

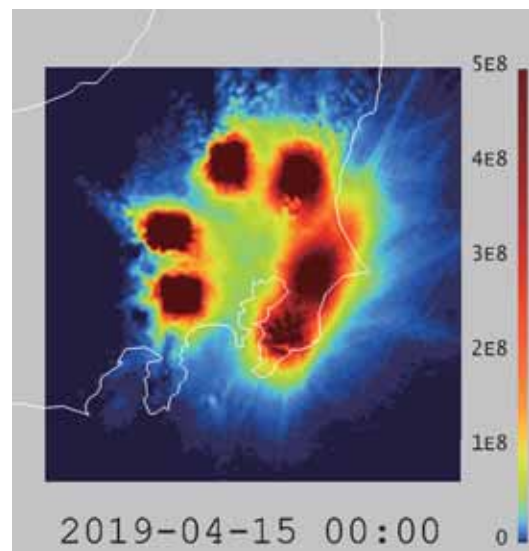
オンラインセミナー 防災・環境シミュレーション ～気象と防災シミュレーションの動向～

2021年3月26日(金)開催

プログラム

- | | | |
|----|--|----|
| 1. | アドバンスソフト株式会社のご紹介 主催者あいさつ | 1 |
| | 代表取締役社長 松原 聖 | |
| 2. | 招待講演
「気象モデル WRF の特徴と研究動向」 | 5 |
| | 筑波大学 計算科学研究センター 教授 日下 博幸 様 | |
| 3. | 気象・河川シミュレーションに関する取り組みと事例紹介 | 33 |
| | 熱流動エンジニアリングセンター 高橋 邦生 | |
| 4. | 防災シミュレーション事業の紹介 | 59 |
| | 熱流動エンジニアリングセンター 富塚 孝之 | |

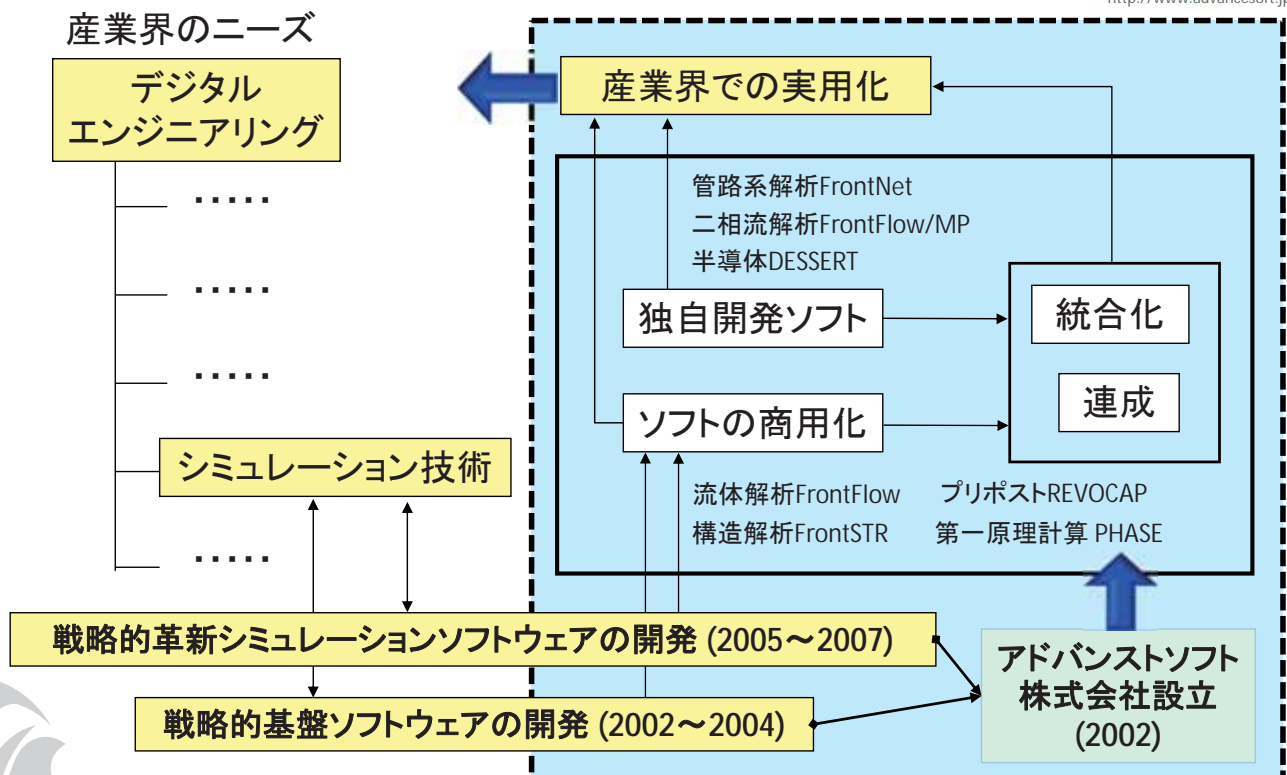
 AdvanceSoft



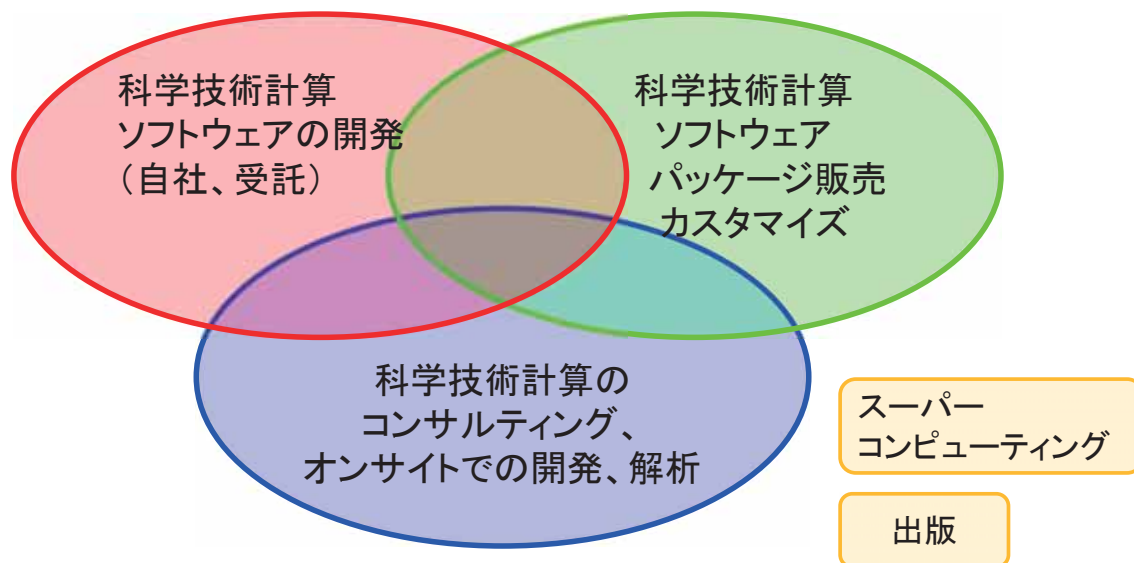
アドバンスソフト株式会社のご紹介

防災・環境シミュレーション ～気象と防災シミュレーションの動向～
 2021年 3月 26日 (金)
 アドバンスソフト株式会社

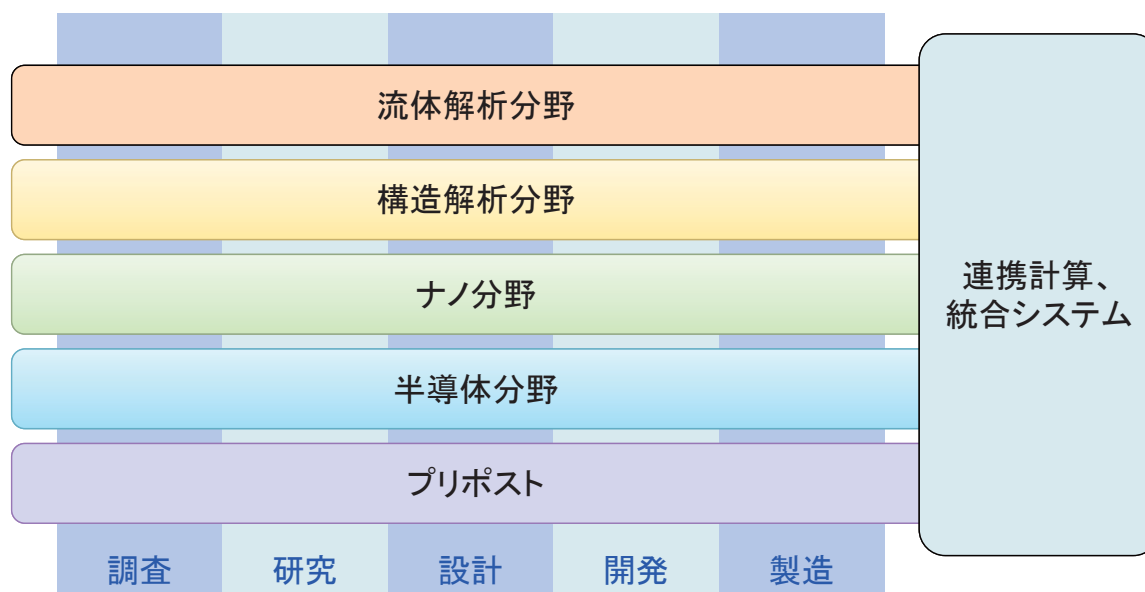
アドバンスソフトとは



アドバンスソフトがご提供するサービス



科学技術計算ソフトウェアの開発を基礎とした、
科学技術計算に関する様々なソリューションをご提供します。



産業の主要な分野のあらゆるフェーズで直面する課題に対し、
科学技術計算によるソリューションをご提供します。

ソフトウェアご紹介

<p>第一原理計算ソフトウェア Advance/PHASE</p> <p>密度汎関数理論に基づき、物質の性質を原子・分子レベルから解析する第一原理計算ソフトウェアです。</p> <p>ナノ材料 GUI付属</p>	<p>ナノ材料解析統合 GUI Advance/NanoLabo</p> <p>材料解析ソフトウェア QuantumESPRESSO と LAMMPS に対応した統合 GUI です。</p> <p>ナノ材料 API付属</p>	<p>流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red</p> <p>非圧縮性から圧縮性流れまで、広範囲で複雑な流れに対応した汎用3次元流体解析ソフトウェアです。</p> <p>流体</p>	<p>圧縮性流体解析ソルバー Advance/FOCUS-i</p> <p>非構造格子に対応した圧縮性流体解析ソルバーです。特に超音速や超音速の流れに適しており、高い並列化効率で計算出来ます。</p> <p>流体</p>
<p>大規模3次元 TCAD システム Advance/TCAD</p> <p>超微細半導体デバイスからパワーデバイスまで、高度な機能と使いやすい GUI を備えた3次元 TCAD システムです。</p> <p>半導体デバイス GUI付属</p>	<p>ニューラルネットワーク分子力学システム Advance/NeuralMD</p> <p>Neural Network Potential に基づいた分子力学のソフトウェアです。第一原理計算の結果を教師データとして分子力場を作成します。</p> <p>ナノ材料 AI・機械学習</p>	<p>気流二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP</p> <p>汽泡と凝縮を伴う気液二相流の流動特性や伝熱特性を3次元で解析するソフトウェアです。</p> <p>流体</p>	<p>管路系流体渦流解析ソフトウェア Advance/FrontNet</p> <p>配管や流体機器から成る管路系内流体に対する1次元渦流解析の実用的なソフトウェアです。</p> <p>流体 GUI付属</p>
<p>大規模電磁波解析ソフトウェア Advance/ParallelWave</p> <p>マクスウェル方程式をFDTD法で3次元的に解く電磁波解析ソフトウェアです。アンテナの電波解析から光の干渉や回折を考慮した光波解析まで幅広く適用できます。</p> <p>光波・電磁波</p>	<p>構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR</p> <p>固体の変形や熱伝導を、有限要素法を用いた3次元で解析するソフトウェアです。</p> <p>構造</p>	<p>大気気象影響予測システム Advance/Emerg</p> <p>大気気象物質の挙動予測と影響評価のためのソフトウェアシステムです。</p> <p>流体 GUI付属</p>	<p>深層学習ツール Advance/iMacle</p> <p>機械学習のうち、ニューラルネットワークによる深層学習に特化。最小限の機能に絞り込んだ比較的軽いツールです。</p> <p>AI・機械学習</p>
<p>汎用APIゴストプロセス Advance/REVOCAP</p> <p>解析の一連の流れをスムーズに行う事を実現した汎用APIゴストプロセスです。</p> <p>API付属</p>	<p>音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise</p> <p>環境騒音、機器内の共振等における音場を有限要素法を用いた3次元で解析するソフトウェアです。</p> <p>音響</p>	<p>自社による開発（国プロ含む） 開発チームによる質の高いサポートサービス カスタマイズや機能追加も応相談 並列数無制限（追加料金なし）</p>	

Copyright ©2021 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

5

ソフトウェアの解析事例

解析事例Webページをご覧ください。

アドバンスソフト 事例集

検索

<http://case.advancesoft.jp>

- ソフトウェア名からだけでなく、産業分野別、解析分野別の検索が可能となりました。
- 最新の事例を掲載しました。今後も逐次最新事例を紹介します。

産業分野別	解析分野別
自動車・運輸	流体
材料・化学	爆発・燃焼
産業機械	構造
航空宇宙	振動音響
エレクトロニクス	ナノ・バイオ
建設土木	プリポスト
原子力	半導体デバイス
エネルギー	光・電磁波
環境・防災	

Copyright ©2021 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

6

facebook、YouTubeでも関連記事を掲載中

<http://www.facebook.com/advancesoft.jp>

<http://www.youtube.com/user/advancesoft>



気象モデルWRFの特徴と研究動向



日下博幸 (Kusaka, Hiroyuki)
筑波大学 計算科学研究センター



本講演資料は、このセミナー参加者のみに提供します。
未発表の最新成果を含んでいることから、本講演資料の再配布・無断転載を
禁止します。ご理解いただけるようお願いいたします。

講演者略歴

- 1997年 筑波大学大学院修士課程修了
- 1997～2006年 (財)電力中央研究所
- 2002年 博士(理学)を筑波大学より授与
- 2002年～2004年 アメリカ国立大気研究センター(NCAR)に滞在し
WRF開発プロジェクトに参加
- 2006年～現在 筑波大学計算科学研究センター



- 2011年～2013年 国際都市気候学会 (IAUC) 理事
- 2020年 Kusaka et al (2021) がBoundary-Layer Meteorology, Springerより、
過去50年間の同誌論文中、最も多く引用され歴史的な貢献をした論文トップ10に選出
- 2021年 アメリカ気象学会 (AMS) The Helmut E. Landsberg Award 2021 受賞
- これまでの査読付き論文126編、解説総説50編、指導院生70名以上



本日の講演内容

- WRFモデルの概要
- WRFモデルの応用
- シミュレーション結果の解釈とその注意点



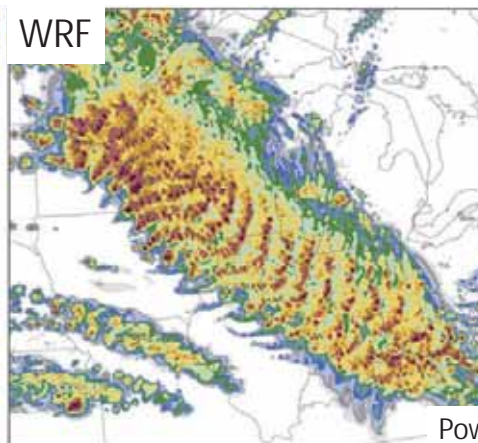
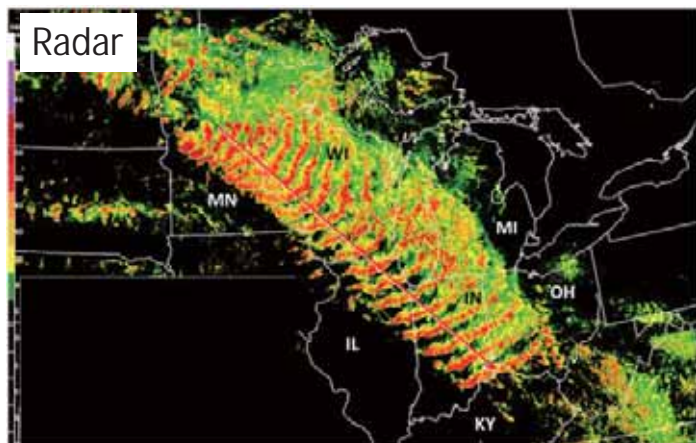
WRFモデルの概要

どのような特徴があるのだろうか？

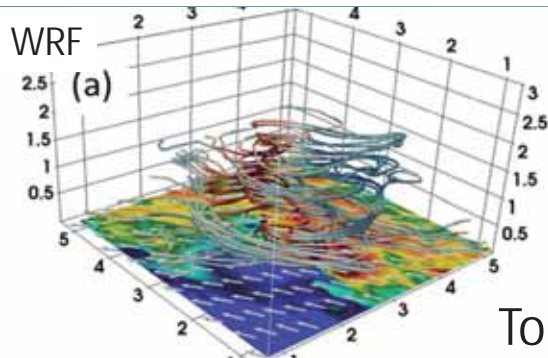
なぜ、世界中で使われているのか？

WRFモデルとは？

- 正式名称は、Weather Research and Forecasting Model
- いわゆる数値予報モデル(NWP). 領域気象モデル、領域気候モデルとも言う
- アメリカ国立大気研究センター(NCAR)が開発したARW-WRFと米国環境予測センター(NCEP)が開発したNMM-WRFがある。日本でWRFと言えば、通常はARWを意味する。
- 2000年にV1がリリース、現在はV4.1

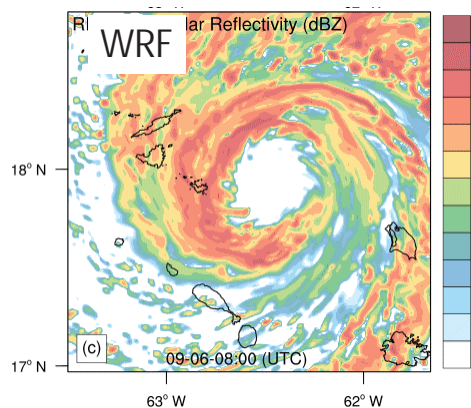


Powers et al (2017, BAMS)



Wu et al. (2019, ACP)

Tornado-scale
to Continental-scale



マイクロスケールから
シノプティックスケールまで
様々な気象現象を
再現、予測できる

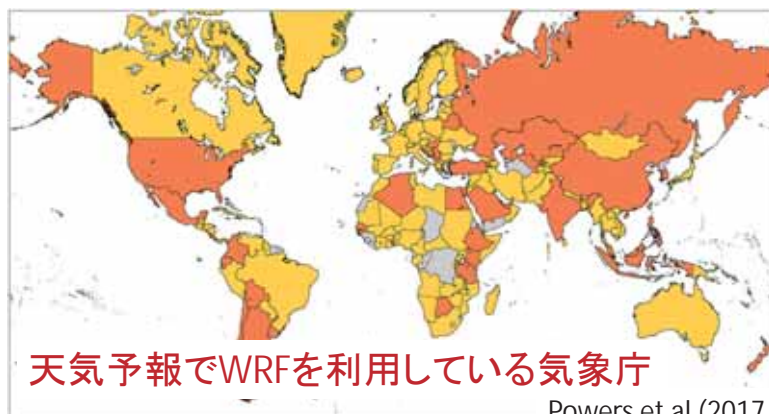
Cece et al. (2021, Nat. Hazards Earth Syst. Sci)



WRF webpage

WRFモデルとは？

- **世界で最も広く使われている気象モデル**
- 160か国、48,000人のユーザ数
- 1,340の研究機関、11,700人の研究者、26,500の論文(2015年現在)
- アメリカ、中国、インド、韓国、台湾、マレーシア、フィリピン、インドネシア、ベトナム、メキシコなどの気象庁が天気予報に利用
- **日本の民間気象会社(ウエザーニューズや日本気象協会)も天気予報に利用**



WRFは、なぜ世界中で使われているのか？

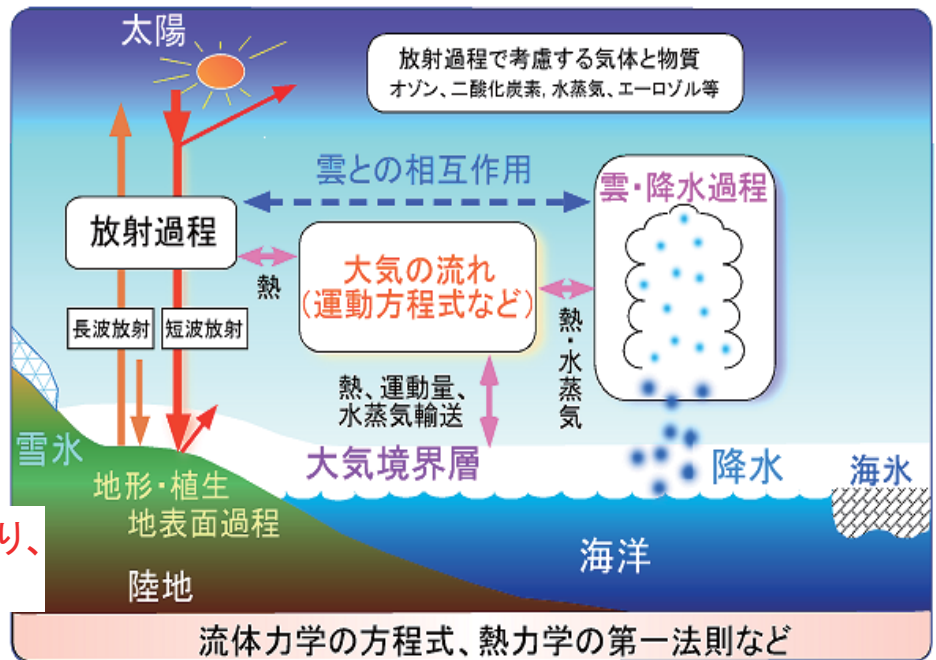
- **さまざまなコンピュータ上で動く、フリーソフト。商用利用、改変もOK**
- 気象学分野における世界トップレベルの研究所(NCAR)と現業予報機関(NCEP)が共同で開発 → **高い精度、高い汎用性、豊富な実績**
- 世界シェアNo.1 → さまざまな物理スキームやデータ同化システムが導入される
- さまざまなソフト(Python、GrADS、VAPOR、AVS)で計算結果の可視化や解析ができる
- NCEP-FNL, NCEP-Reanalysis, NCEP-GFS, NCEP-GEFS, ERA-interim, ERA5, JMA-GSM, JRA55など**世界各国の客観解析値や予報値**が初期値、境界値として使える
- **豊富なユーザマニュアル**
- 初心者向けの講習会(年2回開催)

