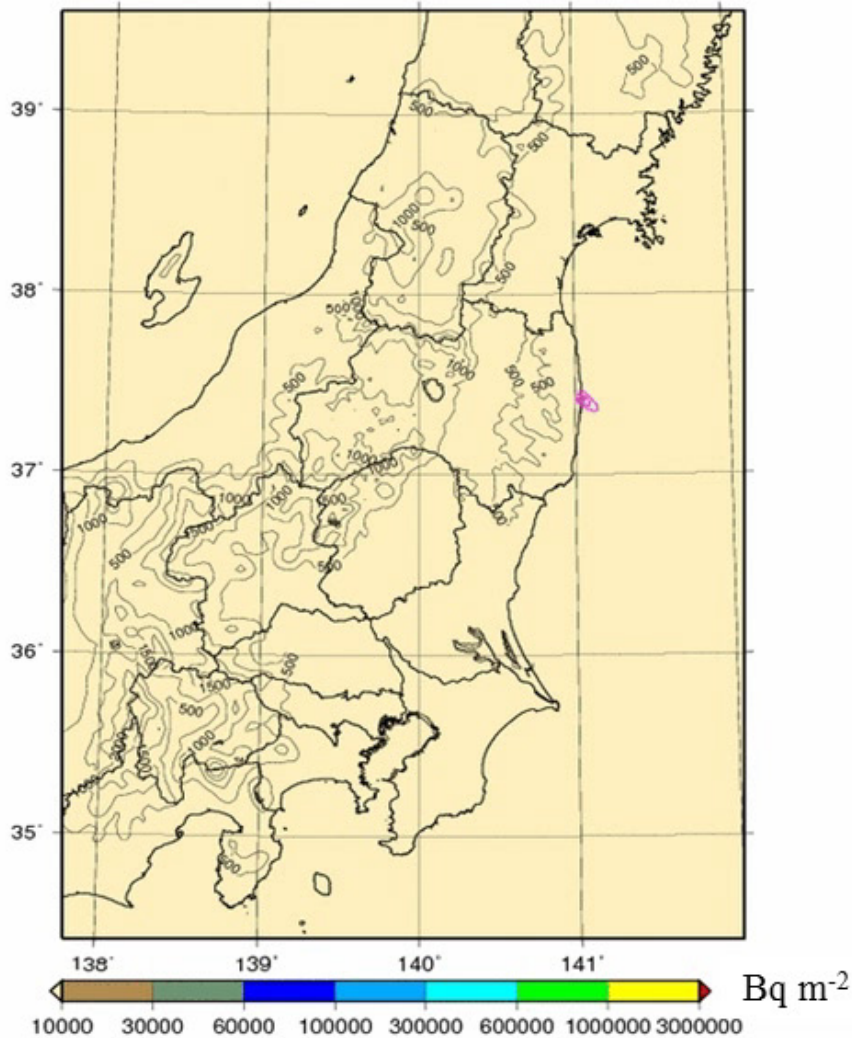
$$\text{放出率(Bq/h)} = \text{測定値} / \text{計算値}$$

^{131}I と ^{137}Cs の放出率の推定結果

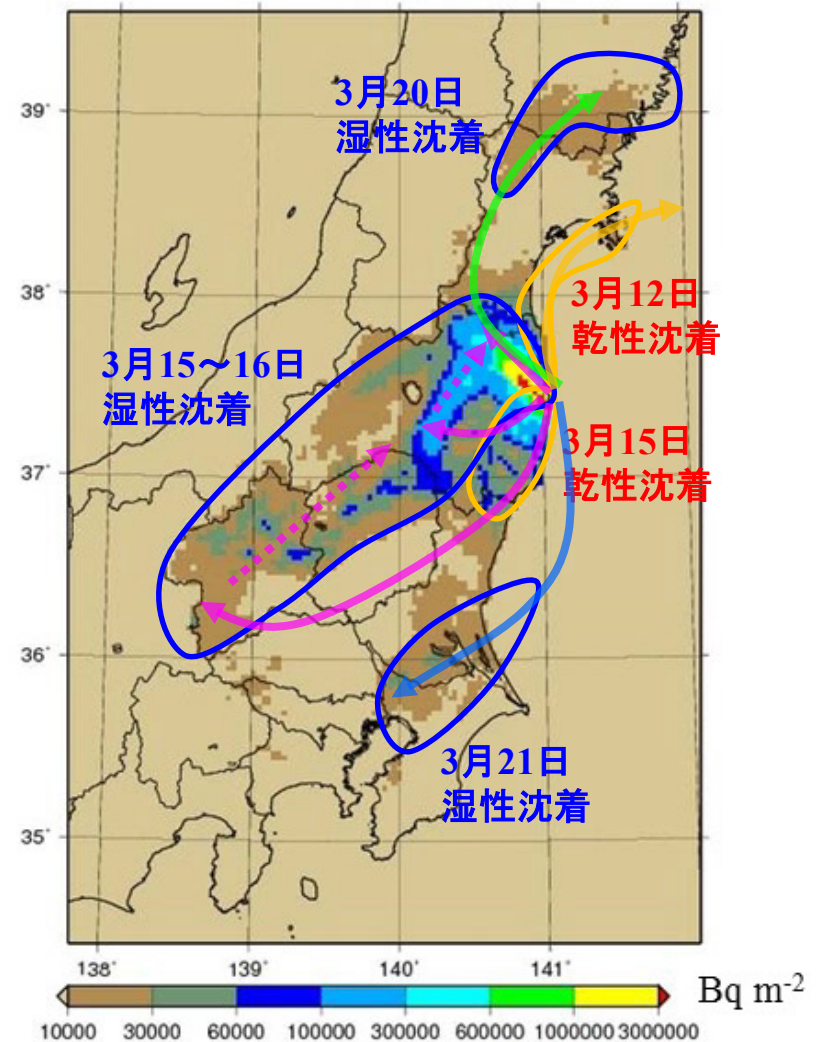


国連科学委員会UNSCEAR2013レポートで放出源情報として採用

WSPEEDI: ^{137}Cs 大気濃度、沈着量



文科省航空機モニタリング: ^{137}Cs 沈着量分布



アンサンブル計算と統計解析(ベイズ推計)の組合せにより放出条件だけでなく
気象場まで最適化

アンサンブル計算
初期値を少しずつ変えて
多数ケースの気象場を生成

放出期間分割・
単位放出(1Bq/h)

ソース・レセプター関係の
マトリックス計算出力
(放出期間×地点×
出力時間)

再構築した
大気拡散
計算結果

- ・ダストサンプリング濃度
- ・多地点連続濃度(^{137}Cs)
- ・日降下量
- ・航空機モニタリング沈着量

気象計算

気象場A

気象場B

気象場C

拡散計算

拡散計算

拡散計算

出力データ
ベースA

出力データ
ベースB

出力データ
ベースC

放
1
放
2
放出条件
3

放
1
放
2
放出条件
3

放
1
放
2
放出条件
3

放
1
放
2
放出条件
3

放
1
放
2
放出条件
3

放
1
放
2
放出条件
3

濃
A1
濃
A2
濃度・沈着量
A3

濃
B1
濃
B2
濃度・沈着量
B3

濃
C1
濃
C2
濃度・沈着量
C3

最適解を決定

気象場B

放出条件
3

濃度・沈着量
B3

統計解析(ベイズ推計)

環境測定データ

拡散計算結果と
測定データの
誤差が最小となる
組合せを探索

^{137}Cs と ^{131}I の放出量推定値 (Terada et al., in print, J. Environ. Radioactiv.)

Katata et al. 2015をChino et al. 2016に基づき一部改訂

初期放出量の区間で平均化

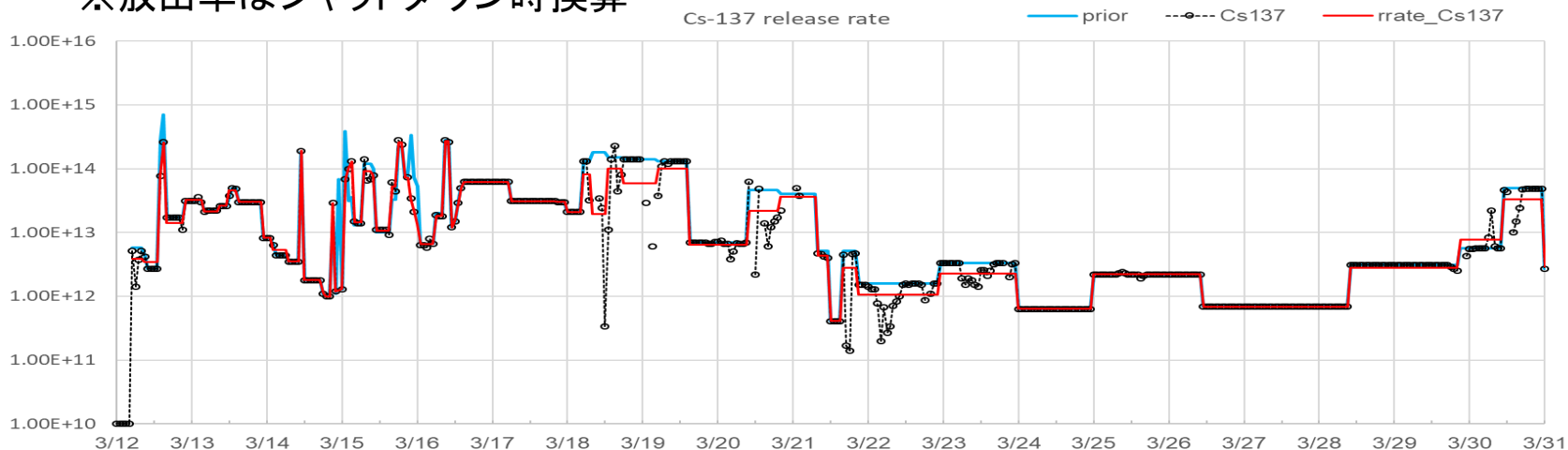
※放出率はシャットダウン時換算

初期放出量

整理前

整理後

^{137}Cs

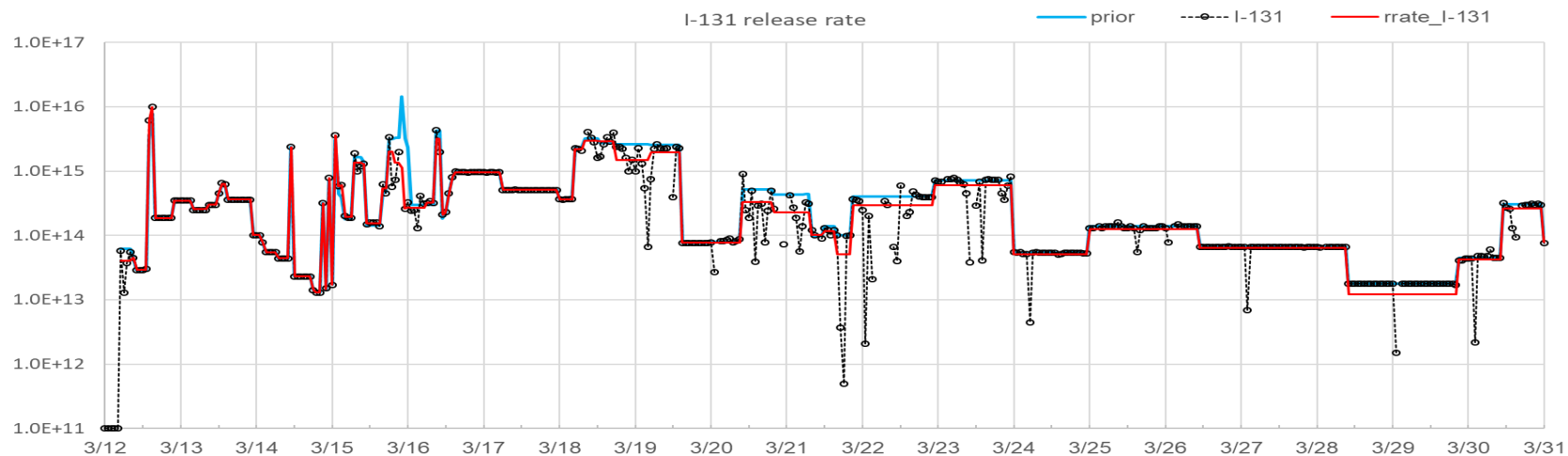


初期放出量

整理前

整理後

^{131}I



月/日(2011年)

➤ 地表沈着分布

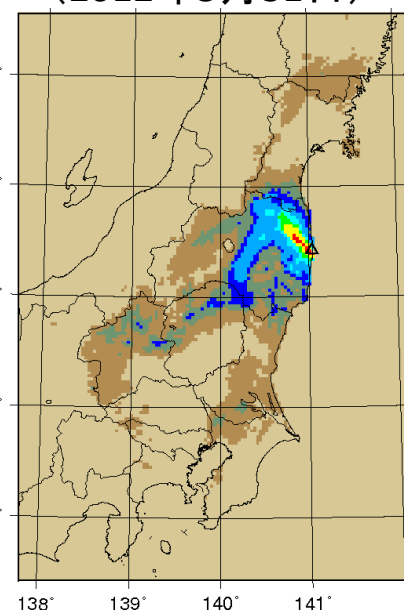
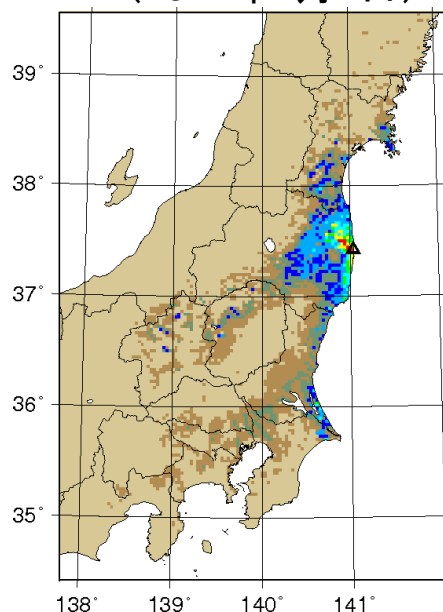
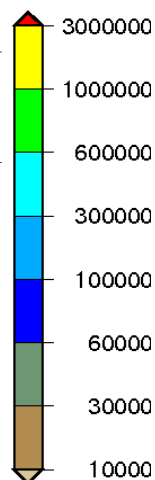
¹³⁷Cs