• WRFモデルは、大気の流れ(力学過程) + 物理過程で構成

物理過程とは

- 太陽放射
- 大気放射
- 土壌・植生・雪氷・都市上での熱・水・運動量収支
- 大気境界層乱流
- 雲微物理(雲内の相変化)

上記それぞれに対してモデルがあり、大気モデルに組み込まれている



エアロゾルや温室効果ガスが放射に与える影響も考慮されている

気象庁HPより

WRFモデルの基礎方程式系(実際は、座標変換されている)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + Diff.u + F_u \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + Diff.v + F_v \quad p = \rho RT$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + Diff.w + F_w \quad \left(\rho = \frac{p_0}{R\theta} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{c_v/c_p} \right)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = Diff.\theta + \frac{L}{C_p} (CNvc - EVrv)$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} + u \frac{\partial q_v}{\partial x} + v \frac{\partial q_v}{\partial y} + w \frac{\partial q_v}{\partial z} = Diff.q_v - CNvc + EVrv$$

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} + u \frac{\partial q_c}{\partial x} + v \frac{\partial q_c}{\partial y} + w \frac{\partial q_c}{\partial z} = Diff.q_c - AC - CC + CNvc$$

$$\frac{\partial q_r}{\partial t} + u \frac{\partial q_r}{\partial x} + v \frac{\partial q_r}{\partial y} + w \frac{\partial q_r}{\partial z} = Diff.q_r + AC + CC - EVrv$$

力学モデル

熱と水蒸気を変化

雲微物理モデル

(注) 左式は暖かい雨モデルの場合。実際には、次のページにあるような冷たい雨モデルが使われる

基礎方程式について、詳しくは、日下(2009, ながれ)「領域気象モデルWRFについて」もしくはWRFのmanualを参照

$$\partial_t U + (\nabla \cdot \mathbf{V}u) + \mu_d \alpha \partial_x p + (\alpha/\alpha_d) \partial_\eta p \partial_x \phi = F_U \quad (3) \quad \text{運動方程式} \quad \mathbf{V} = \mu_d \mathbf{v}, \quad \Omega = \mu_d \dot{\eta}, \quad \Theta = \mu_d \theta, \quad Q_m = \mu_d q_m$$

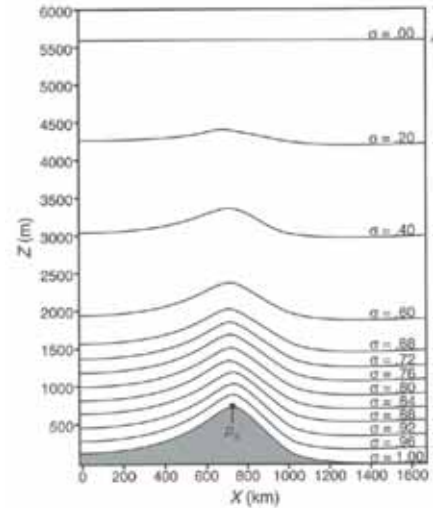
$$\partial_t V + (\nabla \cdot \mathbf{V}v) + \mu_d \alpha \partial_y p + (\alpha/\alpha_d) \partial_\eta p \partial_y \phi = F_V \quad (4)$$

$$\eta = (p_{dh} - p_{du})/\mu_d$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot \mathbf{V}w) - g[(\alpha/\alpha_d) \partial_\eta p - \mu_d] = F_W \quad (5)$$

$$\mu_d = P_{ds} - P_{dt}$$

地形に沿った質量座標系



日下(2009, ながれ)

$$\partial_t \mu_d + (\nabla \cdot \mathbf{V}) = 0 \quad (6) \quad \text{連続の式}$$

$$\partial_t \phi - \mu_d^{-1} [(\mathbf{V} \cdot \nabla \phi) - gW] = 0 \quad (7) \quad \text{ジオポテンシャルの時間変化の式}$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot \mathbf{V} \theta) = F_\Theta \quad (8) \quad \text{熱力の式}$$

$$\partial_t Q_m + (\nabla \cdot \mathbf{V} q_m) = F_{Q_m} \quad (9) \quad \text{水物質混合比の式}$$

$$\partial_\eta \phi = -\alpha_d \mu_d \quad (10) \quad \text{静力学平衡の式}$$

$$p = p_0 (R_d \theta_m / p_0 \alpha_d)^{\gamma} \quad (11) \quad \text{状態方程式}$$

付録1: WRFの基礎方程式系

2.3節の基礎方程式系にマップスケールファクター m を導入し、風の3成分と鉛直 η 速度を以下のように定義しなおす。

$$(m_x, m_y) = \frac{(\Delta x, \Delta y)}{\text{distance on the earth}}$$

$$U = \mu_d u / m_y, \quad V = \mu_d v / m_x,$$

$$W = \mu_d w / m_y, \quad \Omega = \mu_d \dot{\eta} / m_y$$

さらには、状態変数を以下のように静力学平衡が成り立つ基本場と変動成分に分ける。

$$p = \bar{p}(z) + p', \quad \phi = \bar{\phi}(z) + \phi',$$

$$\alpha = \bar{\alpha}(z) + \alpha', \quad \mu_d = \bar{\mu}_d(x, y) + \mu'_d$$

これらの結果、基礎方程式系は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \partial_t U + m [\partial_x (Uu) + \partial_y (Vu)] + \partial_\eta (\Omega u) \\ + (\mu_d \alpha \partial_x p' + \mu_d \alpha' \partial_x \bar{p}) \\ + (\alpha/\alpha_d) \mu_d \partial_x \phi' + \partial_\eta p' \partial_x \phi - \mu'_d \partial_x \phi = F_U \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial_t V + m [\partial_x (Uv) + \partial_y (Vv)] + \partial_\eta (\Omega v) \\ + (\mu_d \alpha \partial_y p' + \mu_d \alpha' \partial_y \bar{p}) \\ + (\alpha/\alpha_d) \mu_d \partial_y \phi' + \partial_\eta p' \partial_y \phi - \mu'_d \partial_y \phi = F_V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial_t W + m [\partial_x (Uw) + \partial_y (Vw)] + \partial_\eta (\Omega w) \\ - m^{-1} g (\alpha/\alpha_d) [\partial_\eta p' - \bar{\mu}_d (q_s + q_c + q_r)] \\ + m^{-1} \mu'_d g = F_W \end{aligned}$$

$$\partial_t \mu'_d + m^2 [\partial_x U + \partial_y V] + m \partial_\eta \Omega = 0$$

$$\partial_t \phi' + \mu_d^{-1} [m^2 (U \phi_s + V \phi_y) + m \Omega \phi_\eta - mgW] = 0$$

$$\partial_t \Theta + m^2 [\partial_x (U \theta) + \partial_y (V \theta)] + m \partial_\eta (\Omega \theta) = F_\Theta$$

$$\begin{aligned} \partial_t Q_m + m^2 [\partial_x (U q_m) + \partial_y (V q_m)] \\ + m \partial_\eta (\Omega q_m) = F_{Q_m} \end{aligned}$$

$$\partial_\eta \phi' = -\bar{\mu}_d \alpha'_d - \alpha_d \mu'_d$$

$$p = p_0 (R_d \theta_m / p_0 \alpha_d)^{\gamma}$$

日下(2009, ながれ)

時間： 3次精度ルンゲ・クッタ

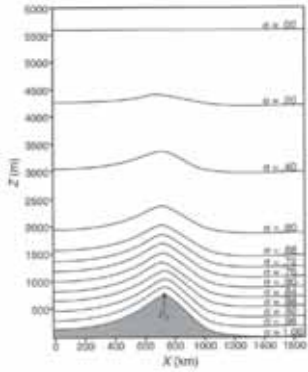
空間： 5次精度風上差分
(=6次精度中央差分+6次数値粘性)

$$\begin{cases} \frac{\phi^* - \phi^n}{\Delta t/3} = -U \frac{\partial \phi^n}{\partial x} \\ \frac{\phi^{**} - \phi^n}{\Delta t/2} = -U \frac{\partial \phi^*}{\partial x} \\ \frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = -U \frac{\partial \phi^{**}}{\partial x} \end{cases}$$

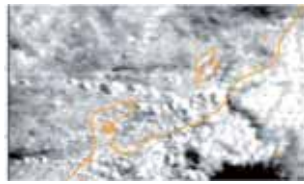
$$U \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{F^{5th}_{k+\frac{1}{2}} - F^{5th}_{k-\frac{1}{2}}}{\Delta x}$$

$$F^{5th}_{k+\frac{1}{2}} = \frac{U}{60} [37(\phi_{k+1} - \phi_k) - 8(\phi_{k+3} - \phi_{k-1}) + (\phi_{k+3} - \phi_{k-2})] - \frac{|U|}{60} [10(\phi_{k+1} + \phi_k) - 5(\phi_{k+2} + \phi_{k-1}) + (\phi_{k+3} + \phi_{k-2})]$$

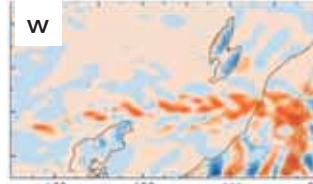
$$F^{5th}_{k-\frac{1}{2}} = \frac{U}{60} [37(\phi_k - \phi_{k-1}) - 8(\phi_{k+2} - \phi_{k-1}) + (\phi_{k+2} - \phi_{k-3})] - \frac{|U|}{60} [10(\phi_k + \phi_{k-1}) - 5(\phi_{k+1} + \phi_{k-2}) + (\phi_{k+2} + \phi_{k-3})]$$



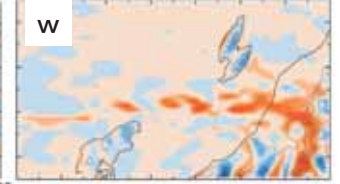
地形に沿った座標系



観測された雲
(上昇気流)



5th order upwind



3rd order upwind

(Kusaka et al. 2006, SOLA)

雲微物理モデル

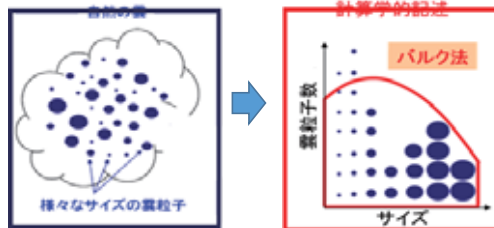
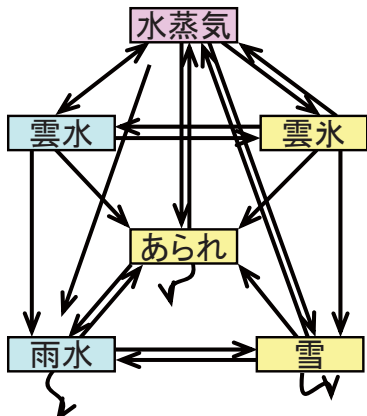
暖かい雨モデルの場合の予報方程式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = Diff \cdot \theta + \frac{L}{C_p} (CNvc - EVrv)$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} + u \frac{\partial q_v}{\partial x} + v \frac{\partial q_v}{\partial y} + w \frac{\partial q_v}{\partial z} = Diff \cdot q_v - CNvc + EVrv$$

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} + u \frac{\partial q_c}{\partial x} + v \frac{\partial q_c}{\partial y} + w \frac{\partial q_c}{\partial z} = Diff \cdot q_c - AC - CC + CNvc$$

$$\frac{\partial q_r}{\partial t} + u \frac{\partial q_r}{\partial x} + v \frac{\partial q_r}{\partial y} + w \frac{\partial q_r}{\partial z} = Diff \cdot q_r + AC + CC - EVrv$$



気象庁報告書より

個々の矢印をモデル化し、雲水、雨水、雪などの混合比を予報する

暖かい雨

- Kessler (qc, qr)

冷たい雨

混合比のみ予報(シングルモーメント)

- WSM6 (qc, qr, qi, qs, qg) ★★

- Goddard (qc, qr, qi, qs, qg)

- SBU-Ylin (qc, qr, qi, qs)

冷たい雨

混合比と数濃度を予報(ダブルモーメント)

- WDM6 (Nc, Nr, CCN)

- Thompson (Nr, Ni) ★

- Morrison (Nr, Ni, Ns, Ng) ★

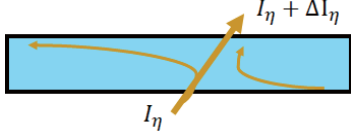
- Milbrandt-Yau (Nc, Nr, Ni, Ns, Ng, Nh)

★★ ユーザ数トップ

★ ユーザ数次点(WRF users webpageより)

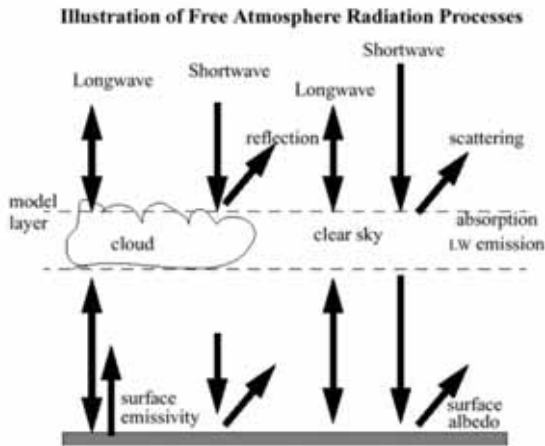
放射モデル 短波放射(日射)と長波放射(大気放射, 3μm~)

$$\frac{\partial I_\eta}{\partial s} = -\kappa_\eta I_\eta + \kappa_\eta B_\eta(T)$$



k_η をどう求めるか?

短波放射帯を16、長波長帯を11程度に分割し、バンド平均吸収率を用いて、鉛直1Dの放射伝達方程式を解く



NCAR WRF webpage

Dudhia 計算コストが軽い(短波放射のみ) ★★

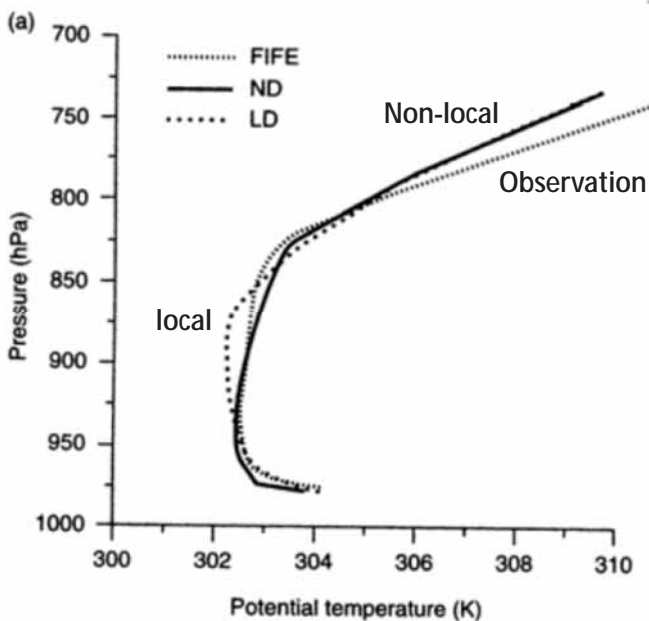
RRTM 相関k分布法(長波放射のみ) ★★

RRTMG 雲の部分凝結を考慮 ★

Goddard 雲の部分凝結を考慮

CAM CO2の年々変動を考慮、気候予測向き

乱流モデル – Local or Non-local model



出典: Hong and Pan (1996)

Local closure type

MYJ 2.5 (Mellor-Yamada-Janic) ★

BouLac 風速や温位の局所勾配から
QNSE TKEを計算し、拡散項を計算

MYNN2 ★

MYNN3

UW

Non-local closure type

GFS

YSU ★★

ACM2

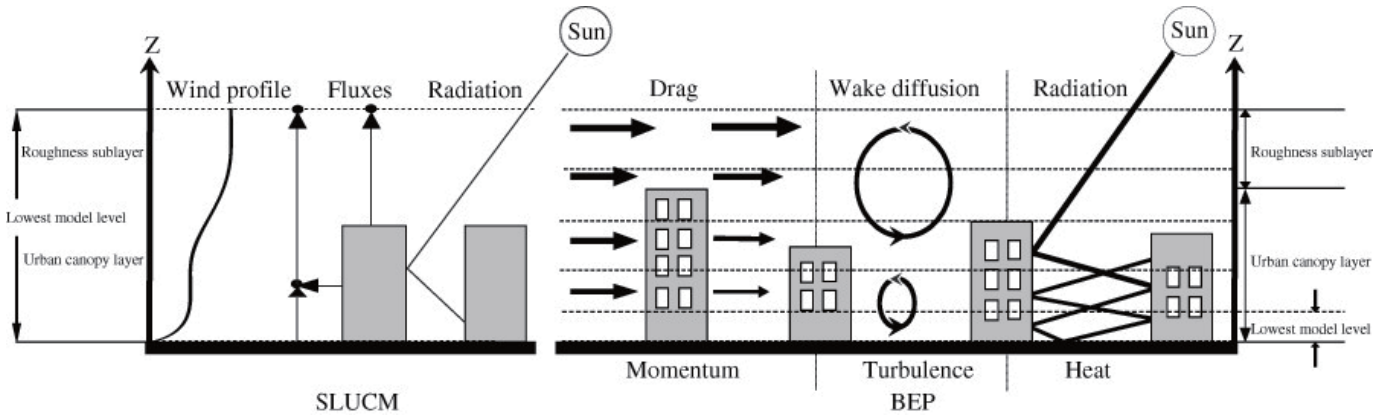
TEMF

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[K_c \left(\frac{\partial C}{\partial z} - \gamma_c \right) \right] \quad \gamma_c = 7.8 \frac{\overline{(w'c')}_{\text{MFC}}}{w_s}$$

混合層内の全格子点の値と関連付け、混合層全体(熱対流)の効果をもととして取り入れる

w_s 混合層の速度スケール
 $w_s = u_* \phi_m^{-1}$

都市キャノピーモデル UCM



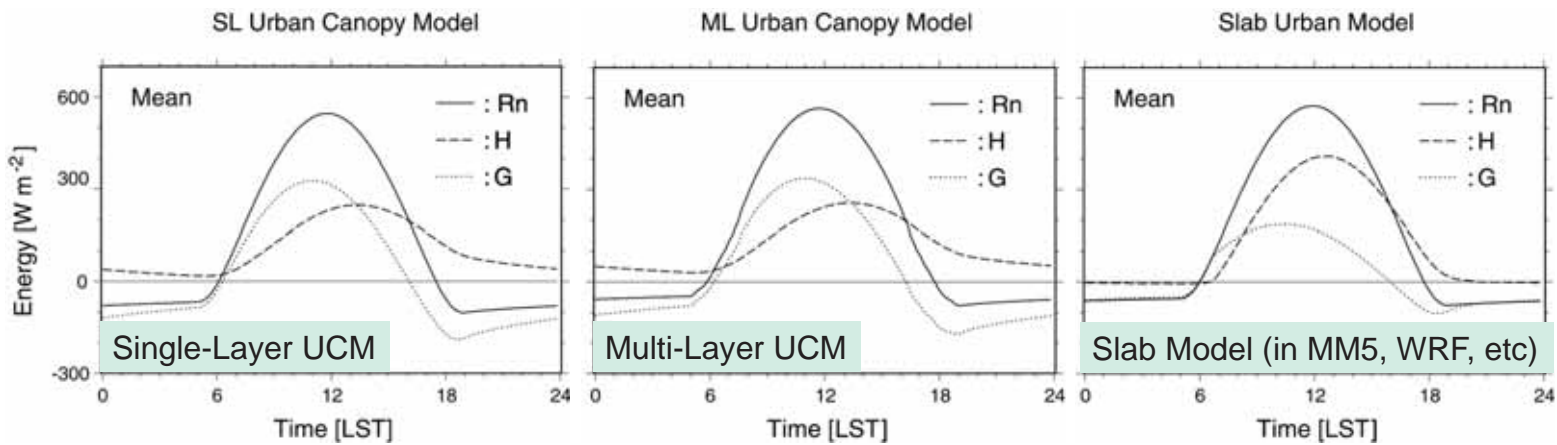
Chen, Kusaka et al (2011, Int. J. Climatology)

- SLUCM** 単層都市キャノピーモデル ★★
- BEP** 多層都市キャノピーモデル
- BEM** 多層都市キャノピーモデル
+ビルエネルギーモデル

都市キャノピー内の放射や風速を求めた後、建物や道路面の熱収支式を解き、都市と大気との熱・水蒸気・運動量の交換を計算する。

Performance of single-layer UCM is nearly that of multi-layer UCM.

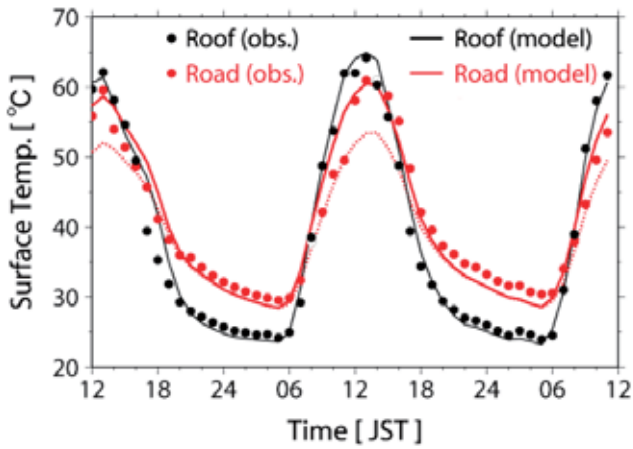
(Kusaka, Kondo, et al. 2001, Bound.-Layer Meteor.)