計算値

(2011年4月1日)

航空機モニタリング

(2012年5月31日)

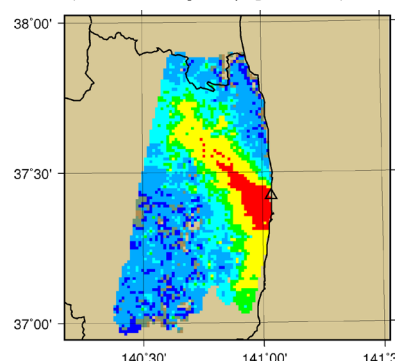
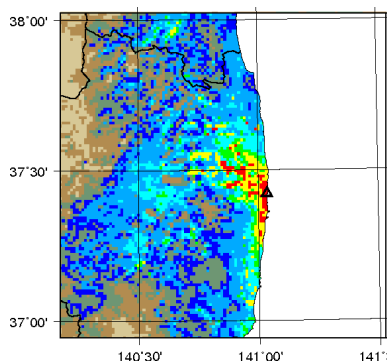

Bq m⁻²

¹³¹I

計算値

(2011年4月1日)

航空機モニタリング

(2011年4月1日)



➤ ¹³⁷Cs総沈着量(PBq)

Katata et al.
(2015)

本研究

航空機
モニタリング

3.7

2.1

2.4

※東日本域の計算領域内総量

➤ ¹³⁷Cs大気中濃度

FA2
(%)

FA5
(%)

FA10
(%)

相関
係数

Katata et
al. (2015)

12.9

29.4

35.9

0.54

本研究

22.7

39.7

47.3

0.60

※6時間平均値でSPMデータと比較

【背景】

■ WSPEEDI-IIを用いた福島第一原子力発電所事故への対応

- 放出量推定と大気拡散・地表沈着過程の解析のため

様々な条件の大気拡散計算を多数実施

■ 従来の計算手法の課題

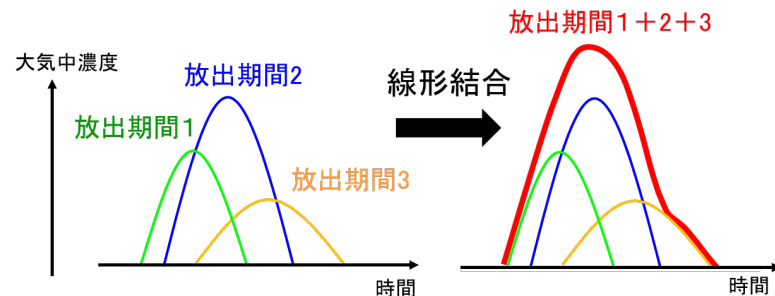
- 詳細・複雑な数値シミュレーションモデル利用のため、計算コスト大きい
- 気象計算条件や放出条件を変更する度に拡散モデルの実行が必要

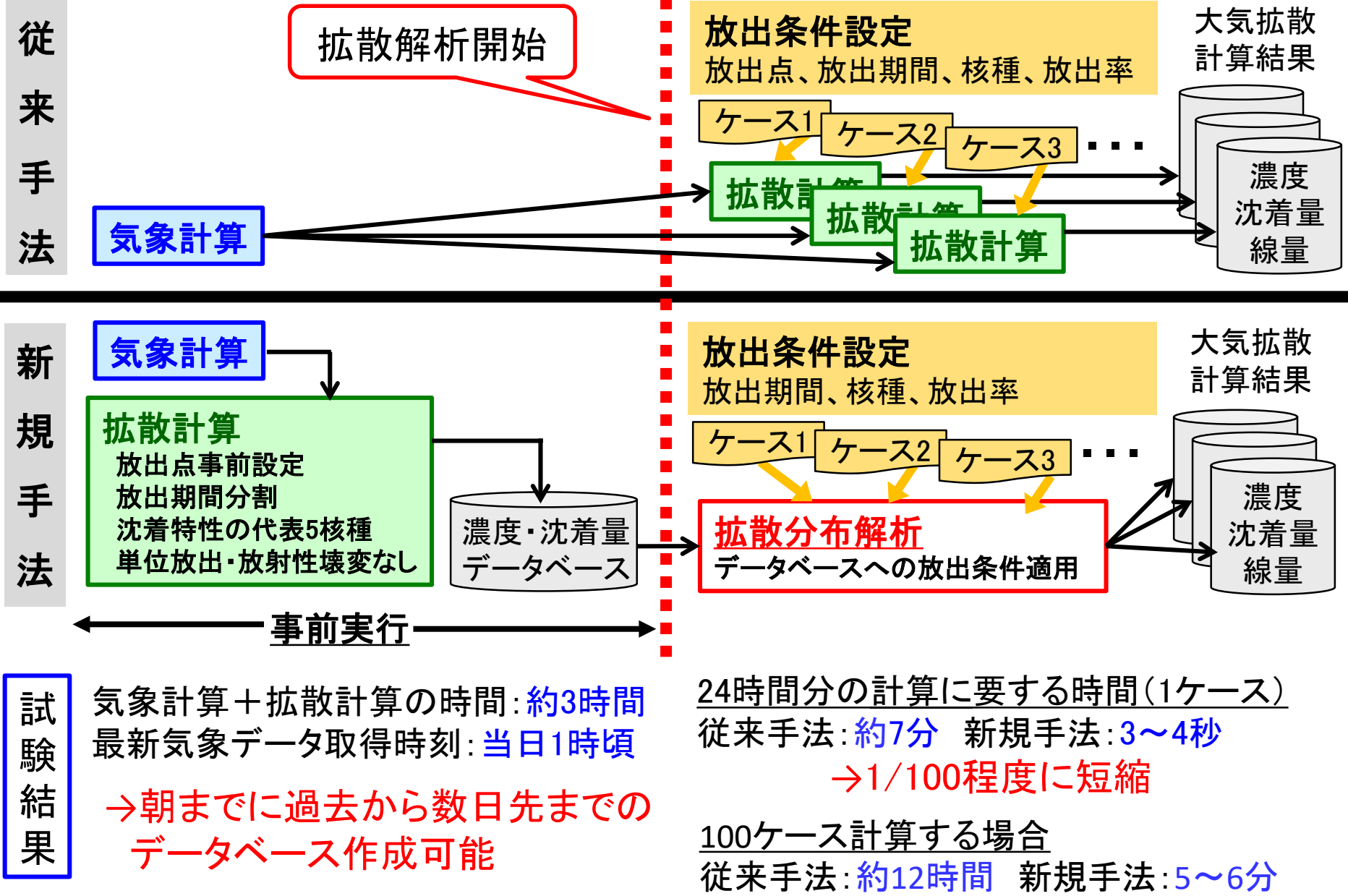
→様々な条件による多数ケースの大気拡散計算結果の比較・検討が困難

任意の放出条件の計算結果を効率的に取得可能な手法を開発

新規手法の基本原則

- ✓ 放出地点: 事前に設定可能(原子力施設)
- ✓ ある放出条件の計算結果
= 放出期間を分割した計算結果の線形結合
- ✓ 分割した放出期間ごとの、ある時刻・地点の拡散計算結果への寄与を事前に作成可能





気象庁数値予報
データ(GPV)