Heat budget terms calculated by the three models

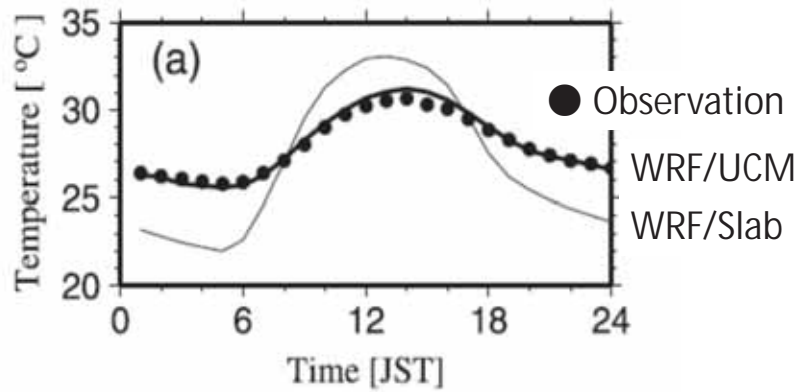
The diurnal variation of the heat budget from the single-layer UCM agrees with that from more complicated multi-layer UCM. The sensible heat flux from the slab model has larger during the daytime and smaller at night, which causes poor reproducibility of nocturnal UHI in the slab model.

(Kusaka, Kondo, et al. 2001, Bound.-Layer Meteor)



Simulated surface skin temperature at roof and road
Single-layer UCM represents the observations very well.
The roof is hottest during the daytime, but coolest at night.
The results are due to the difference in short- and long-wave radiations and wind speed at the reference height.

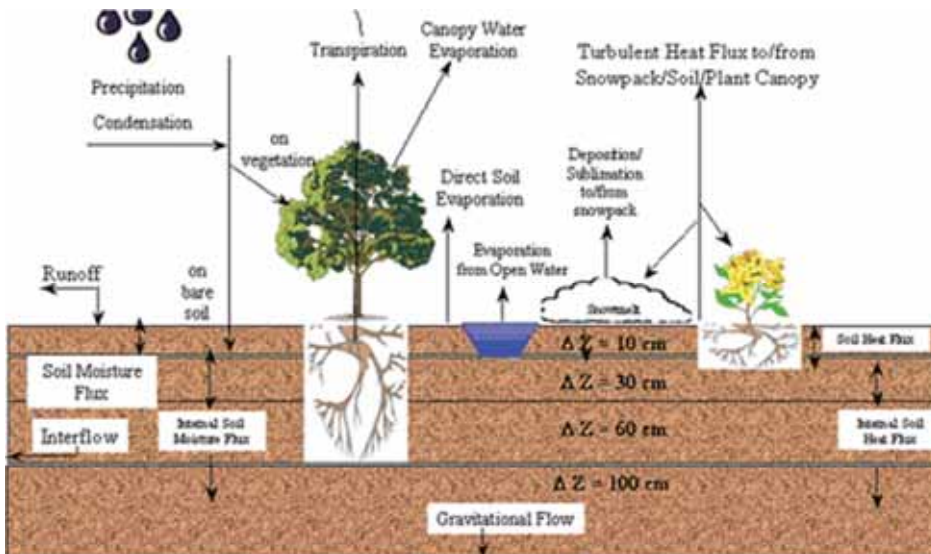
(Kusaka, Chen, Tewari, et al. 2012, J. Meteor. Soc. Japan)



WRF with UCM reproduces diurnal variation of the observed temperature at Tokyo.

WRF/UCM can be an useful model for meso-scale urban weather and climate simulation research.

陸面モデル LSM



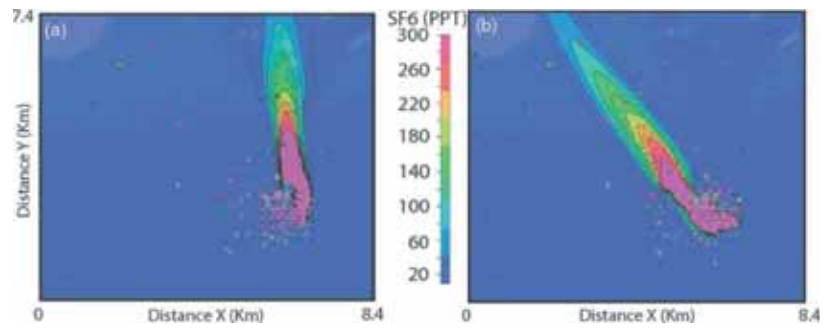
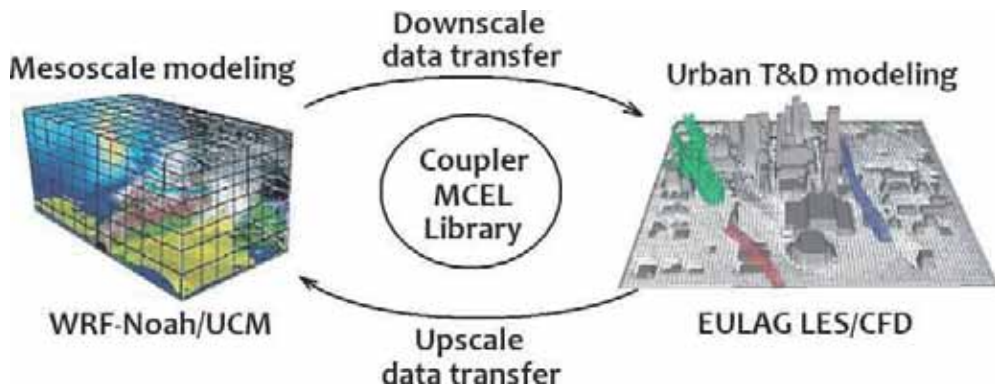
Noah-LSM ★★
代表的なLSM
都市モデルも利用可能

Noah MP-crop ★
Noah-LSMの上位互換
積雪深や穀物が成長する

SSiB
CLM4
P-X LSM

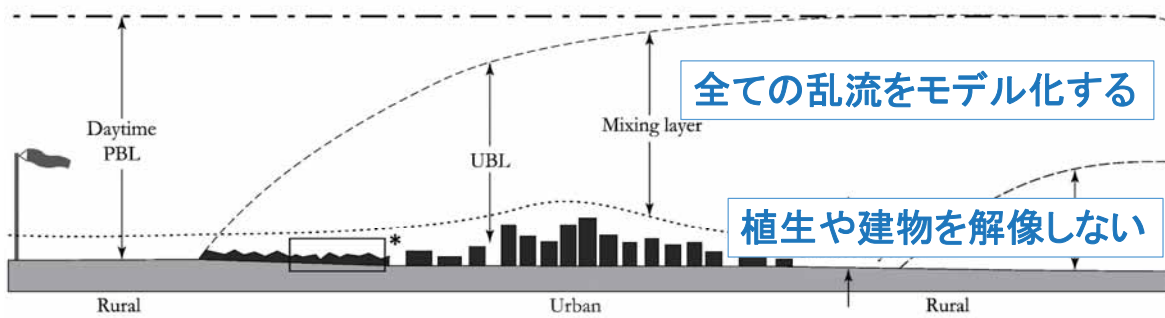
NCAR WRF webpage

地表面(土壌、植生、積雪)での熱・水蒸気・運動量の乱流フラックスを計算する
CFDモデルにおける壁関数のようなもの (ただし、その計算過程ははるかに複雑。流出量なども計算する)

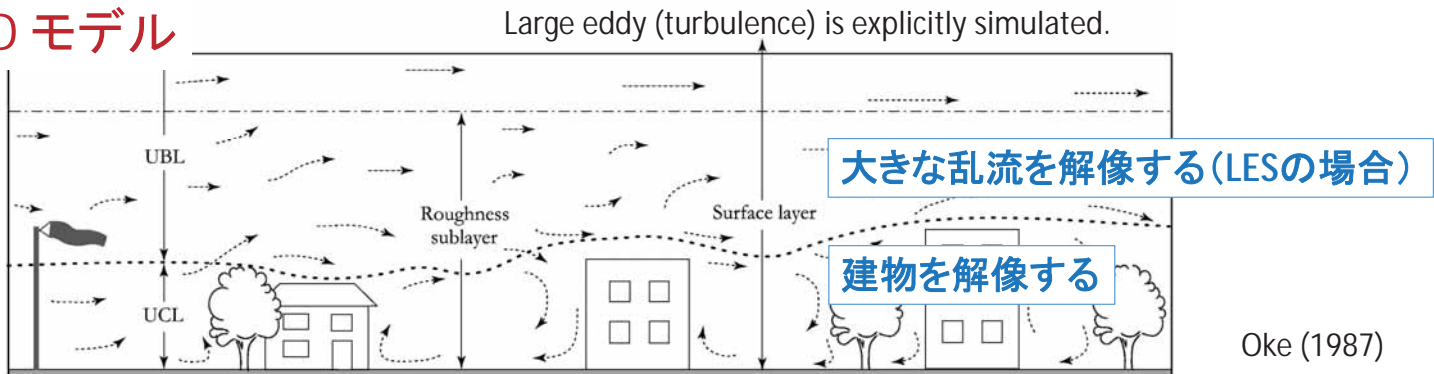


Tewari et al (2010)

WRFモデル



CFDモデル



Oke (1987)

WRFモデルとCFDモデルの比較

	空間スケール 水平と鉛直	空間分解能	基礎方程式	物理モデルの搭載
CFDモデル (屋外の場合)	・ビル周辺～街区 ・大気境界層下層	O(cm～10 m)	非圧縮性 (ブジネスク近似)	放射 (大気吸収・散乱なし) 乱流(k-ε, LES)
WRFモデル	・街区～大陸 ・対流圏and成層圏	O(10 m～10 km)	圧縮性 地形に沿った 座標系 (座標変換) 水物質の 方程式も含む	放射 (大気吸収・散乱あり) 雲 (雲粒、雨粒、雪、雹) 乱流 (MY, YSU, LES) 陸面 (植生の成長、土壌、都市、 流出、積雪)

WRFモデルの応用

どのような研究で使われているのか？

■ WRFには、公式版のほか、派生バージョンもある

■ Hurricane-WRF (HWRF, ハリケーン予測用)

Moving nestingや、1D海洋混合層モデル、
台風ポーガスを導入

■ Solar-WRF (太陽光発電予測用)

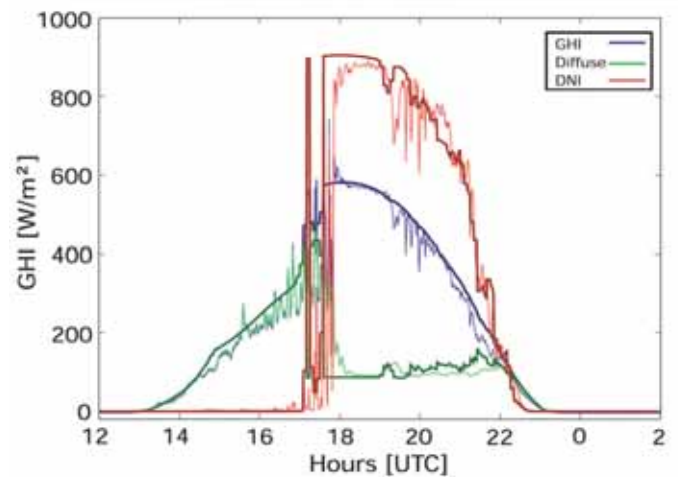
直達・散乱光を個別に出力
エアロゾルによる吸収・散乱や、
エアロゾルと雲の関係、部分的な雲を考慮

■ Climate-WRF (CLWRF, 気候予測用)

温室効果ガスの設定、気候値や最高最低気温等の出力

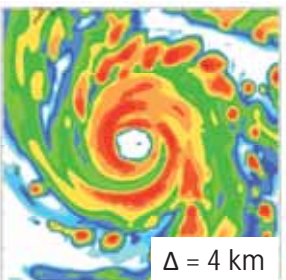
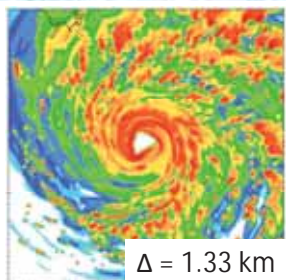
■ Polar-WRF (極域用)

■ WRF-LES (乱流解析用)

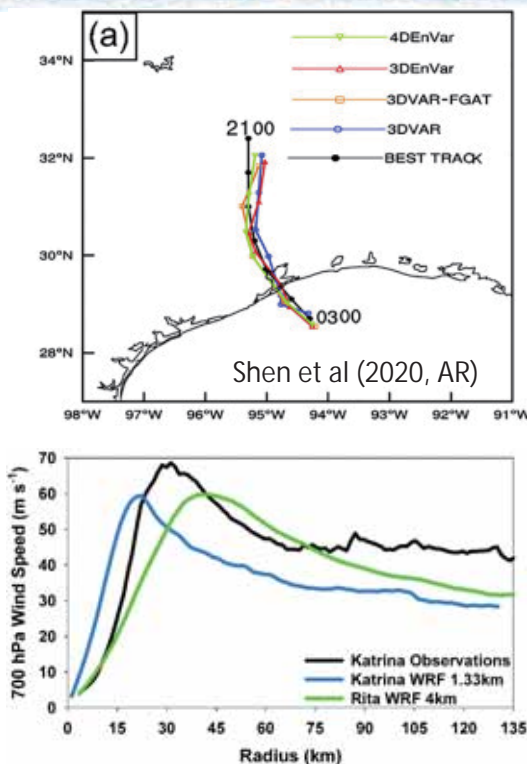


Powers et al (2017, BAMS)

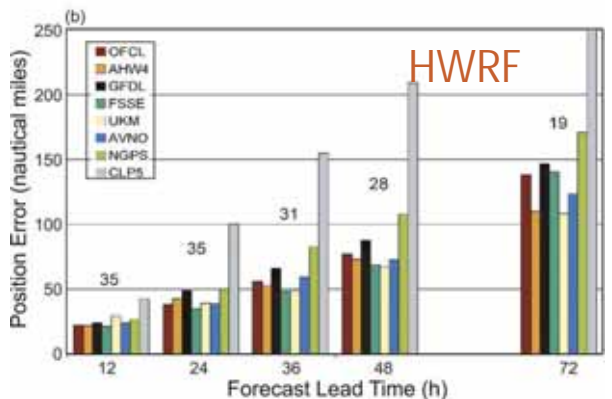
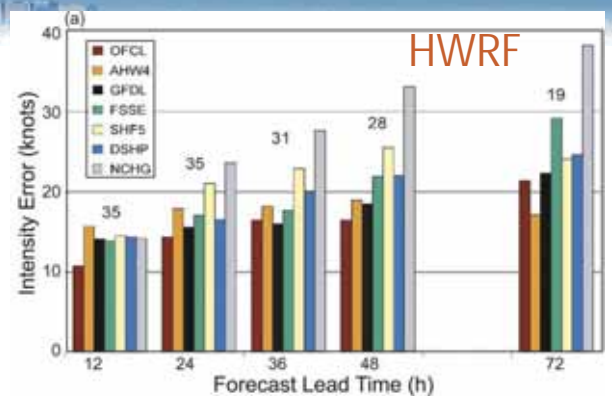
(注) WRF-LES以外はNCARが開発していないため、
最新のWRFがベースとなる保証はない



Hurricane Katrina (2005)
reflectivity patterns
at 0000 UTC 29
August (48h forecast)



WRF webpage



Davis et al (2008, MWR)

WRF webpage

■ WRFには、サブモデル・サブシステムがある

■ WRF-DA (データ同化システム)

Nudging, 3 or 4DVAR, Ensemble, Hybrid

地上・高層・レーダ・プロファイラ・衛星観測データの利用可能

■ WRF-Urban (都市キャノピーモデル)

都市街区構造や人工排熱を考慮

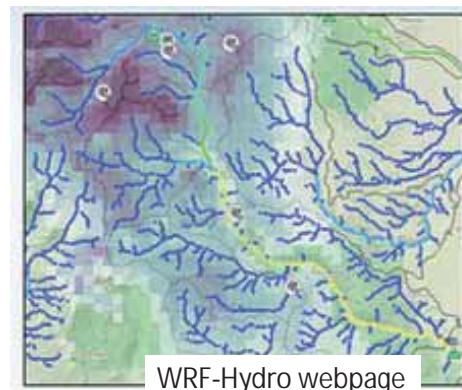
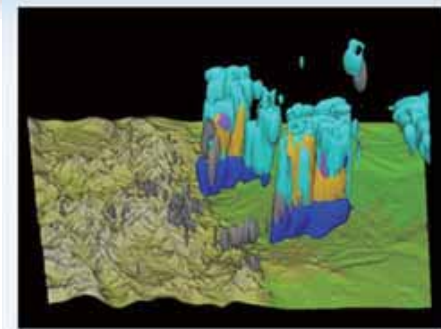
■ WRF-Hydro (水文・水理モデル、データ同化システム付)

流域水収支や河川流量・流速などをオンライン or オフラインで

■ WRF-Fire (火災モデル)

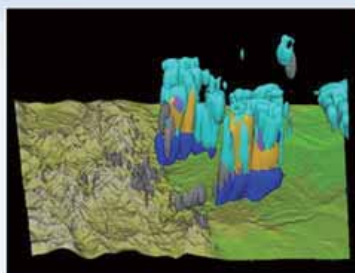
■ WRF-Chem (オンライン化学輸送モデル)

火山灰、砂塵、煙、微量ガス、汚染物質の輸送・拡散・化学反応
エアロゾルと雲の相互作用や湿性・乾性沈着も考慮

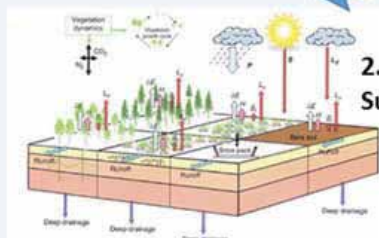


WRF-Hydro Hydrometeorological Modeling System:

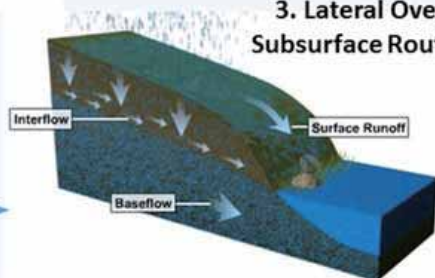
1. WRF model or user-specified meteorological data



2. Column Land Surface Models

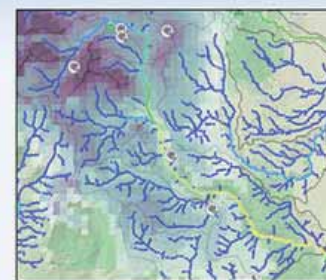


3. Lateral Overland and Subsurface Routing Models

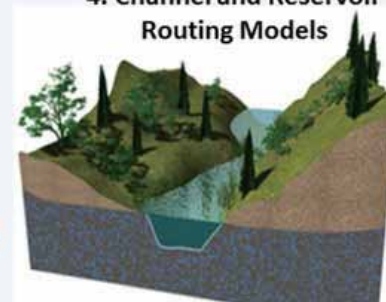


2-way coupling

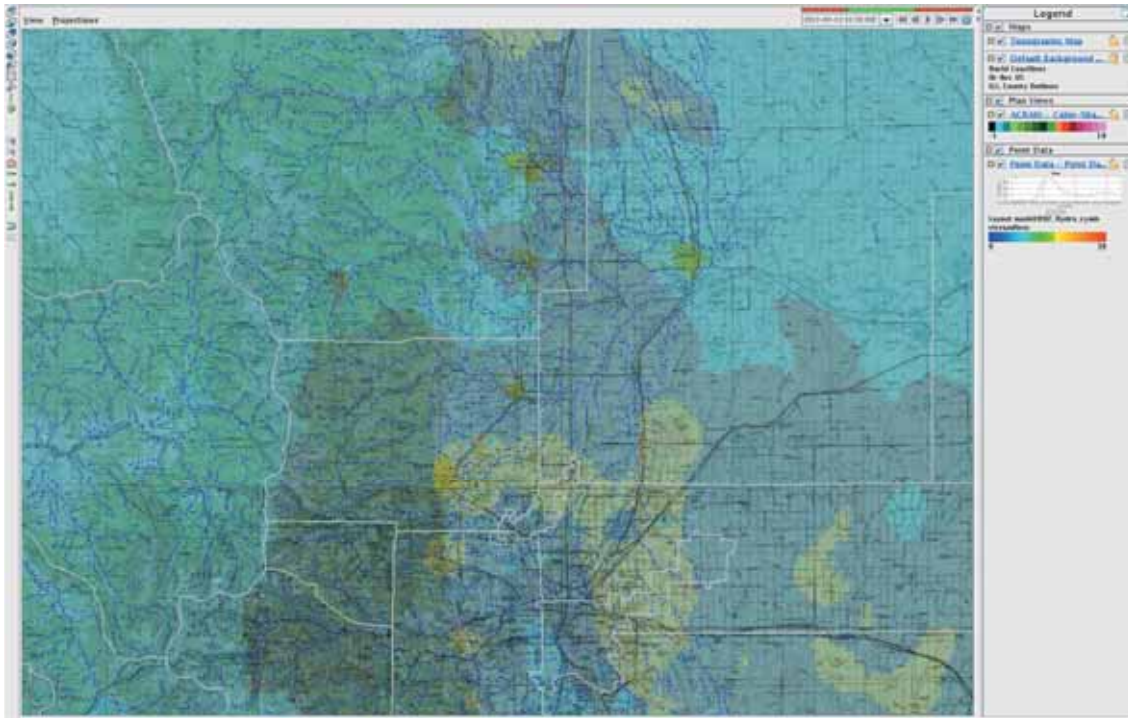
5. Hydrologic Forecasts



4. Channel and Reservoir Routing Models



WRF-Hydro webpage

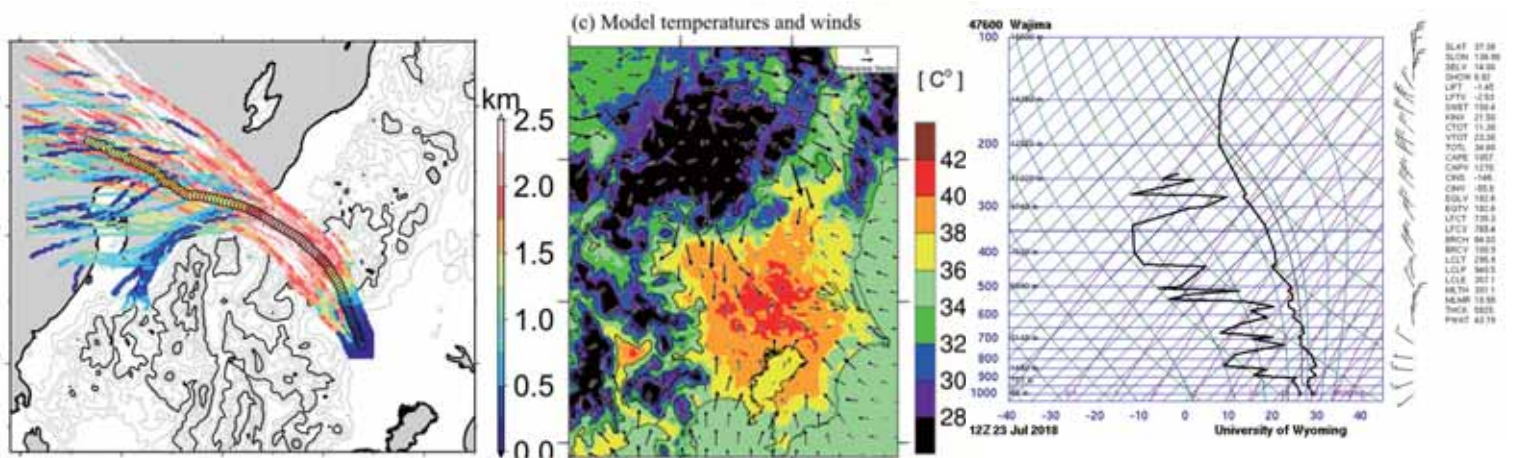


WRF-Hydro webpage

Colorado Flood of 11-15 Sept. 2013

WRF-Hydro model output: Accumulated Precipitation (shaded colors), 100m gridded streamflow (points)