- 毎日定常的に実行し、解析データを連続的に蓄積
- 任意の放出条件に対する計算結果を即座に取得可能

オンライン定期取得

実行環境（ハードウェア）
Linux-PCまたはクラウドサーバ

計算機能

自動実行

気象モデル:WRF
局地域詳細気象場予測

3次元気象場

自動実行

拡散モデル:GEARN
単位放出の拡散計算

拡散計算出力

- ・ 拡散場：放出期間分割（1時間毎）
× 放出高度（スタック、建屋）の
全ケース単位放出計算の出力

解析機能

放出条件設定
放出率時系列の設定
(任意条件、福島ケース利用可)

放出率時系列

拡散分布解析
放出率時系列による拡散分布計算

濃度、沈着量、降下量、
空間線量率の時間空間分布

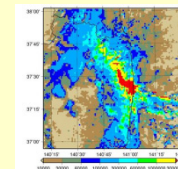


WEBブラウザ
による操作

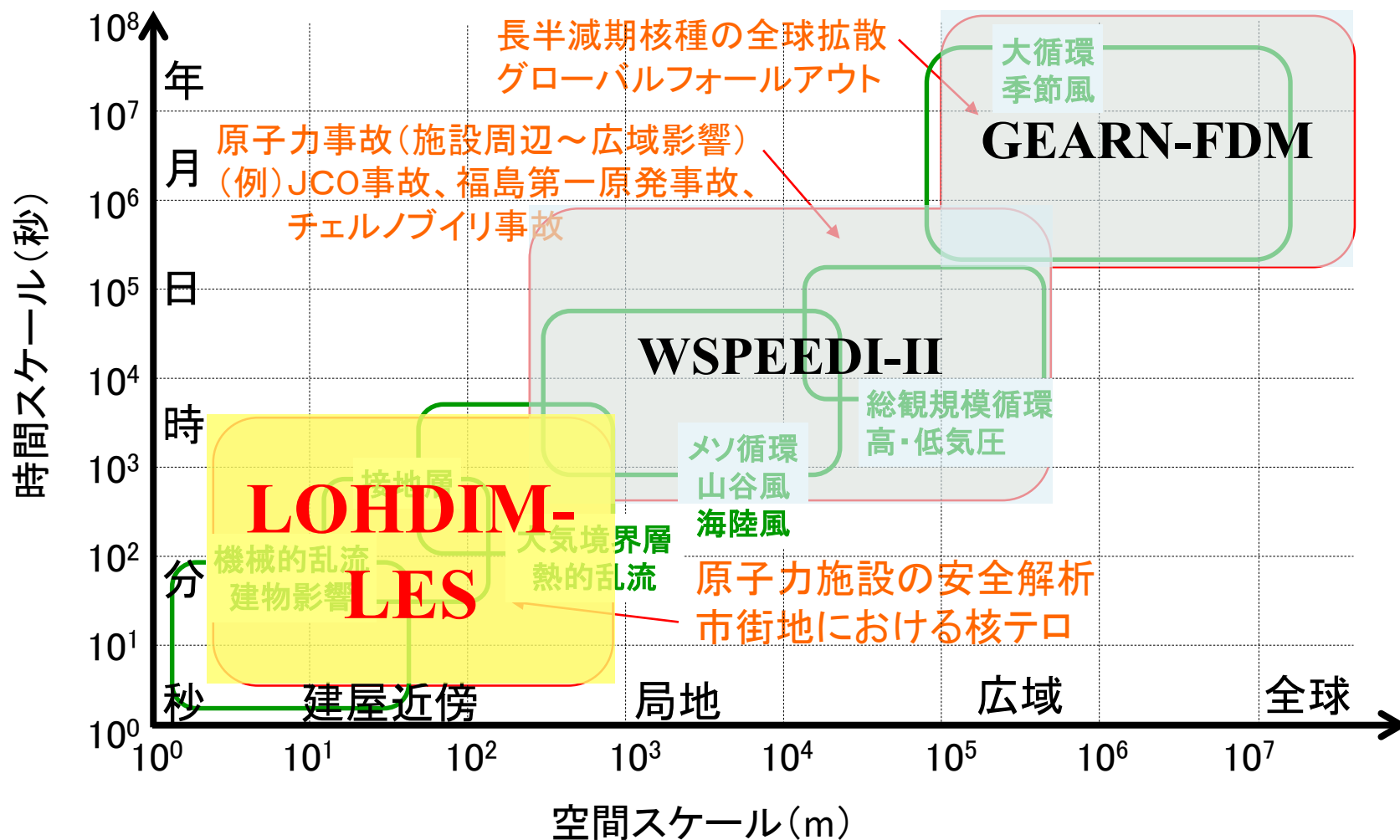
WEB-GUI

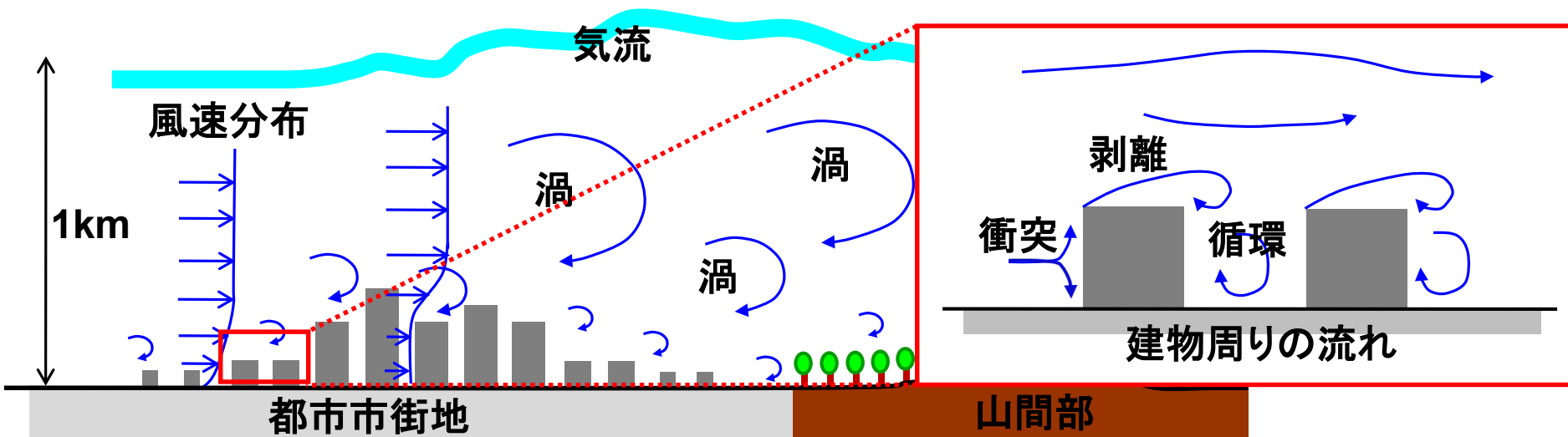
- ・ 設定・処理実行
- ・ 結果出力：
水平分布図
- 単位放出計算
- 任意放出条件
Web-GISの活用

沈着分布：



3. 局所域高分解能大気拡散モデル: LOHDIM-LES





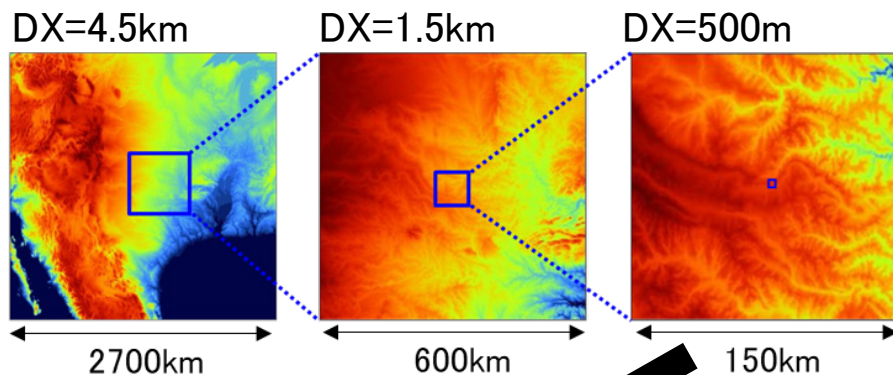
- 大気は地表面起伏・地表面障害物との摩擦により常に乱流状態
- 建物周りでは流れの衝突・剥離・循環が起こり、非常に複雑

モデリング手法	内容	特徴
DNS (<u>D</u> irect <u>N</u> umerical <u>S</u> imulation)	全てのスケールの渦を直接計算	全スケールの渦を解像するため、予測精度はかなり高い。計算負荷の問題から、実用問題への適用は不可能である。
RANS (<u>R</u> eynolds- <u>A</u> veraged <u>N</u> avier- <u>S</u> tokes)	平均成分を直接計算、変動成分をモデル化	計算負荷は小さく、最も実用的に用いられている。建物の剥離乱流挙動を正確に捉えられない。
LES (<u>L</u> arge- <u>E</u> ddy <u>S</u> imulation)	大きい渦を直接計算、小さい渦をモデル化	計算負荷は高く、実用問題への適用には課題がある。建物周辺の複雑乱流挙動を正確に再現できる。

- 非定常乱流解析に優れたLarge-Eddy Simulation (LES)を使用
- 数mオーダー計算格子で地表面形状を精緻に解像し、建物周りの乱流を詳細計算
- 風洞実験データにより様々な建物配列や温度成層条件下での拡散を検証
- 気象モデルWRFとの結合により任意の現実象条件下での大気乱流を再現

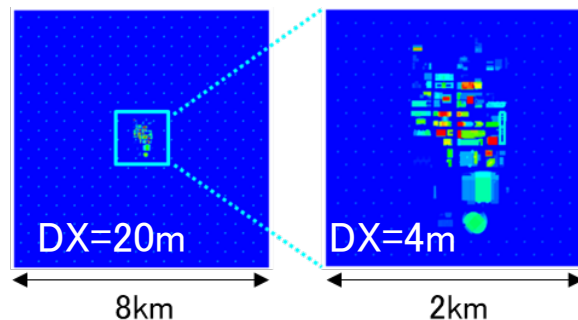
適用例：2003年米国オクラホマシティー野外拡散実験

気象モデルWRFによるダウンスケーリング

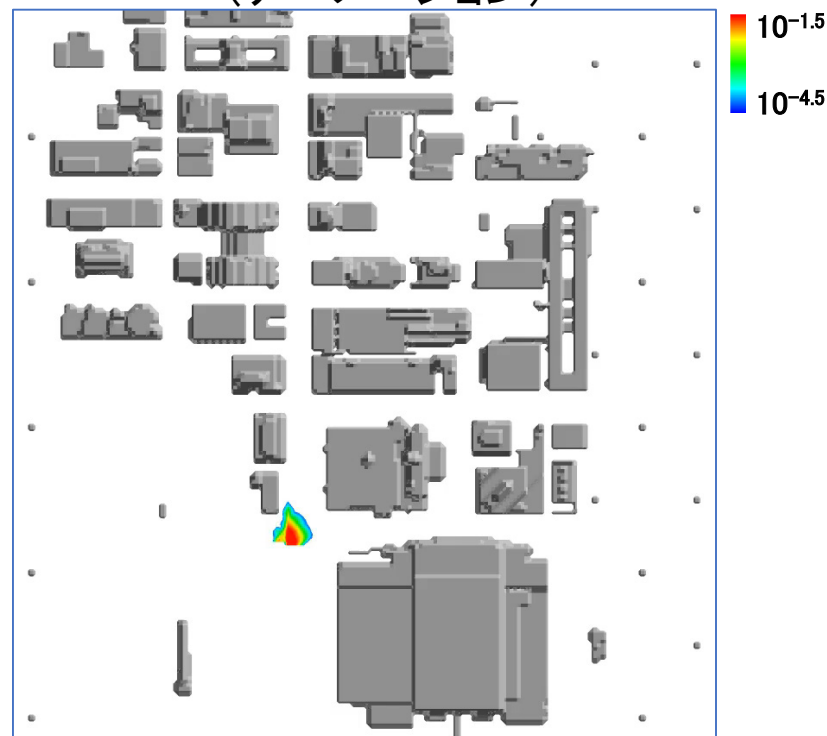


流入境界条件

LOHDIM-LES
計算領域



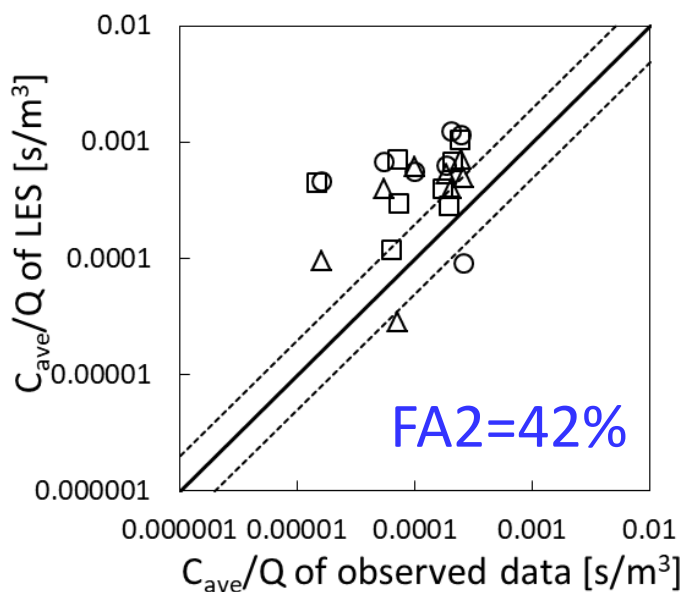
トレーサガス大気中濃度の計算結果
(アニメーション)