WRFの応用例 ②フェーンによる記録的高温



熊谷41.1°C
(日本最高気温記録)

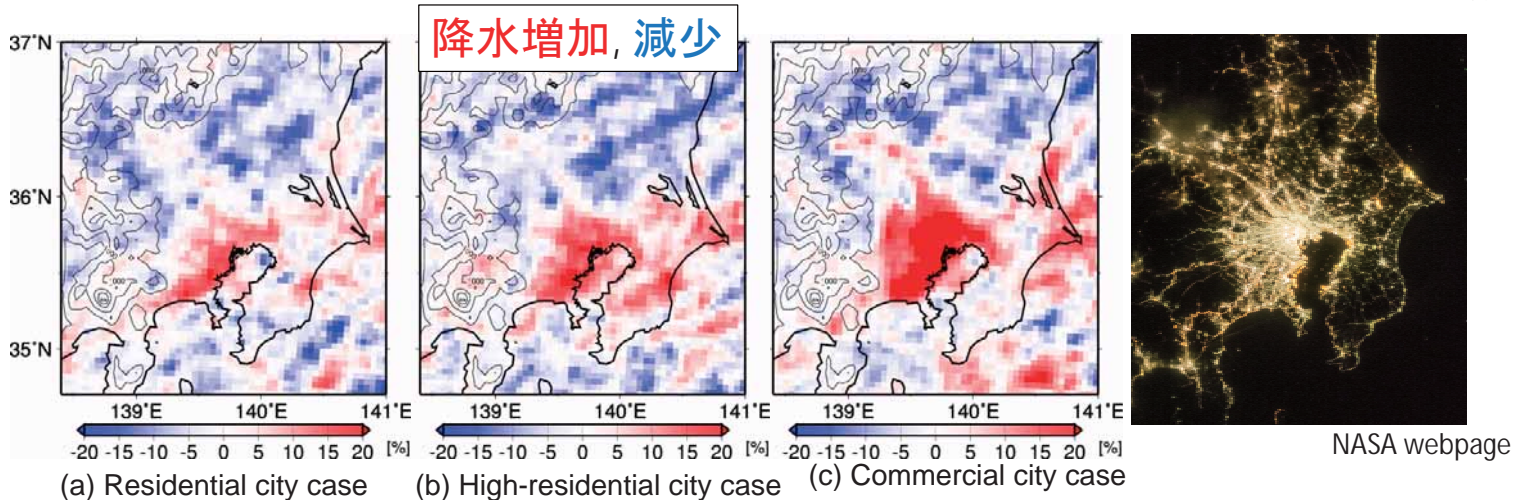
$\theta = 310.8 \text{ K} (37.7^\circ\text{C})$ at 830 hPa level (輪島)

力学フェーン+山岳風下斜面加熱

Nishi and Kusaka (2019, SOLA)

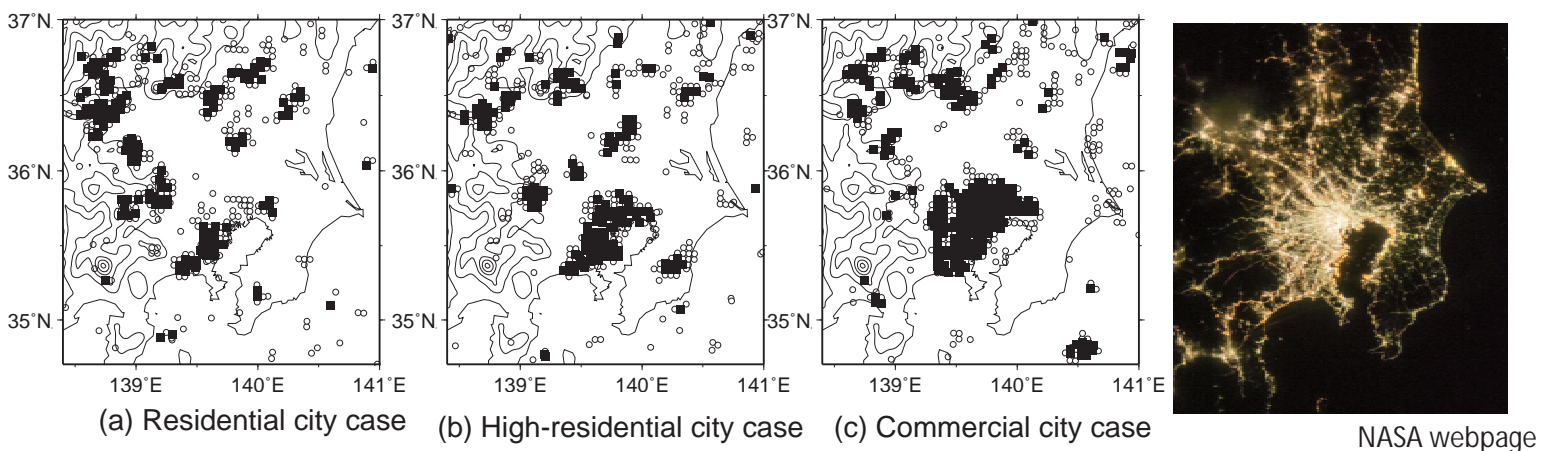
WRFの応用例 ③都市化は降水を強化するのか？

(Kusaka et al. 2014, J. Appl. Meteor. Climatology)



Urban impacts on the monthly precipitation amount in August during the 8-year period (2001-2008). All results are the four ensemble climate experiments (i.e., 32 Augusts). Figures show **urbanization causes a robust increases in precipitation amount in Tokyo** (and reduction in the inland areas).

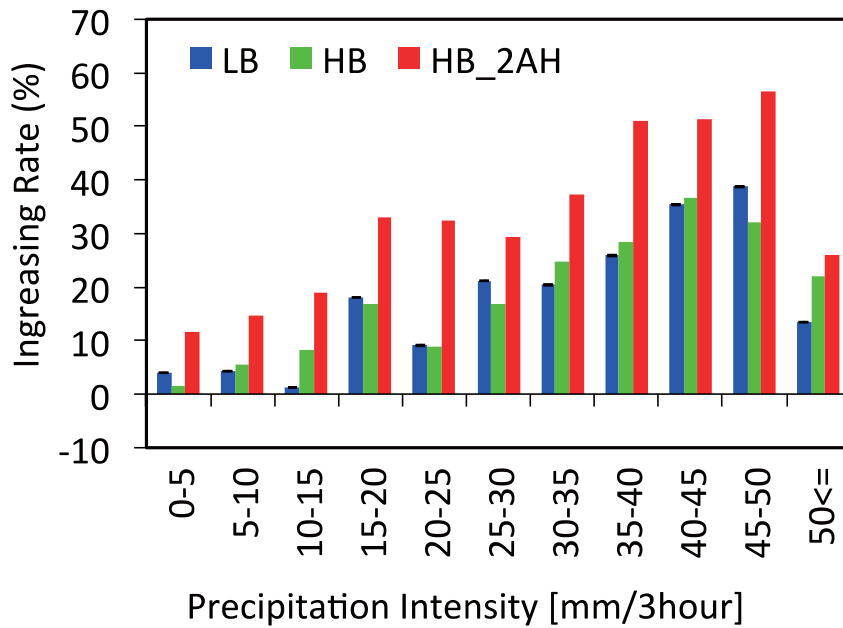
(Kusaka et al. 2014, J. Appl. Meteor. Climatology)



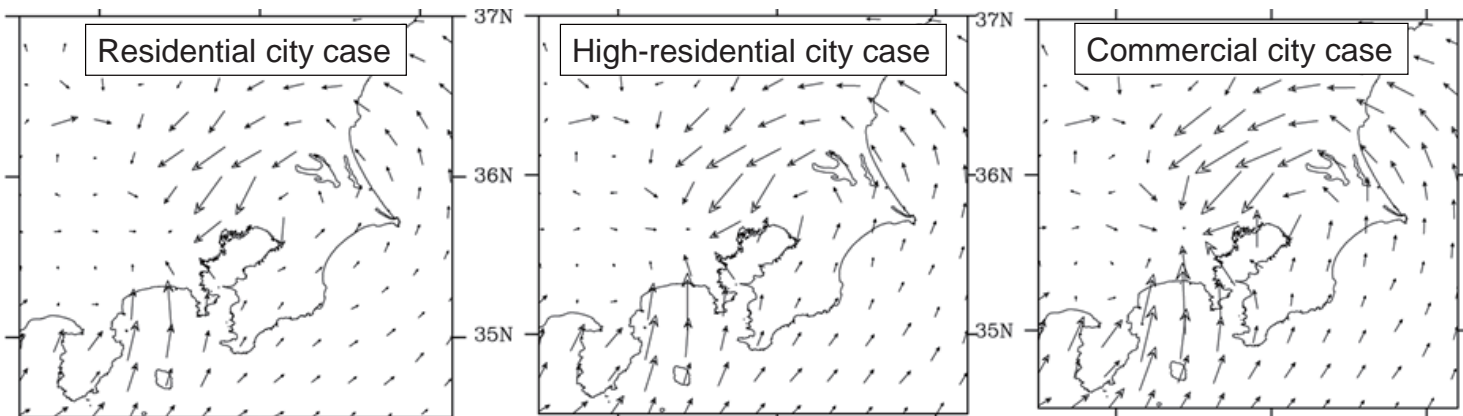
Results of T-test of statistical significance for urban impact. Solid square and open circle indicate the significance level with 99% and 95%, respectively.

Urban impacts on precipitation intensity.
 Urban impact is shown as an increasing rate
 for each precipitation intensity.

(Kusaka et al. 2014, J. Appl. Meteor. Climatology)



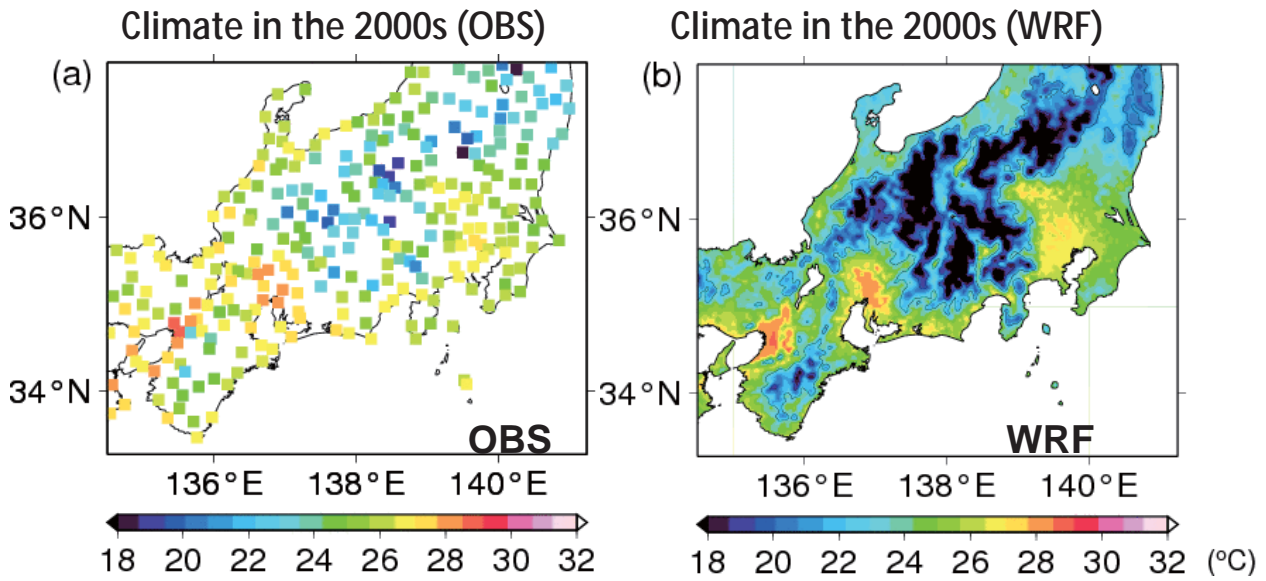
(Kusaka et al. 2014, J. Appl. Meteor. Climatology)



Horizontal moisture flux anomaly (urbanization impact)

- Urbanization → Sensible heat flux increase
- Reduction of surface pressure in the Tokyo metropolis
- **Modification of sea breezes** (Kusaka et al. 2000, J. Meteor. Soc. Japan)
- Anomalous convergence of grid-scale horizontal moisture flux

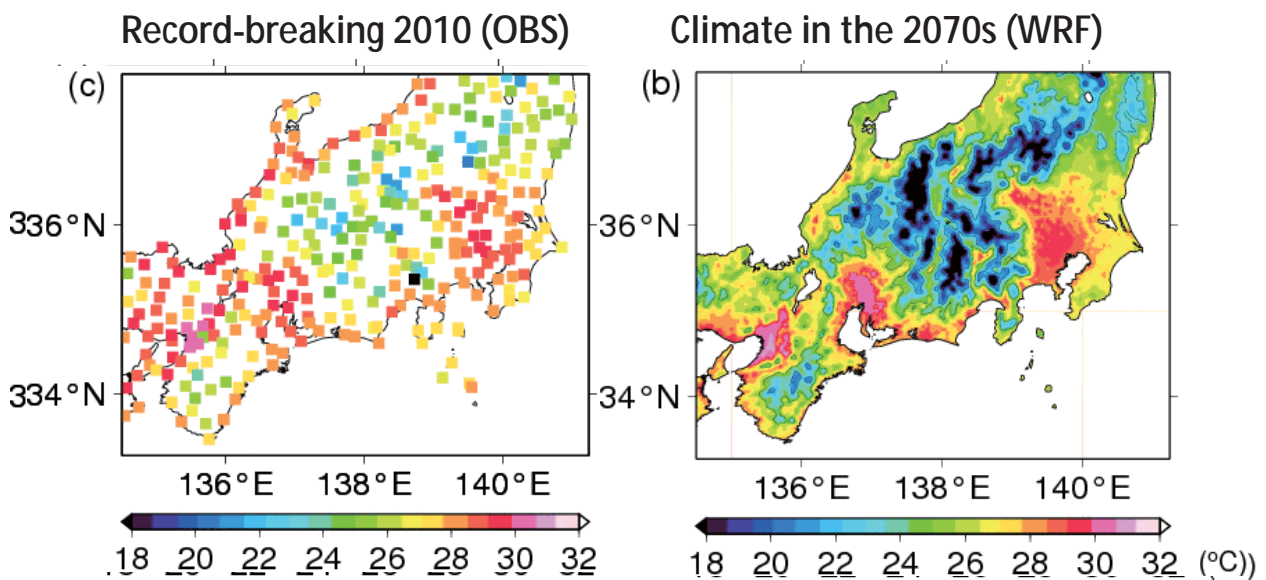
WRFの応用例 ④都市気候の将来予測



再現性は非常に良い

Kusaka et al. (2012, JMSJ)

35



将来の都市気温は、記録的な大猛暑の時の気温と同程度になる

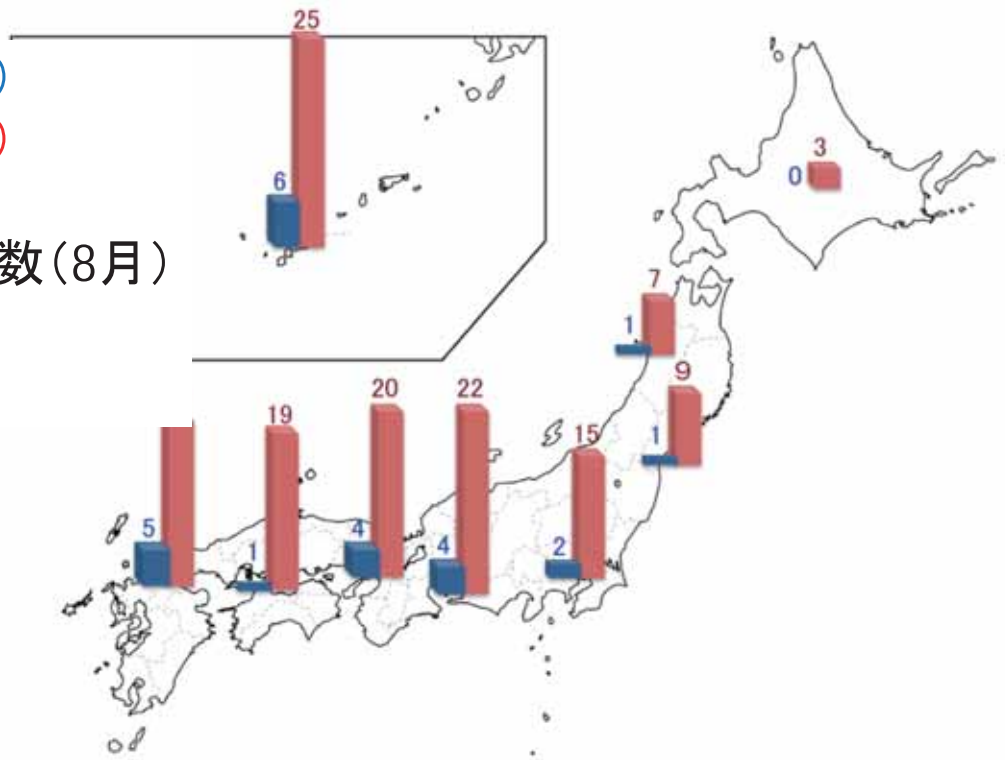
Kusaka et al. (2012, JMSJ)

36

現在(2000s平年値)
将来(2070s平年値)

熱中症嚴重警戒日数(8月)

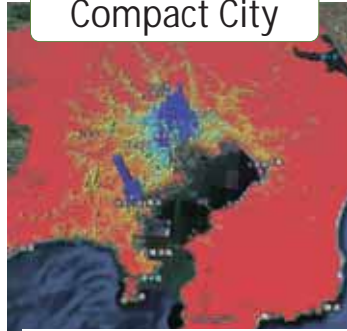
原則運動禁止



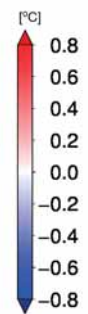
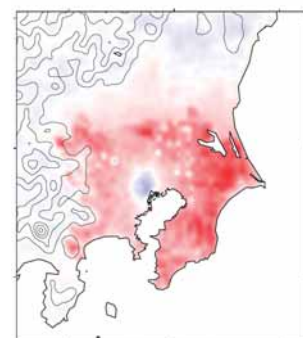
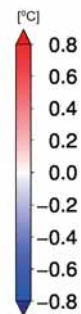
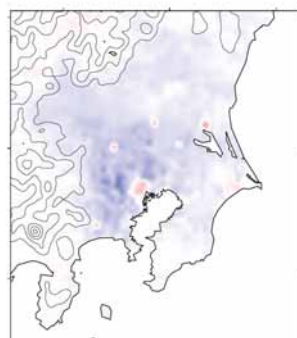
Status-quo (Current)



Compact City



Distributed City



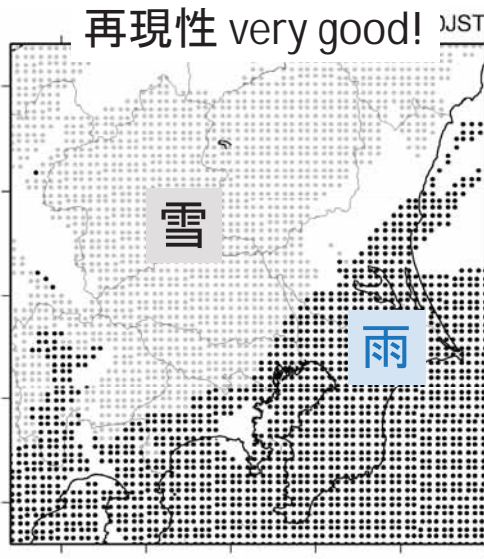
Kusaka et al (2016, Climatic Change)

WRFの応用例 ⑥南岸低気圧による降雪



実況

日下ほか(2018, 気象研究ノート)

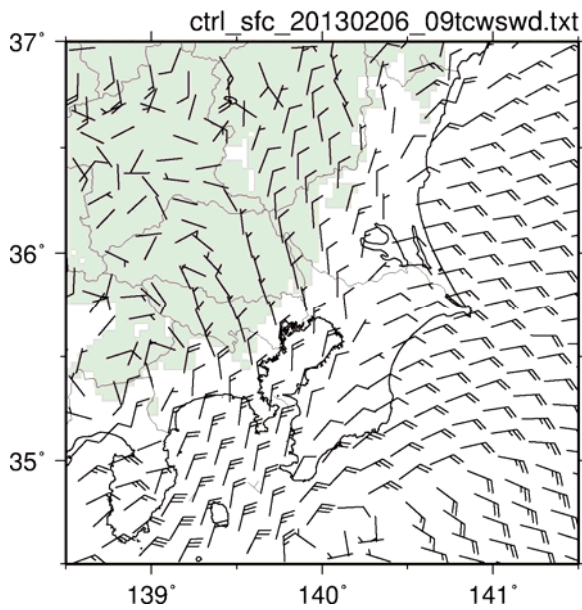


WRF

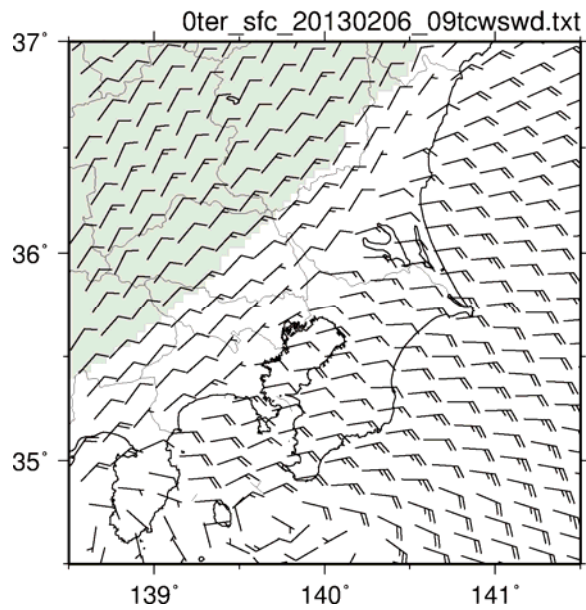


WRF(地形なし)