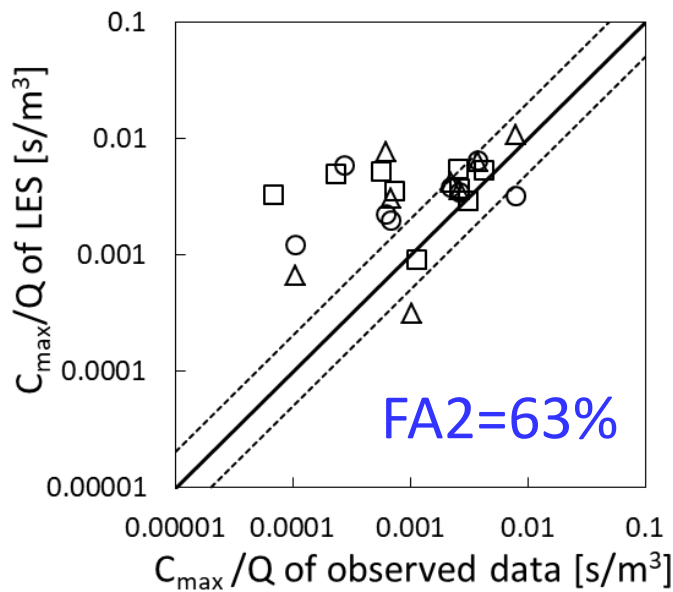
➤ オクラホマシティー拡散実験時の大気中濃度測定値との比較

✓ 30分連続放出×3ケース(放出開始 ○:9時 △:11時 □:13時)

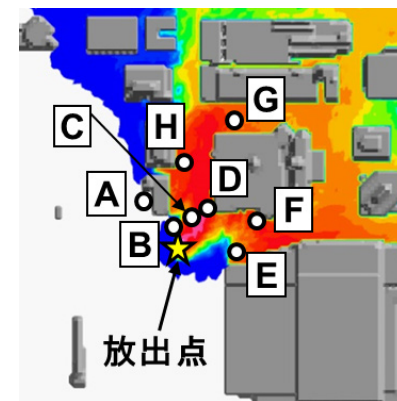
平均値(30分間)



瞬間最大値



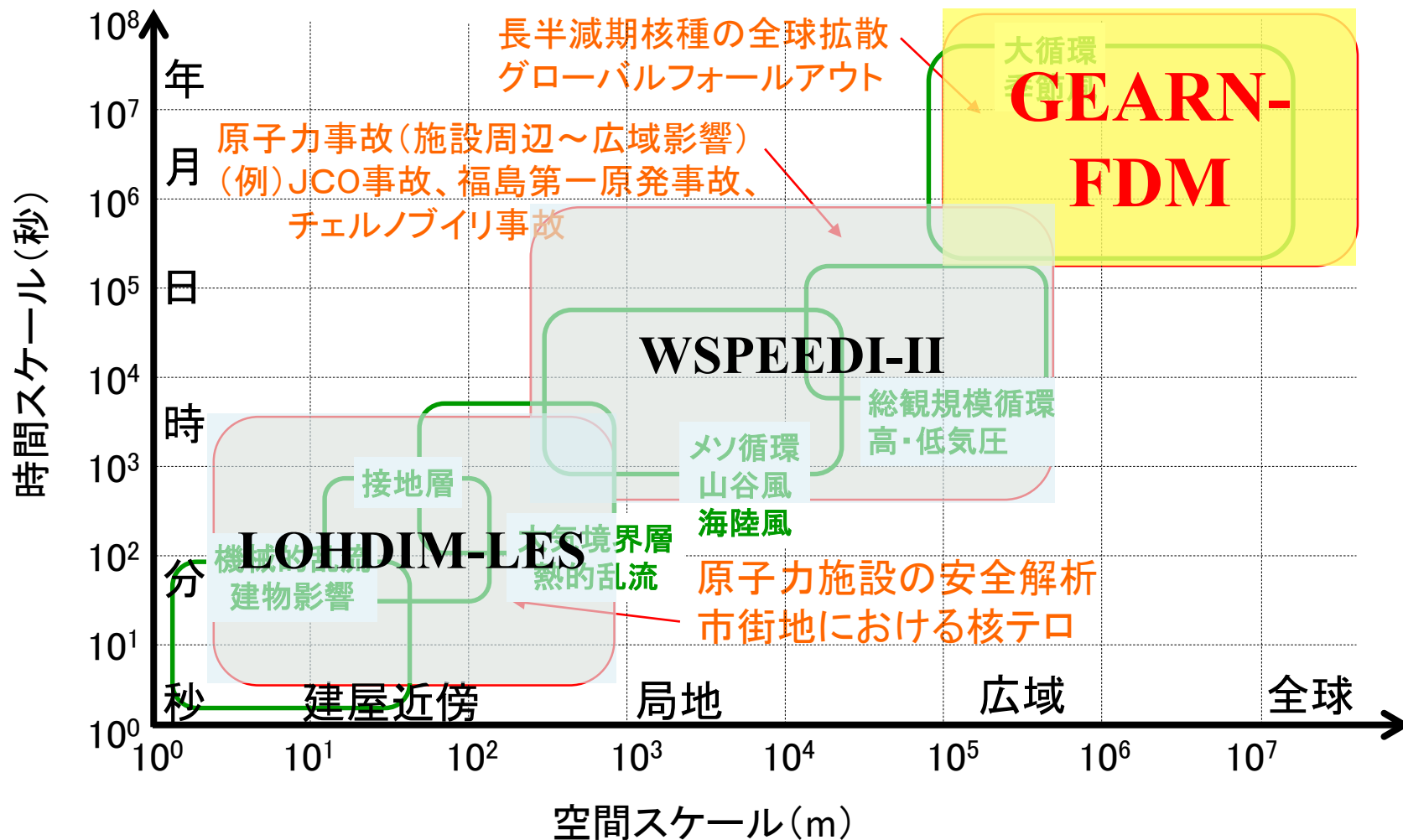
濃度測定地点



平均値と瞬間最大値ともに高レベル域で良好な再現性

有害物質拡散災害の事前対策・事後解析に有効であることを実証

4. 全球大気拡散モデル: GEARN-FDM



■ ヨウ素-129 (¹²⁹I)

- ✓ ヨウ素の放射性同位体(半減期1570万年)
- ✓ 人為起源:再処理施設からの放出(総量5640kg)
- ✓ 多様な化学形(有機態ガス、無機態ガス、粒子態)