地形が局地前線を形成し、冷氣層を維持



WRF



WRF(地形なし)

日下ほか(2018, 気象研究ノート)

シミュレーション結果の解釈とその注意点

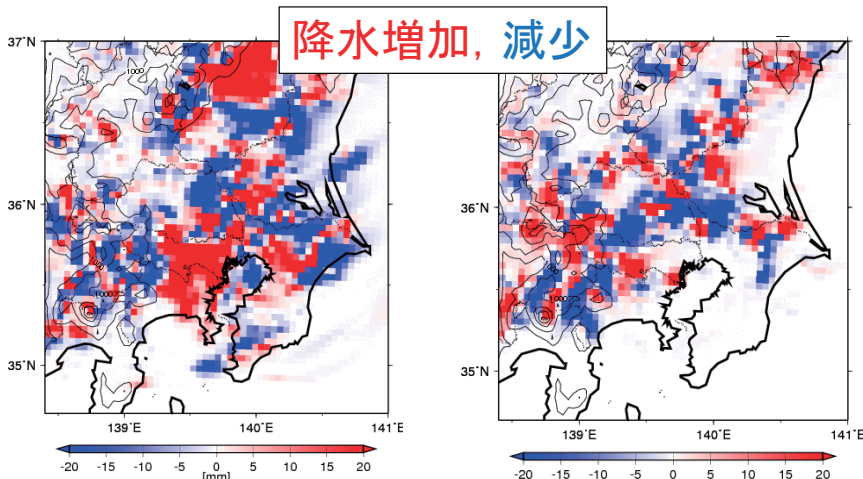
41

②降水シミュレーションのカオス性に注意

(Kusaka et al. 2009, ICUC-7 Yokohama)

降水シミュレーションの結果が用いた初期値・境界値・物理スキームに依存する。

より深刻なのは、結論まで変わる可能性があること。例えば、都市が降水に及ぼす影響。



Urbanization increases precipitation in Tokyo

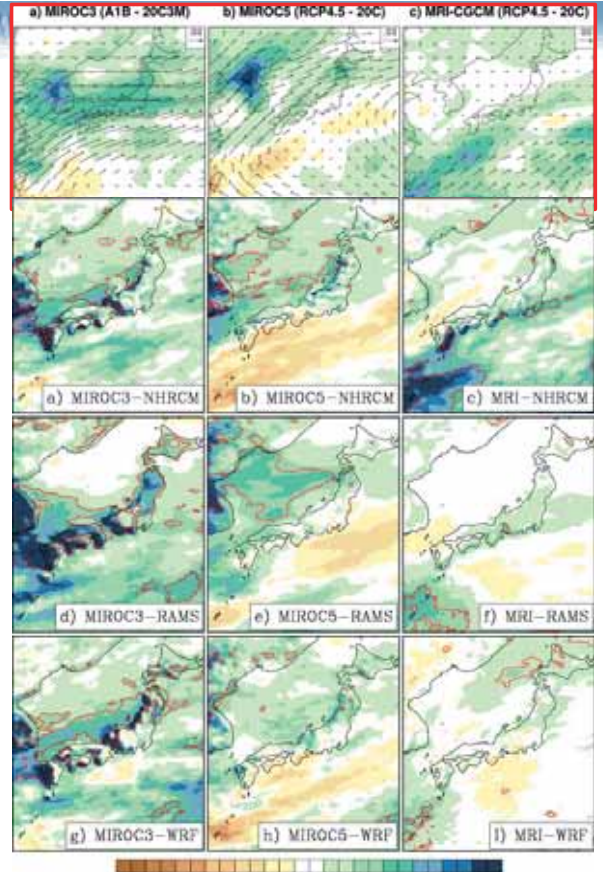
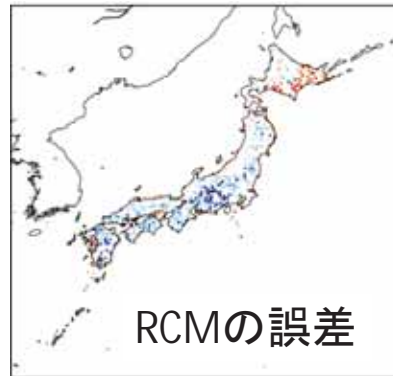
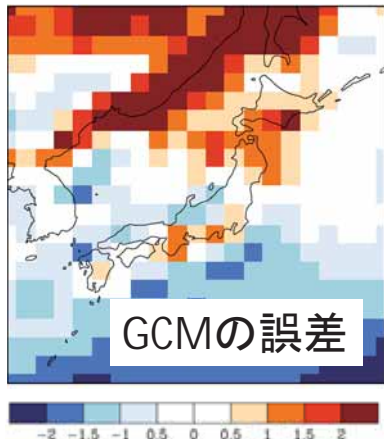
Urbanization doesn't change precipitation in Tokyo



NASA webpage

③ダウンスケーリングの結果は GCMに大きく依存する

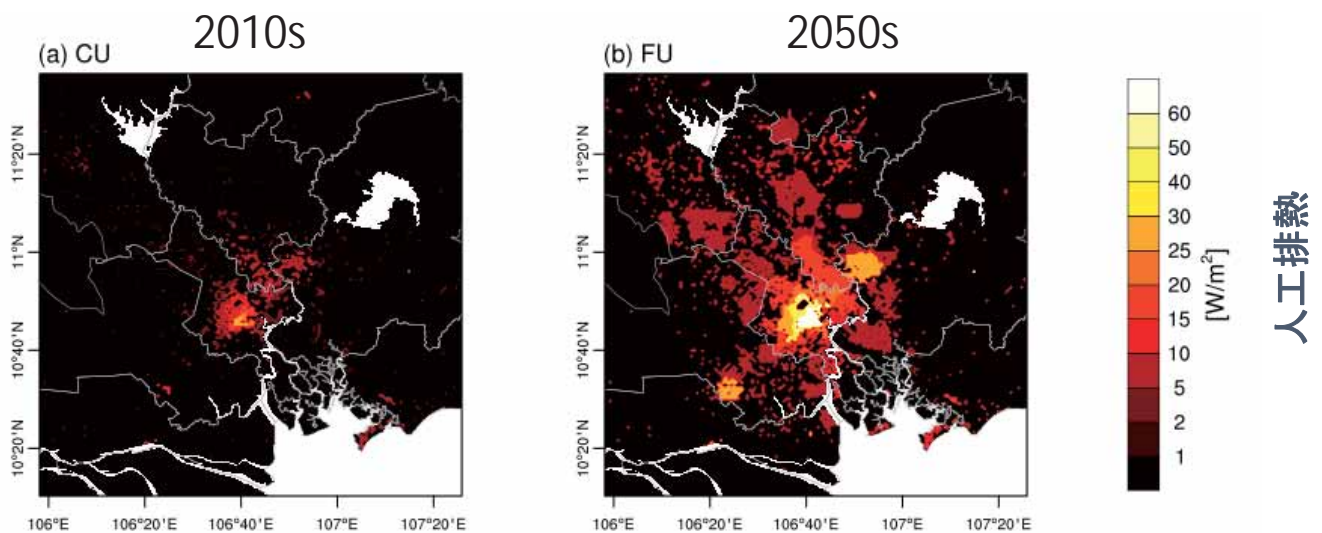
“Garbage in, garbage out”



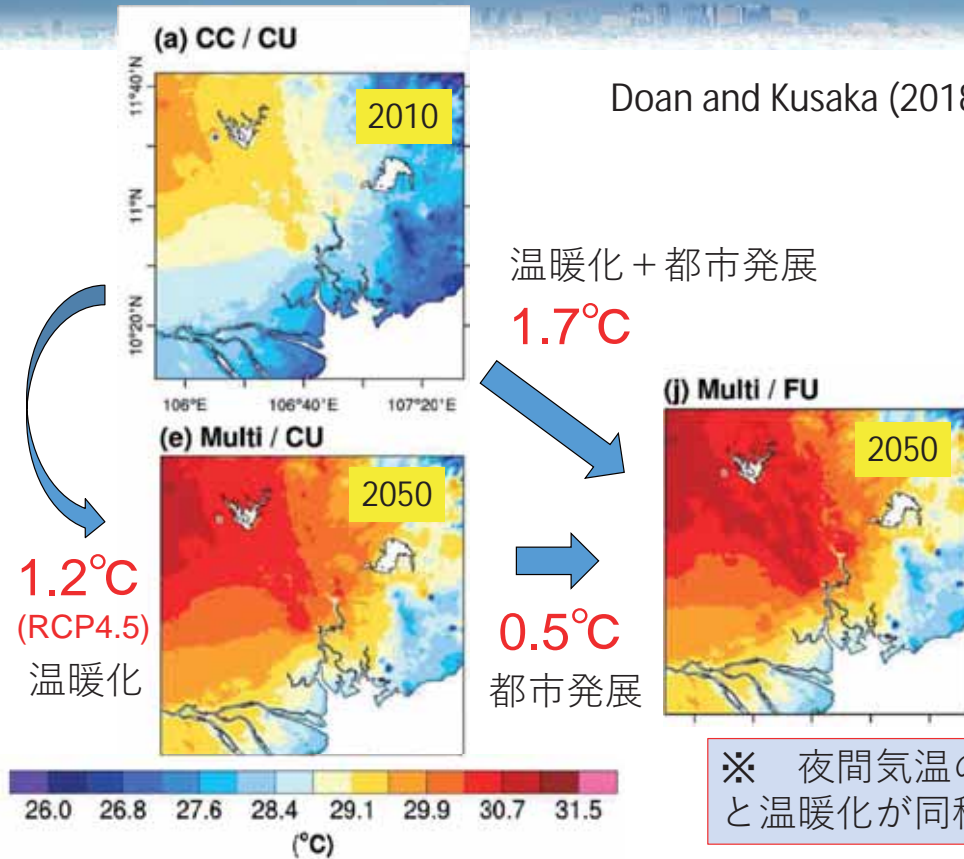
Suzuki-Parker et al (2018, SOLA)

④途上国の都市気候将来予測では、都市の発展も考慮すべき

Doan and Kusaka (2018, Int. J. Climatology)



Doan and Kusaka (2018, Int. J. Climatology)



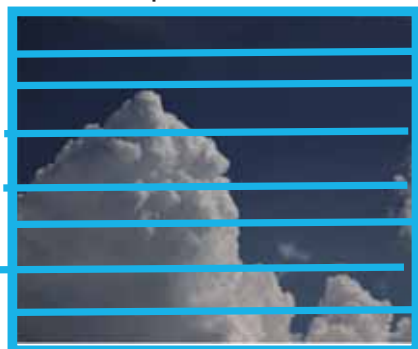
※ 夜間気温の場合は、都市発展と温暖化が同程度の影響

⑤空間分解能10km以上の場合は、その地域に適した積雲対流パラメタリゼーションを併用すること

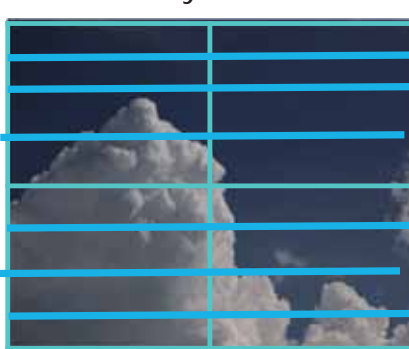
熱帯の場合は、WRF開発チームが推奨する tropical setting を参照するとよい

- 3-4km以下なら積雲対流を解像できる
- 10km以上なら積雲対流をパラメタリゼーションできる

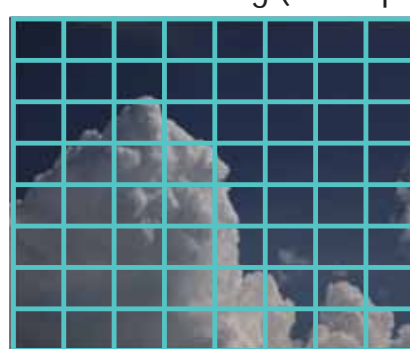
Cumulus parameterization



Gray-scale

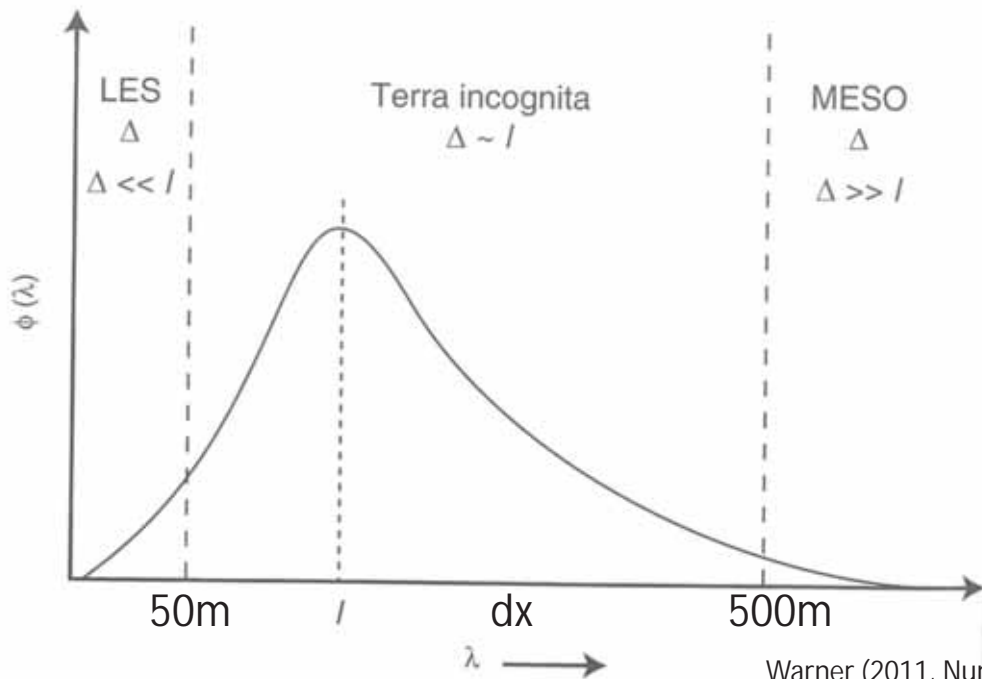


Cloud-resolving (Microphysics only)



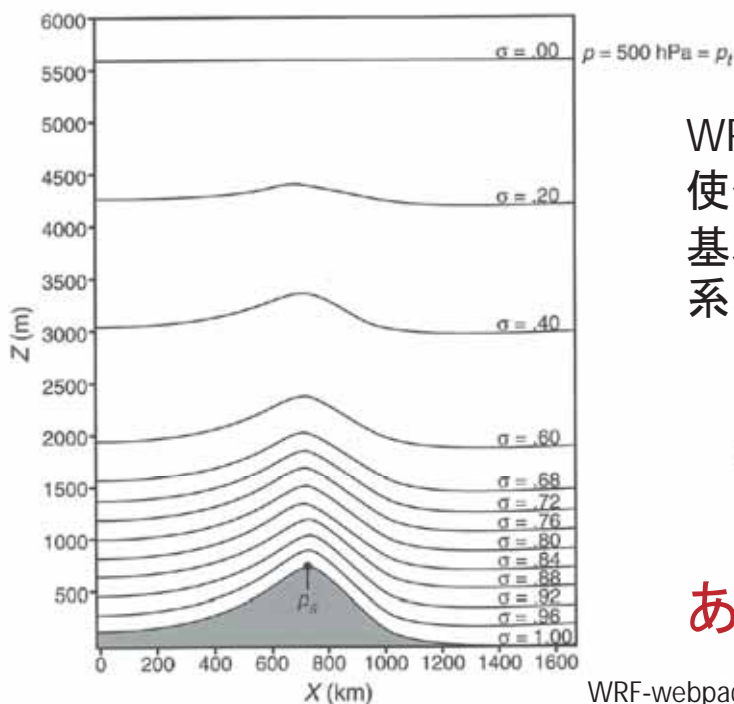
⑥乱流モデルのグレイゾーンにも気をつけること

(熱対流が支配的な弱風時は空間分解能500m以上が望ましい。強風時なら500m以下でも使える)



Warner (2011, Numerical Weather and Climate Prediction)

⑦複雑地形で高解像度計算は難しい



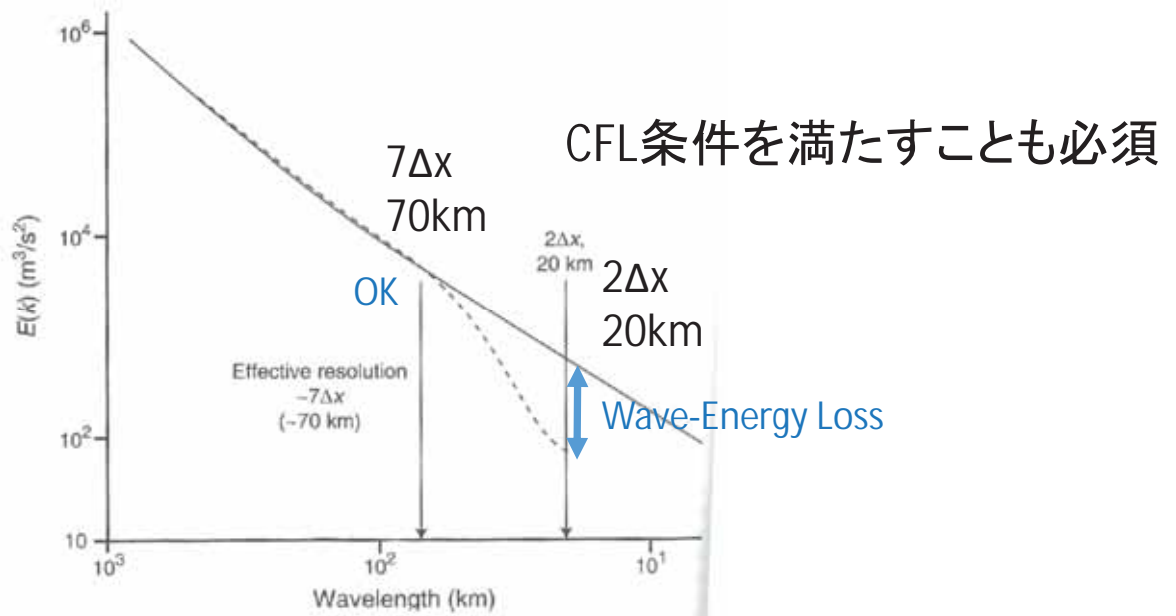
WRFは地形に沿った質量座標系を使っている。
基本的には、地形に沿った気圧座標系と似ている。

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t}$$

あまり急斜面では使えない

WRF-webpage

⑧格子間隔と分解能の違いに注意



波を表現するためには、8-10格子点必要

Warner (2011, Numerical Weather and Climate Prediction)

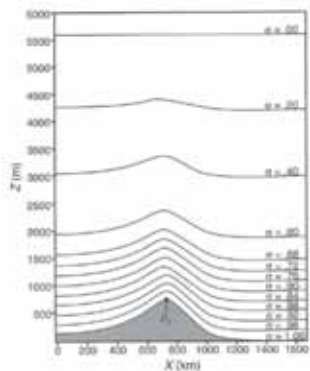
⑨その他の注意点

- WRFの予測と再現精度は、地域や対象とする現象によって異なる。数値実験の前に、必ず観測データでモデルの再現性を十分に調査すること。その際、パラメータの調整 and/or 最適な初期値・境界値やモデルを把握すること。
- データ同化は強力だが、万能ではないし、パラメータの調整が難しい。
- 気象計算と気候計算を混同しないこと

参考資料

時間： 3次精度ルンゲ・クッタ

$$\begin{cases} \frac{\phi^* - \phi^n}{\Delta t/3} = -U \frac{\partial \phi^n}{\partial x} \\ \frac{\phi^{**} - \phi^n}{\Delta t/2} = -U \frac{\partial \phi^*}{\partial x} \\ \frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = -U \frac{\partial \phi^{**}}{\partial x} \end{cases}$$



地形に沿った座標系

空間： 5次精度風上差分

(=6次精度中央差分+6次数値粘性)

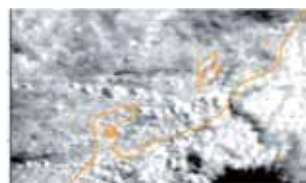
$$U \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{F^{5th}_{k+\frac{1}{2}} - F^{5th}_{k-\frac{1}{2}}}{\Delta x}$$

$$F^{5th}_{k+\frac{1}{2}} = \frac{U}{60} [37(\phi_{k+1} - \phi_k) - 8(\phi_{k+3} - \phi_{k-1}) + (\phi_{k+3} - \phi_{k-2})]$$

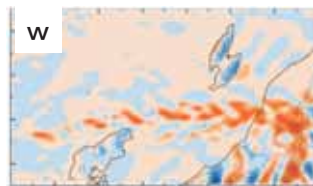
$$- \frac{|U|}{60} [10(\phi_{k+1} + \phi_k) - 5(\phi_{k+2} + \phi_{k-1}) + (\phi_{k+3} + \phi_{k-2})]$$

$$F^{5th}_{k-\frac{1}{2}} = \frac{U}{60} [37(\phi_k - \phi_{k-1}) - 8(\phi_{k+2} - \phi_{k-1}) + (\phi_{k+2} - \phi_{k-3})]$$