…環境中で複雑なふるまい:理解不十分

目的

環境中における動態の理解

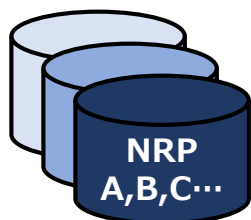
■ ヨウ素輸送モデル

- ✓ 差分型全球大気拡散モデルGEARN-FDMに¹²⁹Iの物理・化学過程を導入して構築

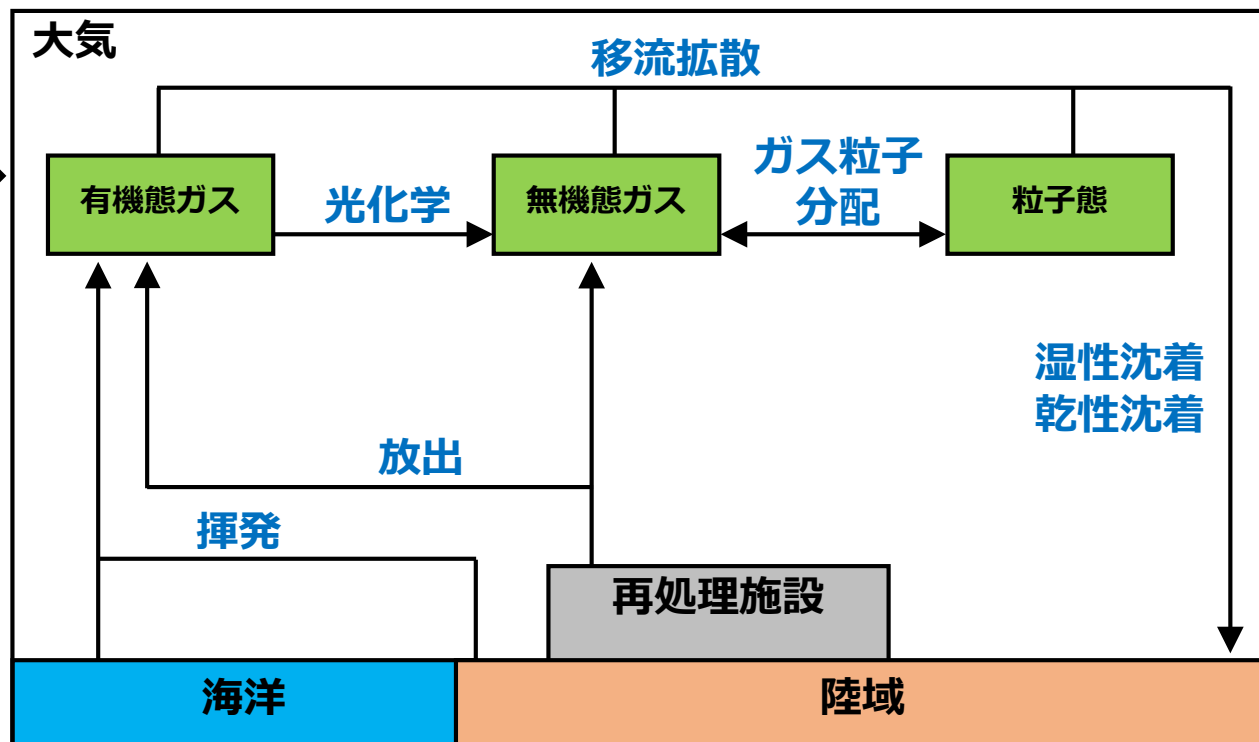
気象モデルWRF

- 東西風
- 南北風
- 鉛直風
- 気温
- 海水温度
- 降水量
- 鉛直拡散係数

人為起源放出
(再処理施設)



ヨウ素輸送モデル

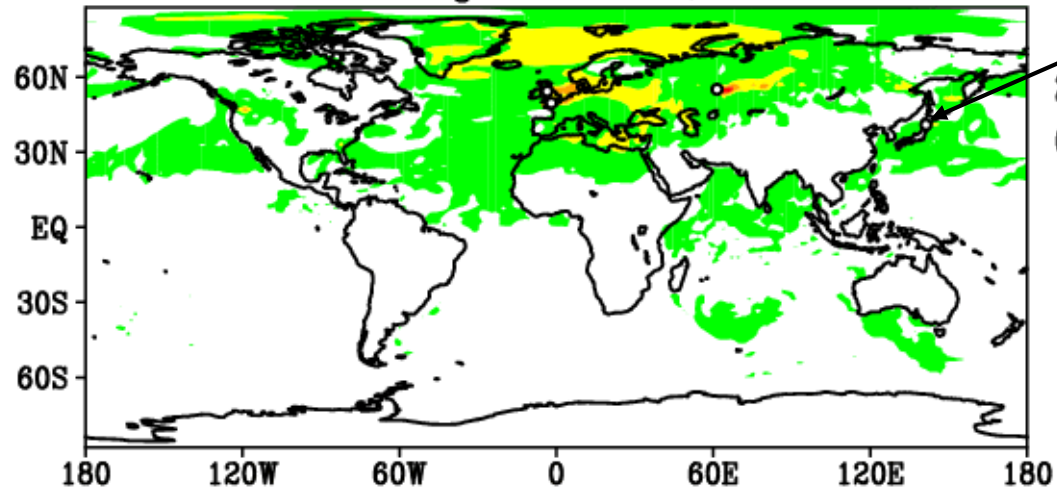


モデル化された¹²⁹I循環に係る諸過程

計算期間: 2006年~2010年の5年間
(アニメーションは2007年1月1日~)

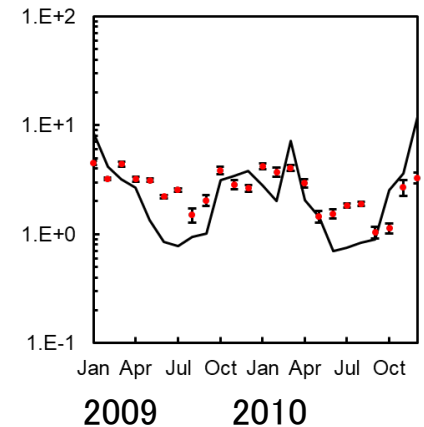
● 観測
— モデル

Air concentration of gaseous I-129, surface level



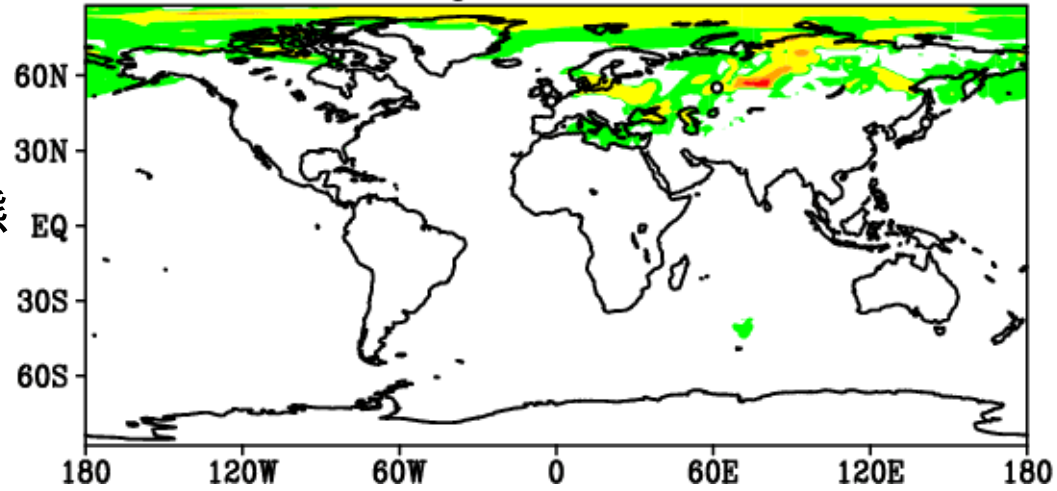
ガス態

2007/01/01 00:00(UTC) (nBq m⁻³) ガス態濃度



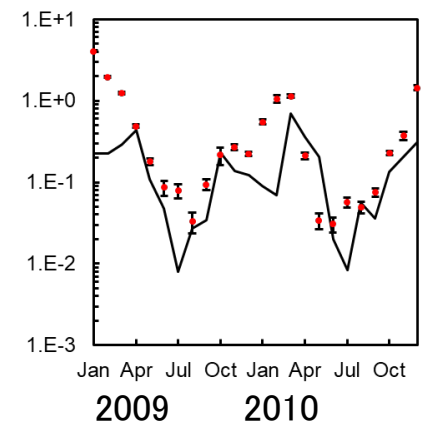
六ヶ所村における
観測値との比較

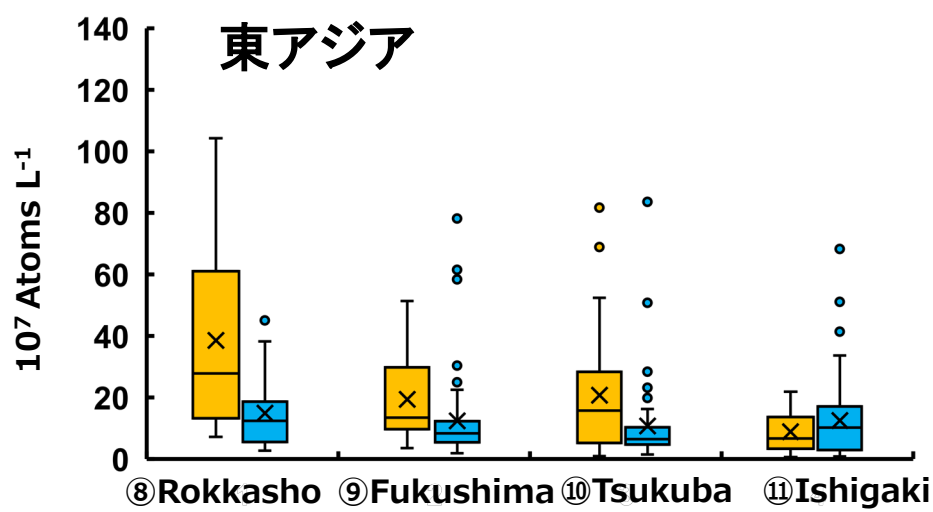
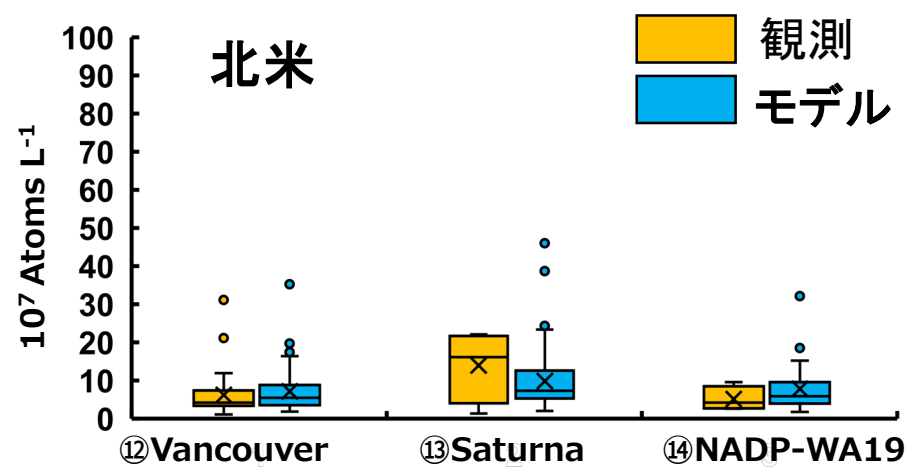
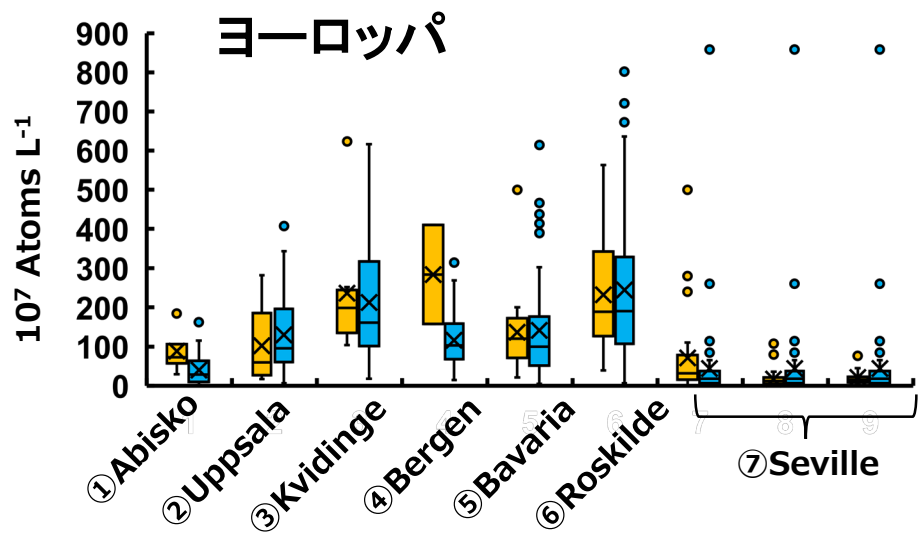
Air concentration of particulate I-129, surface level



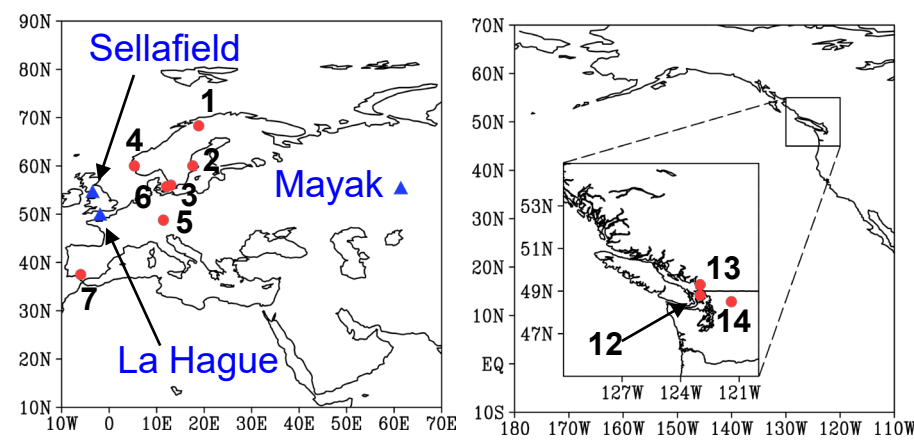
粒子態

(nBq m⁻³) 粒子態濃度





観測(●)及び再処理施設(▲)の位置



➤ 降水中 ^{129}I 濃度の北半球における地域分布を概ね再現

■ 建屋近傍から全球まで様々なスケールの事象を対象として 大気拡散予測モデルを開発

➤ 大気拡散予測システム WSPEEDI-II

- ✓ 福島第一原発事故の大気放出量推定と大気拡散解析に適用
- ✓ 任意の放出条件の結果を即座に取得する新規計算手法の開発
→大気拡散データベースシステムに高度化

➤ 局所域大気拡散モデル LOHDIM-LES

- ✓ 建物の影響を受けた気流場・大気拡散の非定常・複雑分布を再現
- ✓ 気象モデルとの融合計算手法による市街地詳細拡散シミュレーション

➤ 全球大気拡散モデル GEARN-FDM

- ✓ ヨウ素の物理・化学過程を考慮した全球拡散計算が可能
- ✓ 欧州再処理施設起源¹²⁹Iの全球輸送解析

■ 今後の展開

➤ 大気拡散データベースシステムの応用と拡張

- ✓ 様々な施設への適用による原子力防災における活用法の検討
- ✓ 将来予測計算の不確実性評価手法の開発

➤ ブルーム可視化システムの開発

- ✓ ETCCガンマ線測定と大気拡散計算の融合により3次元濃度分布を再構築