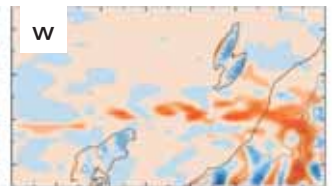
$$- \frac{|U|}{60} [10(\phi_k + \phi_{k-1}) - 5(\phi_{k+1} + \phi_{k-2}) + (\phi_{k+2} + \phi_{k-3})]$$



観測された雲
(上昇気流)



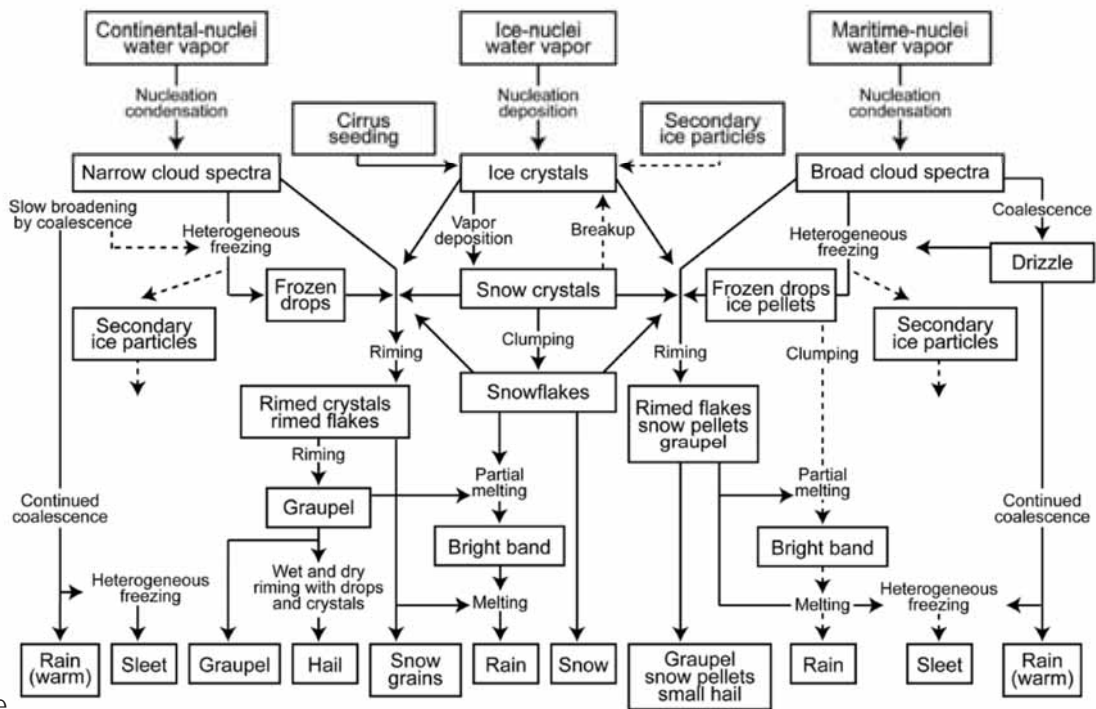
5th order upwind



3rd order upwind

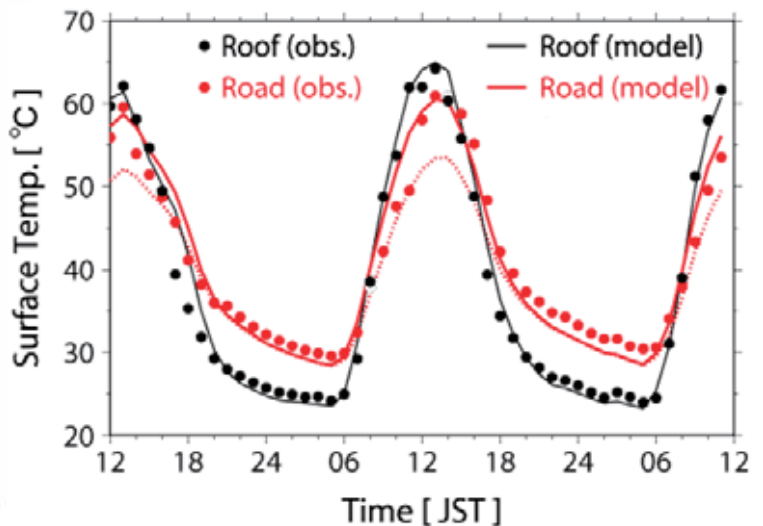
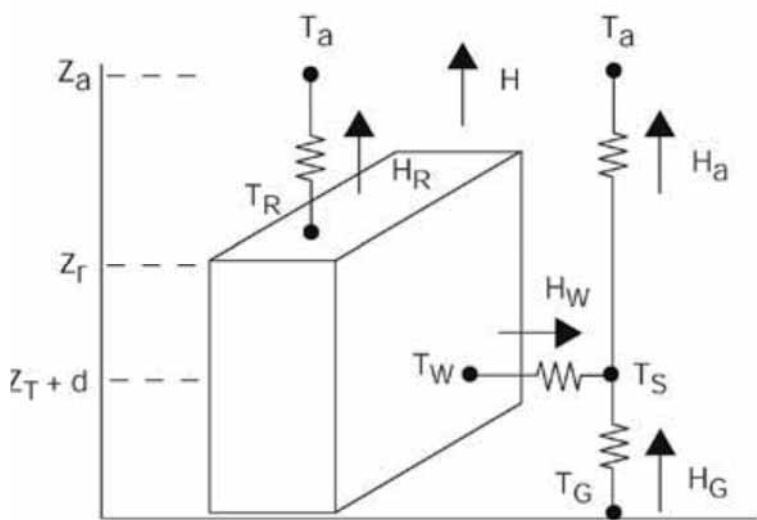
(Kusaka et al. 2006, SOLA)

Microphysics Parameterization



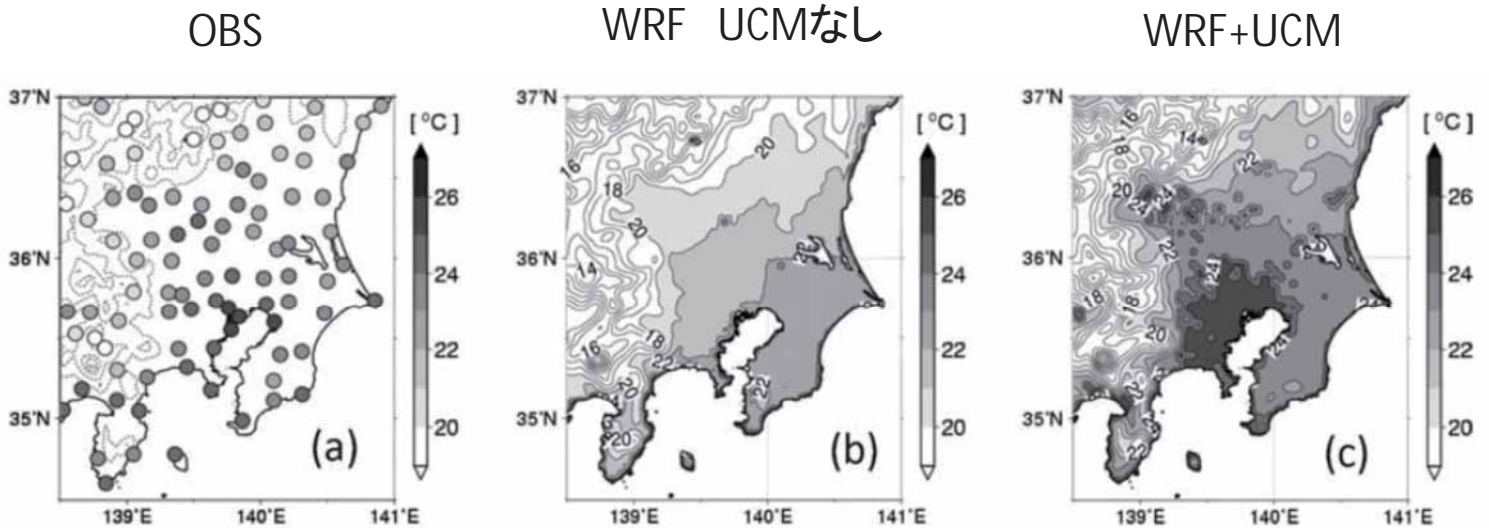
WRF webpage

Single-layer urban canopy model (UCM)



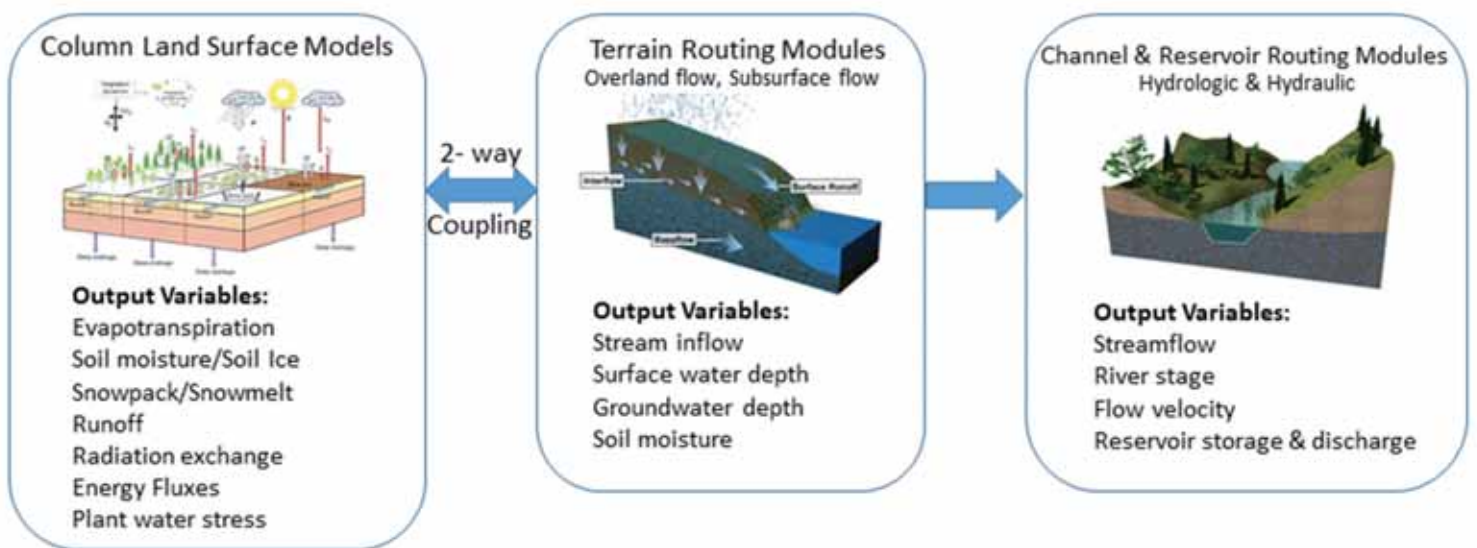
Chen, Kusaka et al (2011, Int. J. Climatology)

Impact of urban canopy model on the simulated temperature



Kusaka et al (2012, J. Meteor. Soc. Japan)

WRF-Hydro Physics Components – Output Variables



気象・河川シミュレーションに関する取り組みと事例紹介

2021/03/26 オンラインセミナー
防災・環境シミュレーション ～気象と防災シミュレーションの動向～
アドバンスソフト株式会社 主任研究員 高橋邦生

目次

- ▶ 気象シミュレーションに関する取り組みと事例紹介
- ▶ 河川シミュレーションに関する取り組みの紹介
- ▶ Webシミュレーションに関する取り組みの紹介

気象シミュレーションに関する取り組みと事例紹介

環境・防災分野で扱う空間スケール



地球スケール

図は Google Map より

大陸・国スケール

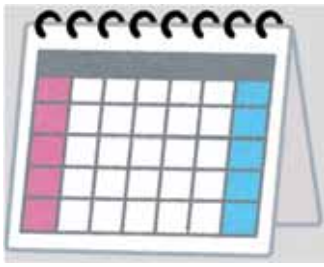


街・区スケール

県・都市スケール



対象とする時間スケール



数日～それ以上



数時間～1日



数分～1時間

- ▶ 解析対象の空間スケール・時間スケールを考慮して適切な物理モデル（ソフトウェア）を用いる必要がある
- ▶ 空間スケールが大きい対象ほど、時間スケールを大きく取る必要がある

物理モデルの選択例

- ▶ 気象条件の取り扱い
 - ▶ 気象要素（風向、風速、雨量、気温など）も予測 = 気象モデルが必要
 - ▶ 気象要素は固定 = 気象モデルは不要
- ▶ 乱流の取り扱い
 - ▶ 対象とする空間・時間スケールにより乱流モデルを使い分ける
 - ▶ 乱流構造を分解しない（時間平均的な状態が分かれば良い）
 - ▶ 標準 k- ϵ モデル、SST k- ω モデルなどの RANS モデル
 - ※ RANS = レイノルズ平均モデル
 - ▶ 乱流構造を分解したい（非定常な渦の生成・消滅を見たい）
 - ▶ Large Eddy Simulation (LES) : 標準 smagorinsky モデルなど
 - ▶ Direct Eddy Simulation (DES) : 直接計算（膨大な計算機資源が必要）

当社ソフトウェアの場合

- ▶ 大気拡散予測システム Advance/Emerg
 - ▶ 対象とする空間スケール：県・都市、国・大陸、地球スケール
 - ▶ 対象とする時間スケール：数時間～数日～1ヶ月くらい
 - ▶ 気象要素の予測：気象モデルにより可能
 - ▶ 乱流モデル：乱流構造を分解しない
- ▶ 流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red
 - ▶ 対象とする空間スケール：数m～街・区スケール
 - ▶ 対象とする時間スケール：秒・分～1時間くらい
 - ▶ 気象要素の予測：できない
 - ▶ 乱流モデル：乱流構造を分解しない場合、分解したい場合どちらも可

Advance/Emerg の開発の経緯

- ▶ 放射性物質の拡散影響予測のために開発（官公庁の計算機システムに導入）
- ▶ 基本要件
 - ▶ 非静力学モデルにより、気象場の予測解析が可能であること
 - ▶ 気象場を駆動場として、異なる性状の粒子の拡散を扱えること
 - ▶ 放射性希ガス、放射性ヨウ素、放射性粒子状物質
 - ▶ 粒子の沈着過程は、乾性沈着と湿性沈着の両方を扱えること
 - ▶ 全球解析、領域解析のどちらも可能であること
 - ▶ 放射性物質の大気中濃度と沈着量から被ばく線量を評価できること
 - ▶ 被ばく線量評価においては、外部被ばくと内部被ばくを扱えること
- ▶ その他
 - ▶ スーパーコンピュータ等の並列計算機で実行可能こと
 - ▶ 専門家でなくても、解析条件の設定、解析実行、可視化が可能なこと

開発の方針

- ▶ 気象モデル、拡散モデルについては、専門の研究者により広く利用されているもの（オープンソース）を採用する
- ▶ 被ばく線量評価は、国際放射線防護委員会（ICRP）の勧告に準拠した方法により行う（計算モデルは、自社開発した）
- ▶ 解析条件を設定するための GUI を用意する
- ▶ 最低限のコマンド操作のみで実行可能なように対話式的実行環境を用意する
- ▶ データ形式は、被ばく線量評価データも含めて、気象分野で広く利用される NetCDF（Network Common Data Form）形式とする
- ▶ 可視化は、NetCDF 形式に対応したものを利用する

Advance/Emerg の気象モデル

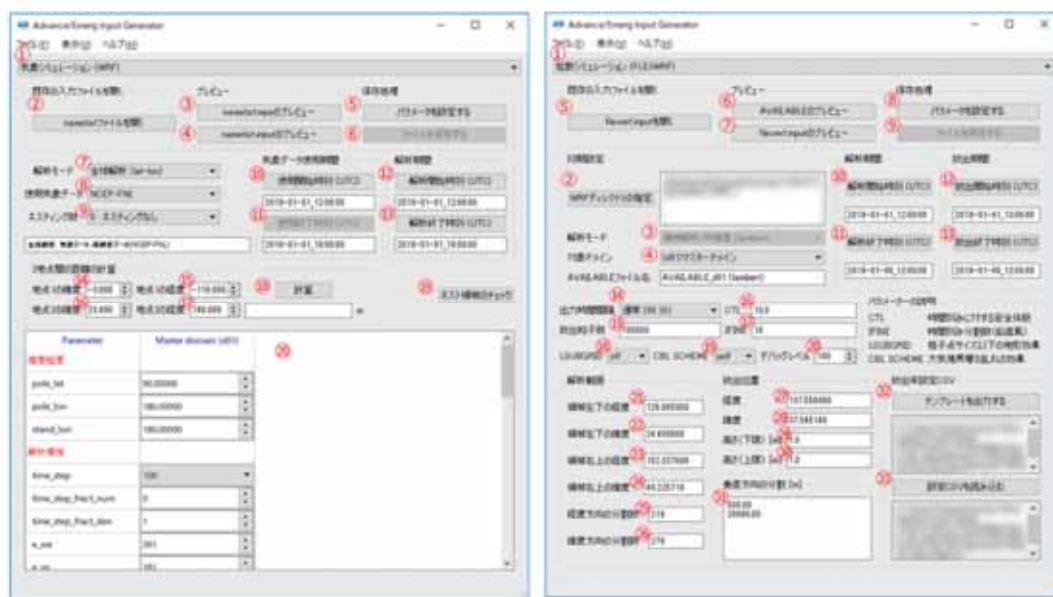
- ▶ **WRF（The Weather Research and Forecasting）** を採用
 - ▶ **米国国立大気研究センター（The National Center for Atmospheric Research, NCAR）** を中心に開発
 - ▶ 鉛直方向の運動方程式に静水圧近似（重力と気圧傾度力が釣り合うと仮定すること）を用いない非静力学モデル
 - ▶ 非静力学モデルのため、メソスケールの気象現象を扱うことが可能
 - ▶ 開発が継続されており、気象現象のシミュレーション研究では世界標準のモデル
 - ▶ 複数のコンポーネントから構成されており、前処理、データ同化、大気化学など広範な利用用途に対応
 - ▶ 領域計算だけでなく、全球計算も可能
 - ▶ Advance/Emerg では WPS（WRF Pre-processing System）と ARW（Advance Research WRF）を利用する

Advance/Emerg の拡散モデル

- ▶ 複数の放出シナリオを迅速に計算できるようにオフラインのモデルを採用
- ▶ ノルウェー大気研究所で開発された粒子拡散モデル FLEXPART (FLEXible PARTicle dispersion mode) をベースに WRF 用にカスタマイズされた FLEXWRF を採用
- ▶ FLEXWRF は、気象モデル WRF の出力結果を駆動場として、ラグランジュ法により粒子の拡散をシミュレーションすることができる (NCEP, ECMWF などの再解析データも利用可能)
- ▶ FLEXPART は、放射性物質の拡散においても、豊富な実績を持っており、世界標準となっているモデルの 1 つ
 - ▶ 欧州の原発事故を想定したプロジェクト (flexRISK など) での利用
 - ▶ CTBTO (包括的核実験禁止条約機構) でも利用されている
 - ▶ 福島第一原発事故の解析にも利用されている

NCEP : National Centers for Environmental Prediction (米国立環境予測センター)
 ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ヨーロッパ中期予報センター)

特徴①：解析条件設定 GUI (Windows)



気象シミュレーションのモード

拡散シミュレーションのモード

特徴②：対話式実行システム

```
01s
name1st.input name1st.wsc
$AEmers_WRF_pre

-----
AEmers_WRF_pre
Advance/Emers ver.2.0.1 Prepost command for WRF
Copyright (c) 2018-2019 AdvanceSoft Corporation. All right reserved.
-----
DATE : 2019-02-15 10:24:40
USER : 
DIR. : 
-----

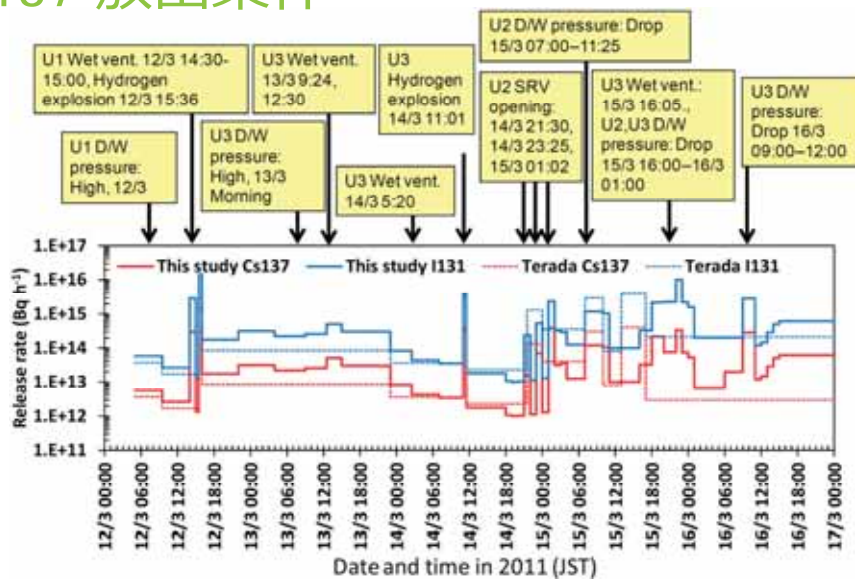
[MENU]
[1] : Run geogrid.exe
[2] : Run ungrb.exe
[3] : Run setgrid.exe
[4] : Run real.exe
[5] : Run wrf.exe
[6] : Exit this script
Select: █
```

ユーザーは Yes/No を入力するだけで、WRF の実行に必要な処理が一通りできる

解析事例①：福島第一発電所事故

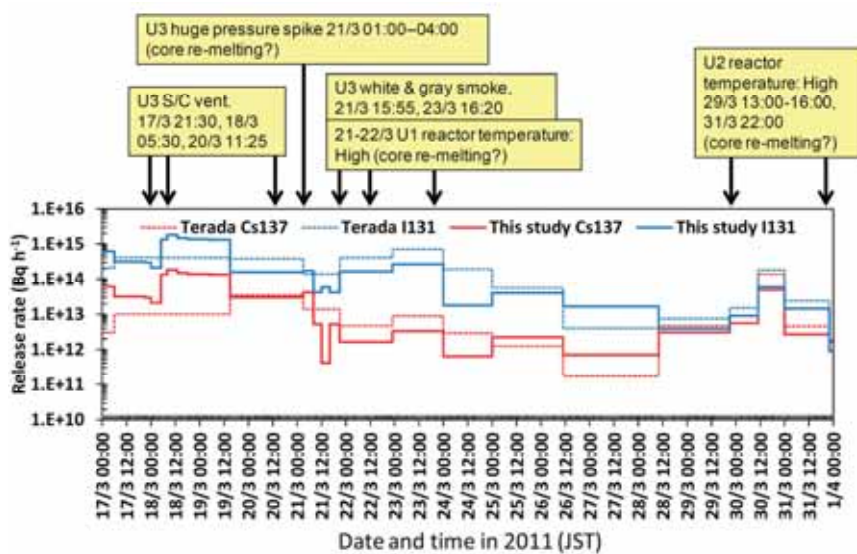
- ▶ 2011年03月11日の東日本大震災に伴う**原発事故**
 - ▶ 地震、および、地震直後に発生した津波により発電施設の全電源が喪失
 - ▶ 核燃料のメルトダウン等が発生し、多量の**放射性物質が放出**
 - ▶ 国際原子力事象評価尺度におけるレベル7（深刻な事故）に認定
- ▶ 領域解析
 - ▶ 福島第一原発からの **Cs-137** 放出・拡散を **東日本領域** について計算
- ▶ 全球解析（今回は省略）
 - ▶ 福島第一原発からの **Cs-137** 放出・拡散を全球領域について計算

Cs-137 放出条件



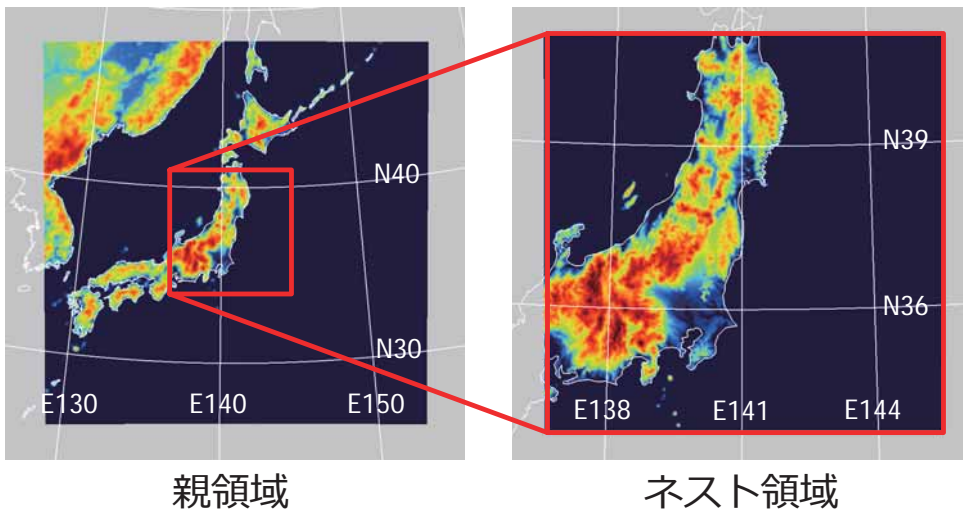
引用：Katata et al., Atmos. Chem. Phys., 15, 1029-1070 (2015)

Cs-137 放出条件のつづき



引用：Katata et al., Atmos. Chem. Phys., 15, 1029-1070 (2015)

解析領域



解析条件（気象モデル）

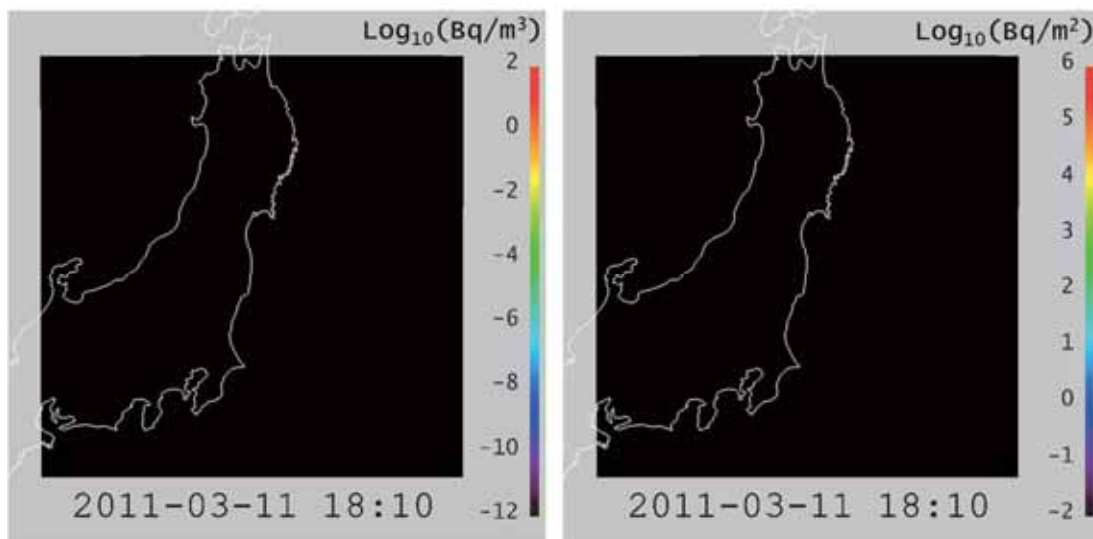
項目	設定
解析期間	2011-03-10 00:00 - 2011-04-01 00:00 (UTC)
使用気象データ	NCEP-FNL (水平解像度: 1度×1度)
ネスティング	1段階
水平方向の解像度	親領域: 10.0 km×10.0 km ネスト領域: 2.5 km×2.5 km
水平方向の分割数	親領域: 240×240 ネスト領域: 320×320
鉛直方向の分割数	41
境界層過程	MYNN (Mellor-Yamada Nakanishi-Niino) Level 2.5
積雲対流過程	KF (Kain-Fritsch) スキーム
雲微物理過程	WDM6 (WRF Double-Moment Class 6)
放射過程	長波: RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) 短波: Dudhia スキーム
地表面過程	深さ 200 cm までの 5 層モデル

解析条件（拡散モデル）

項目	設定
解析期間	2011-03-11 18:00 - 2011-04-01 00:00 (UTC)
放出期間	2011-03-11 20:00 - 2011-04-01 00:00 (UTC)
水平方向の解像度	2.5 km×2.5 km
水平方向の分割数	320×320
放出源の位置	北緯37.421度, 東経141.028度, 高さ20m
放出核種	Cs-137 (粒子状, 粒径0.4μm)
放出量	1.4×10^{16} Bq
放出条件	Katata et al. 2015
計算粒子数	1×10^8
乾性沈着	空気抵抗, 層流底層, 重力沈降の効果を考慮した沈降速度
湿性沈着	洗浄率モデル

放射性崩壊は線量率を評価するときに考慮

解析結果

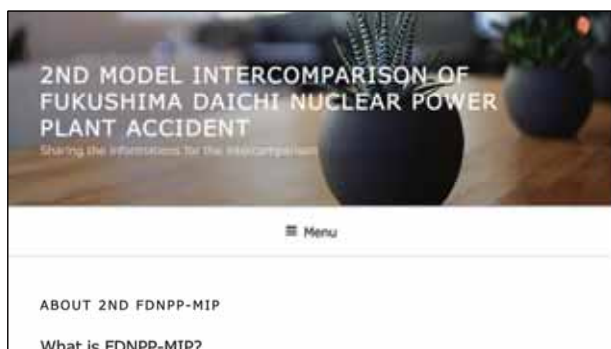


Cs-137の大気中濃度
(地表面から高さ10kmまで)

Cs-137の地表面沈着量
(乾性沈着 + 湿性沈着)

先行研究との比較

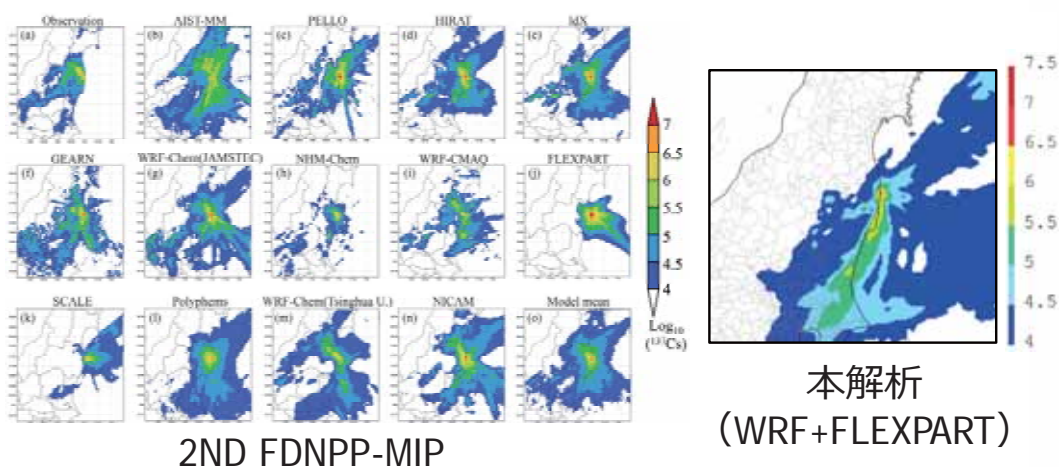
- ▶ FDNPP-MIP : Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant - Model Intercomparison Project
 - ▶ 福島第一原発事故における放射性物質拡散シミュレーションの相互モデル比較プロジェクト
 - ▶ 原発事故以来、精力的に活動し、その成果を公表



2ND FDNPP-MIP

<https://ebcrpa.jamstec.go.jp/wordpress/2nd-fdnpp-mip/about/>

Cs-137沈着量



図は <https://ebcrpa.jamstec.go.jp/wordpress/2nd-fdnpp-mip/about/>より引用

※ 本解析とFDNPP-MIPでは異なる気象データを解析に使用
(NCEPの全球再解析データなので解像度が荒い)

解析事例②：スギ花粉

- ▶ スギ (*Cryptomeria Japonica*)
 - ▶ ヒノキ科スギ亜科スギ属の常緑針葉樹（日本固有種）
 - ▶ 春に開花し，多量の花粉を飛散
- ▶ スギ花粉
 - ▶ 粒径：32 μm
 - ▶ 質量：1.2 ng
 - ▶ 密度：1.05 g/cm²
 - ▶ アレルギー物質（花粉症）
- ▶ 本解析事例
 - ▶ 本年の千代田区におけるスギ花粉飛散量をシミュレーション
 - ▶ 解析結果を千代田区におけるスギ花粉飛散量の観測値と比較



引用：スギ・ヒノキ・サワラ植林(陰影起伏)
<https://map.ecoris.info/suginokihill.html>

スギ花粉飛散量の観測値

一日当たり

積算値

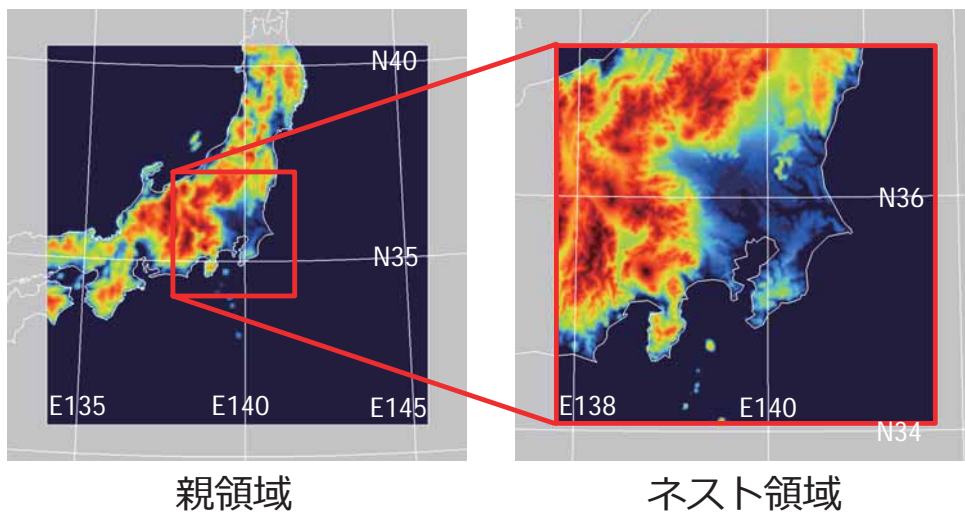


千代田区におけるスギ花粉飛散量（2019年）

データ：東京都福祉保健局

<http://www.fukushihoken.metro.tokyo.jp/allergy/pollen/data/cedar.html>

解析領域



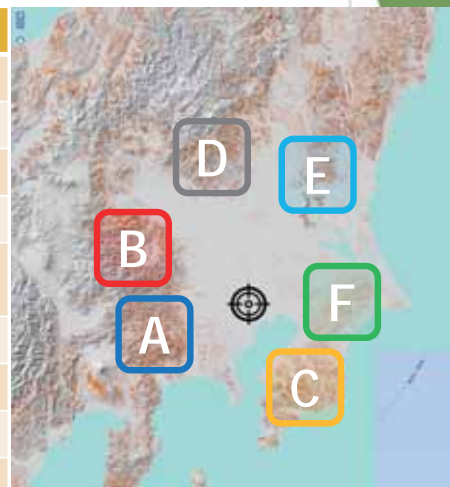
解析条件（気象モデル）

項目	設定
解析期間	2019-02-13 00:00 - 2019-05-15 00:00
使用気象データ	NCEP-FNL（水平解像度: 1度×1度）
ネスティング	1段階
水平方向の解像度	親領域： 6.0 km×6.0 km ネスト領域： 1.5 km×1.5 km
水平方向の分割数	親領域： 180×180 ネスト領域： 240×240
鉛直方向の分割数	41
計算リソース	Xeon E5-2650 v4 @ 2.20GHz 12並列
計算時間	約 198 時間

他の条件は解析事例①と同じ

解析条件（拡散モデル）

項目	設定
解析期間	2019-02-14 00:00 - 2019-05-15 00:00
放出期間	2019-02-14 00:00 - 2019-05-15 00:00
水平方向の解像度	1.5 km×1.5 km
水平方向の分割数	240×240
放出源	東京周辺 6 カ所 (30km×30kmの平面)
放出物質	スギ花粉（粒径 32μm, 質量 12ng）
放出量	(1.4×10 ¹⁸ 個)×6
計算粒子数	(1×10 ⁷)×6
計算リソース	Xeon E5-2650 v4 @ 2.20GHz 12並列
計算時間	約 21 時間



引用： スギ・ヒノキ・サワラ植林(陰影起伏)
<https://map.ecoris.info/suginokihill.html>

他の条件は解析事例①と同じ

放出量の決め方

- ▶ 単位面積あたりのスギ林で生産される雄花数（観測値）
 $N_{FF} = 7717$ [個/m²]

引用：東京都健康安全研究センター
「スギ林の雄花着花状況による予測」（2019）

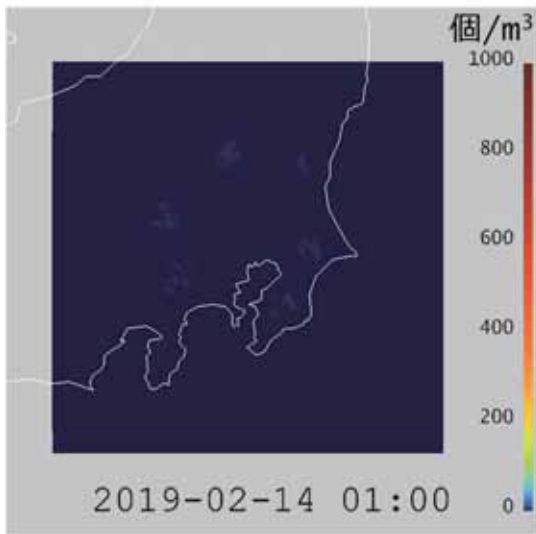
- ▶ 雄花1個あたりの平均花粉粒数
 $N_G = 396000$ [個]

引用：幾瀬マサ「葯中の花粉粒並びに大きさについて」
第4紀研究, 4, 114-149 (1965)

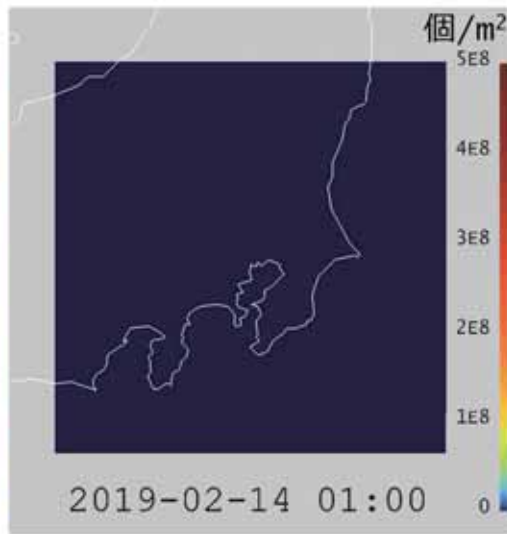
- ▶ 各放出源からのスギ花粉粒放出量

$$\begin{aligned}
 N_{\text{Total}} &= N_{FF}[\text{個}/\text{m}^2] \times N_G[\text{個}] \times \text{面積}[\text{m}^2] \times \text{スギ比率} \\
 &= 7717[\text{個}/\text{m}^2] \times 396000[\text{個}] \times (30[\text{km}])^2 \times 0.5 \\
 &\sim 1.4 \times 10^{18} \text{個}
 \end{aligned}$$

解析結果

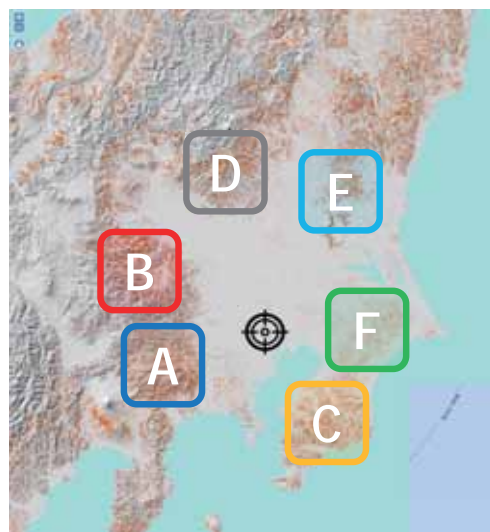
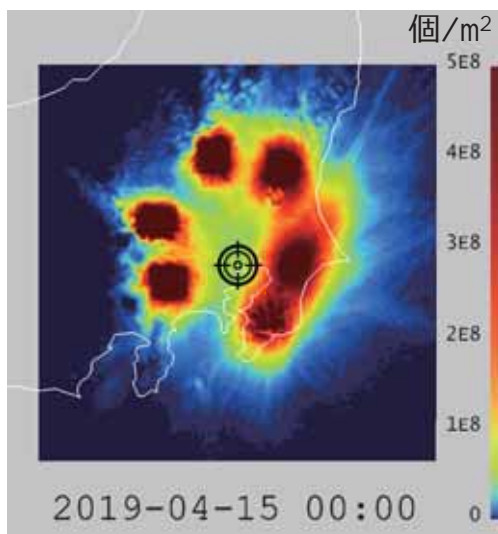


スギ花粉粒の大気中濃度
(地表から高さ10kmまで)



スギ花粉粒の地表面沈着量
(乾性沈着+湿性沈着)

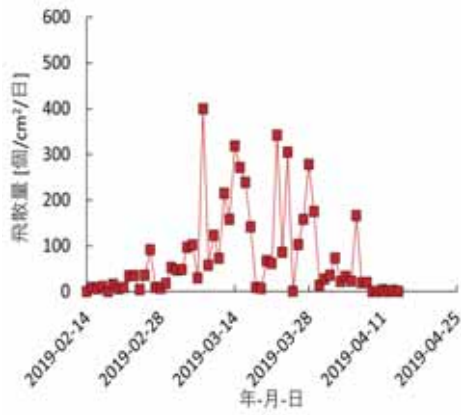
観測値との比較



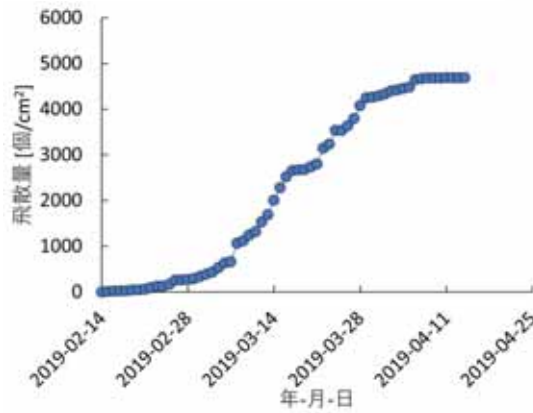
➡ 千代田区におけるスギ花粉飛散量の観測値と比較

観測値との比較

※観測値のプロットは省略



1日当たりの飛散量

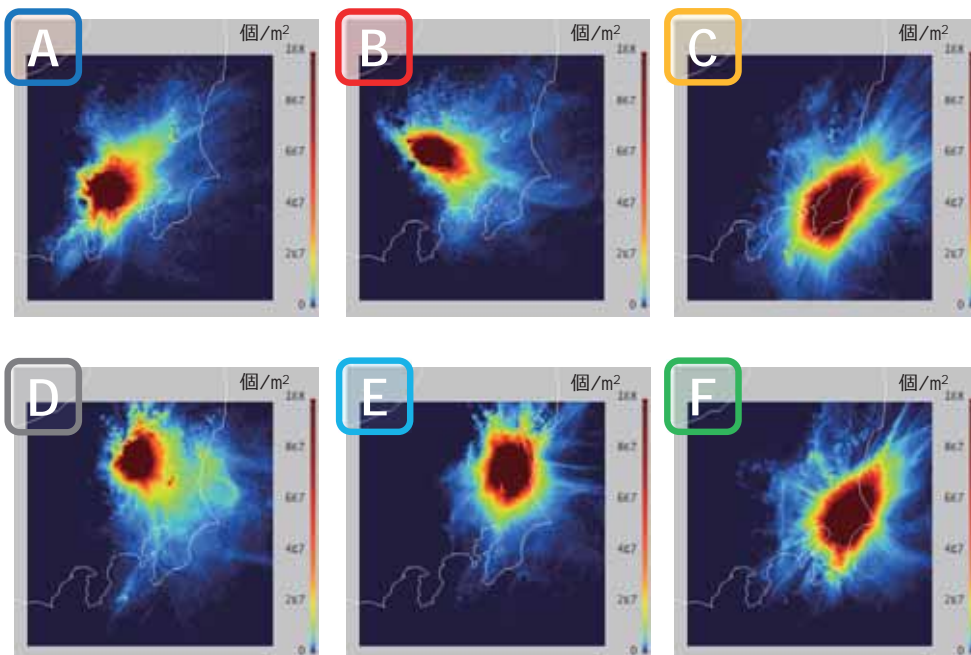


積算値

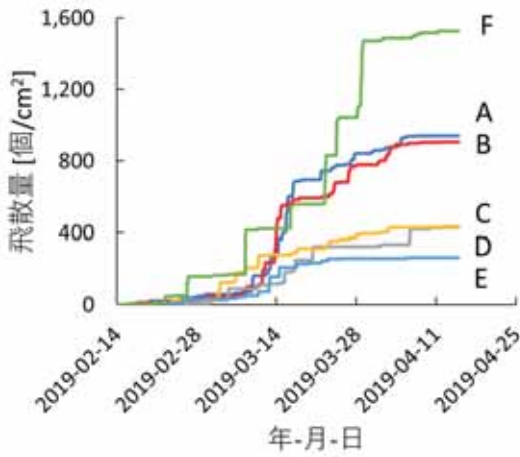
観測値データ：東京都福祉保健局

<http://www.fukushihoken.metro.tokyo.jp/allergy/pollen/data/cedar.html>

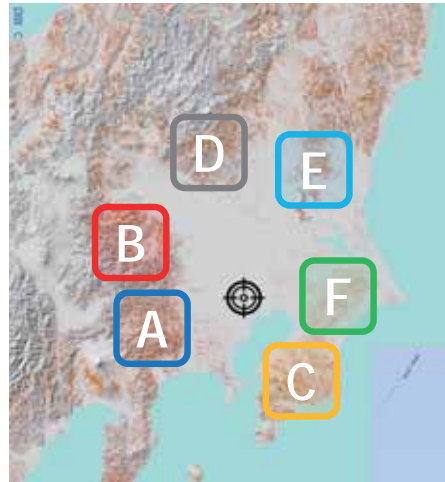
各放出源からの寄与



各放出源からの寄与 (@千代田区)



千代田区のスギ花粉飛散量に対する
各放出源からの寄与



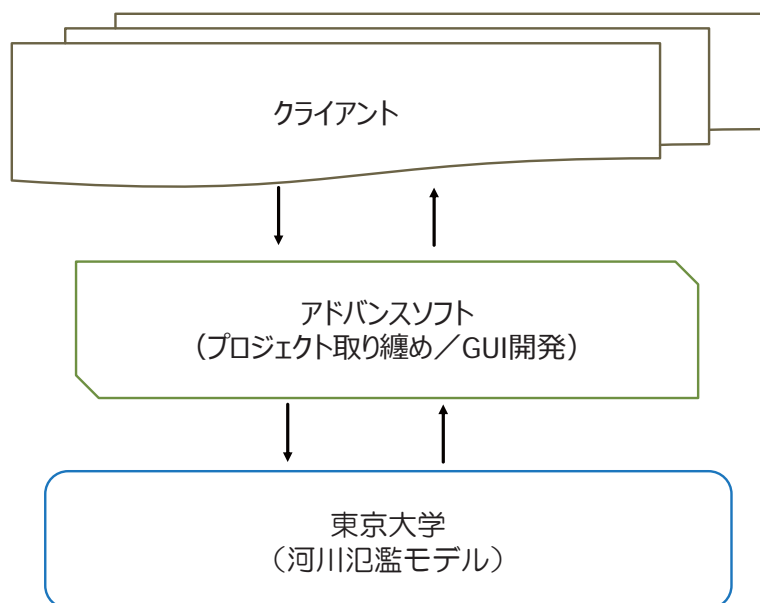
引用：スギ・ヒノキ・サワラ植林(陰影起伏)
<https://map.ecoris.info/suginohikihill.html>

河川シミュレーションに関する取り組みの紹介

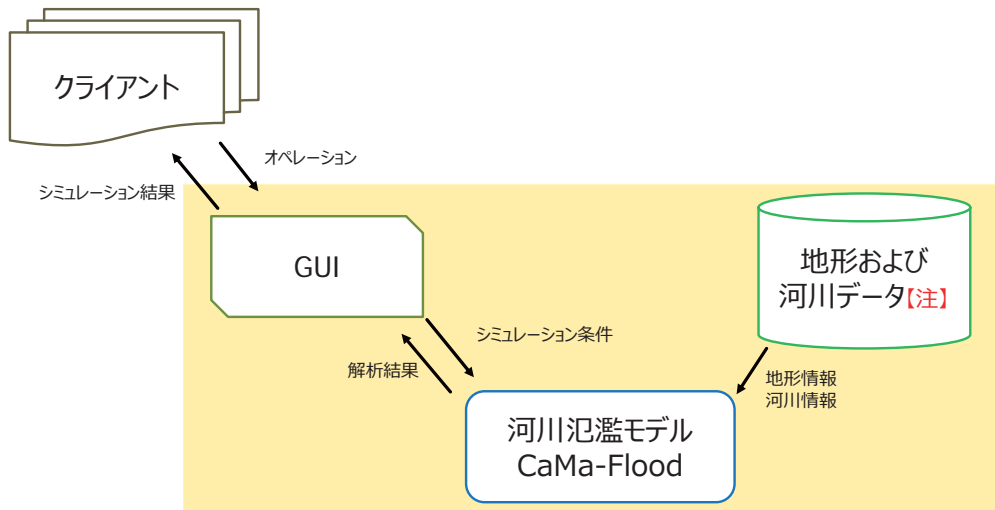
河川プロジェクトの概要

- ▶ 河川プロジェクト（マルチクライアントプロジェクト「河川氾濫シミュレーションシステム開発」）では、東京大学生産技術研究所の山崎大准教授が開発した河川氾濫プログラム「全球地表水動態モデル CaMa-Flood」を基に実用的なシステムの開発を目指している。
- ▶ CaMa-Flood は全球スケールから詳細な地域の河川流量、水位まで計算が可能です。
- ▶ マルチクライアントプロジェクトにご参加いただいた企業様に向けて 3 月末に初期バージョンをリリースする。
- ▶ ユーザフォーラムを設置して、山崎大准教授をはじめ、河川氾濫シミュレーションに係る情報交換を実施する。

プロジェクト構成



システム構成



河川氾濫シミュレーションシステム

【注】海外の局所地域データは有償となります

CaMa-Flood は東京大学生産技術研究所の山崎大准教授により開発された
全球地表水動態モデルであり、Apache License の下で公開されています。

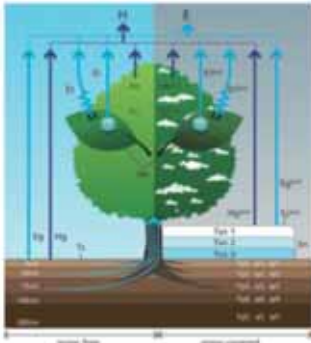
全球地表水動態モデル CaMa-Flood

【主な特徴】

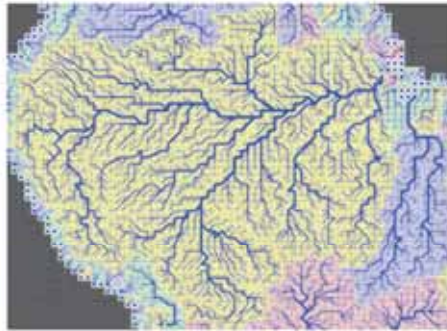
- ▶ 全球（**地球上の全ての河川を対象とする**）解析が可能である
- ▶ 詳細地形をパラメータ化することで、複雑な氾濫原における流れを**精度をほぼ落とさず**に表現することができる
- ▶ 気象データ、気候モデルデータも取り入れて、様々な気象シナリオの条件で計算可能
- ▶ 既存の 2 次元氾濫モデルと比べて**数万～数百万倍高速**な洪水氾濫計算を実現している
- ▶ 欧州中期気象予報センター（ECMWF）の河川モデルに採用されている
- ▶ 国内外 100 以上の研究機関で利用されている

氾濫原：洪水時に河川から氾濫する範囲にある低地部分

陸面サブモデルと全球地表水動態モデル



MATSIRO (Takata et al. 2003, Nitta et al. 2011)



CaMa-Flood (Yamazaki et al., 2011; 2013; 2014)

陸面における水熱収支を計算

入力：気温・降水・風速・放射など
出力：蒸発散・土壌水分・流出など

地球規模で河川による水輸送を計算

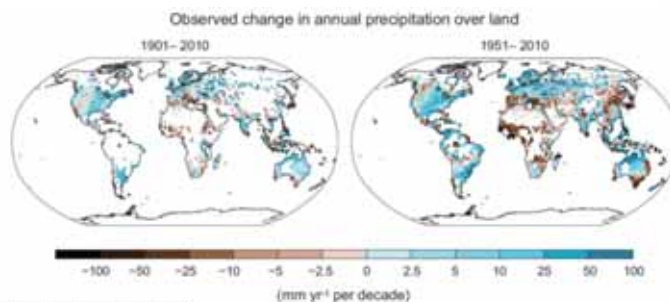
入力：流出
出力：河川流量・浸水域・水位など

東京大学生産技術研究所 山崎准教授 ご提供資料より抜粋

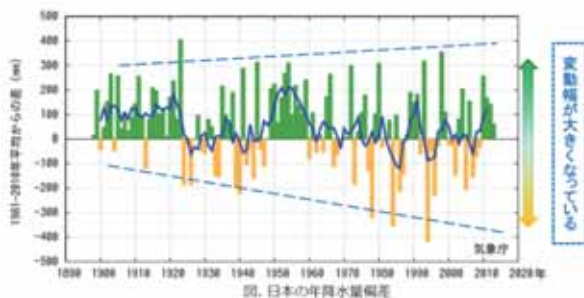
- ▶ 元々は、IPCC の地球温暖化予測で使われる気候モデルや地球システムモデルにおける陸面サブモデルの一部として開発された陸域水文モデル ⇒ **気候モデルの結果をそのまま入力として利用できる**

用途例

- ▶ 陸域における地球温暖化による気候変動の影響評価
- ▶ 水資源アセスメント
- ▶ 洪水予測
- ▶ 洪水リスク評価



降水量変化の分布 (観測) IPCC 5次報告書より



気象庁 HP
図. 日本の年間降水量偏差

現在だけでなく、IPCC の温暖化シナリオの降水量変化を入力として河川氾濫の解析が可能

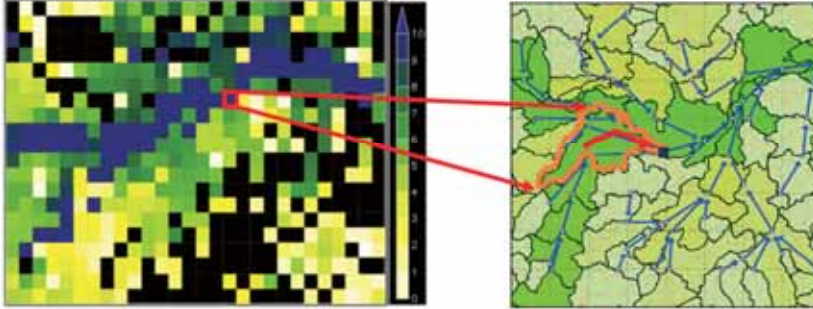
気象庁 HP

特徴①：詳細地形のパラメータ化

- ▶ モデルは低解像度で高速に実行、全球解析が可能に
- ▶ 低解像度でも独自のパラメータ化で詳細地形を扱うことが可能に

衛星データによる現実的な地形パラメータの同定

(a) Simulated depth at 0.25deg resolution



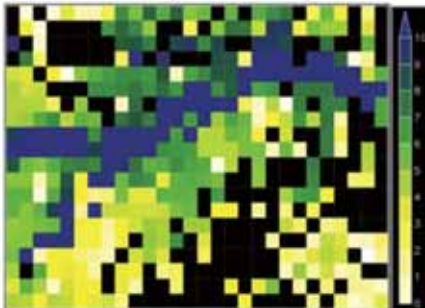
低解像度河川モデルの各グリッドと高解像度衛星データの集水域の対応関係を保存

東京大学生産技術研究所 山崎准教授 ご提供資料より抜粋

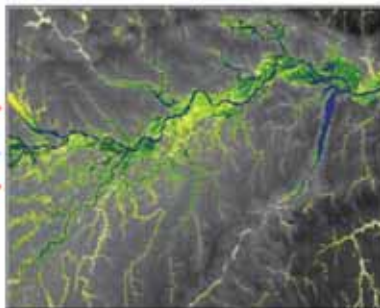
特徴②：ダウンスケーリングによる高解像度化

- ▶ 低解像度のモデル出力から、高解像度の地形データにダウンスケーリングすることで、瞬時に高解像度化できる

(a) Simulated depth at 0.25deg resolution



(b) Downscaled depth at 500m resolution



東京大学生産技術研究所 山崎准教授 ご提供資料より抜粋

【モデル解像度】

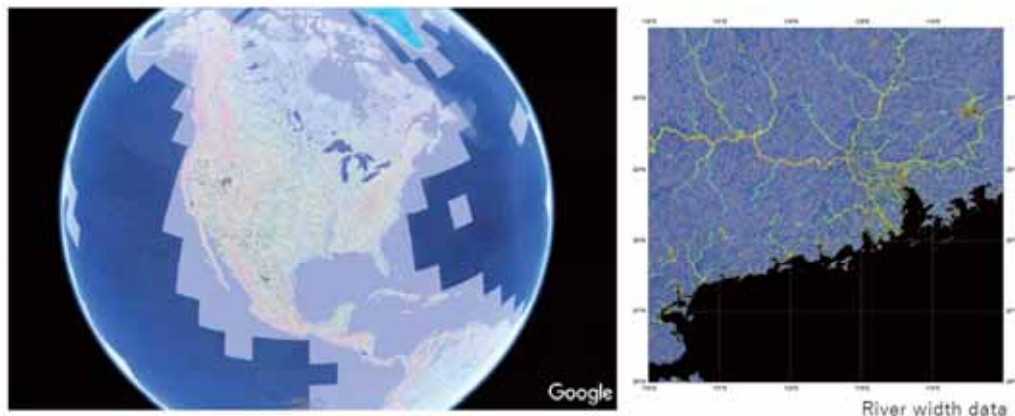
全球解析：25 km
領域解析：2 km

【ダウンスケーリング後の解像度】

全球解析：最大 90 m
領域解析：最大 30 m

特徴③：全球高精度河川地形データ

- ▶ CaMa-Flood では、最新の全球高精度河川地形データ MERIT Hydro が使用されている



高解像度の河川網データに加え、川幅や氾濫原地形データも整備
2019年5月から公開4ヶ月でユーザー数が300超。
MERIT DEMと並んで**地球科学の基盤データ**として評価される

東京大学生産技術研究所 山崎准教授 ご提供資料より抜粋

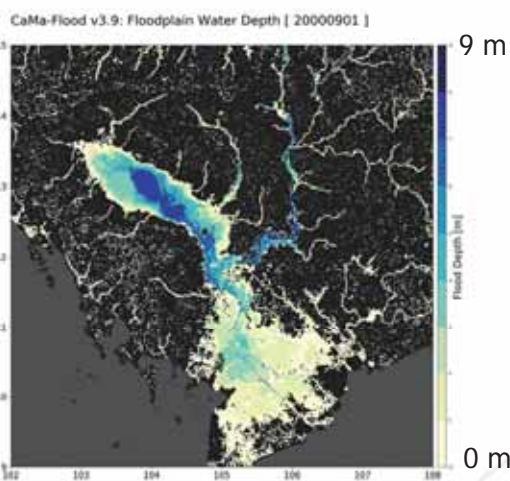
解析事例

- ▶ 全球解析
 - ▶ 解像度：15 min ~ 25 km
 - ▶ 解析期間：2000/01/01 ~ 2001/12/31
 - ▶ 実行時間：Windows PC で 50 分

7~11月にかけて、メコン川流域で過去70年間
において最大の洪水が発生

カンボジア東南部で死者333人
タイで死者52人
ベトナムで死者481人

- ▶ 図はメコンデルタにおける浸水深
 - ▶ ダウンスケーリング後の解像度：1 min ~ 2 km



前処理 GUI（画面は開発中のもの）

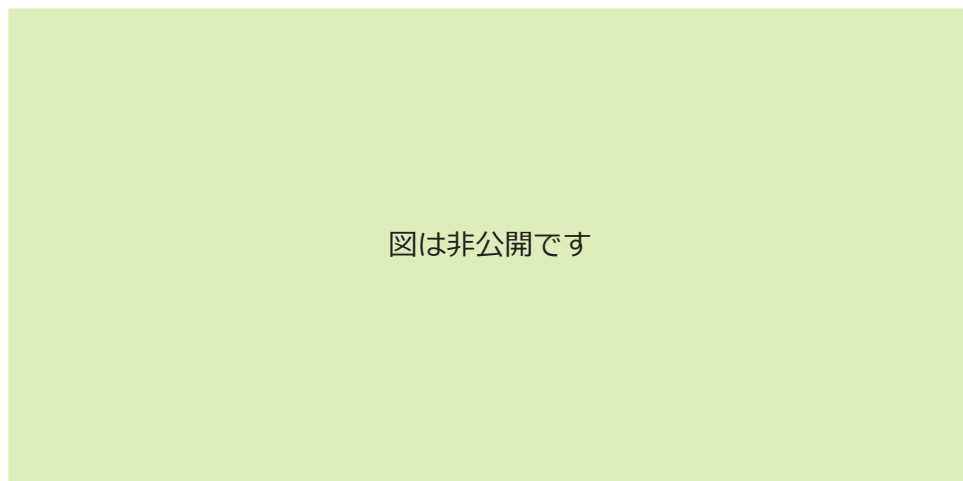
- ▶ 動作環境
 - ▶ OS : Windows10
- ▶ CaMa-Flood の解析条件の作成
 - ▶ 各設定項目にデフォルト値を用意
 - ▶ Namelist 形式の作成、読み込み機能

図は非公開です

後処理（可視化） GUI の基本機能

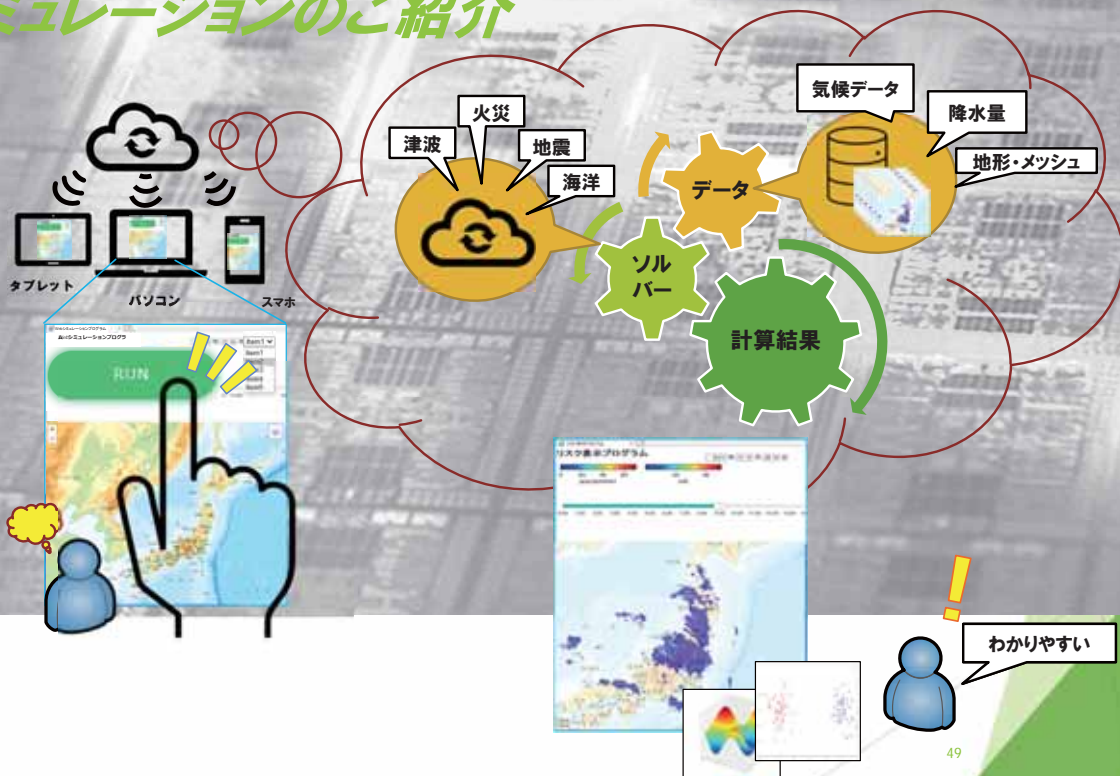
- ▶ QGIS の可視化プラグインとして動作
- ▶ タイル地図の表示
- ▶ CaMa-Flood 出力データの読み込みと表示
- ▶ 位置情報付 Tiff 画像の読み込みと表示
- ▶ 選択した地点の物理量の値を取得
- ▶ 時系列データとしてグラフを表示
- ▶ 複数レイヤーに対応
- ▶ レイヤーの色設定（グラデーション・透過度）
- ▶ 画像・動画の保存
- ▶ プロジェクトの保存

画面（開発中） （ダウンスケール済のデータ表示の例）



Webシミュレーションに関する取り 組みの紹介

Webシミュレーションのご紹介

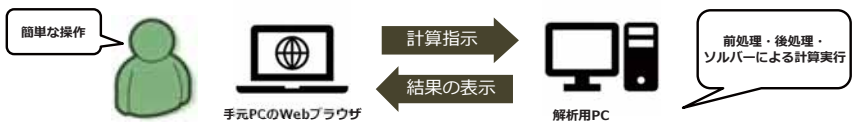


Webを活用したシミュレーション：イメージ

～ Webを活用したシミュレーションとは ～

Webブラウザでシミュレーションをすることです。

PCにシミュレーションソフトウェアをインストールした場合はそのPCにリモートで接続しないと使えませんが、Webを活用したシミュレーション環境を構築すれば、自宅のPCのWebブラウザでも、あるいはタブレットやスマホでもシミュレーションを実施したり、結果の共有をすることが可能になります。



- ▶ デモ：流体解析+プリポスト（WEBブラウザ上で動作）

<http://websimulation.advancesoft.jp/>

防災シミュレーション事業の紹介

熱流動エンジニアリングセンター 副センター長
主管研究員 富塚 孝之

【オンラインセミナー】防災・環境シミュレーション
～気象と防災シミュレーションの動向～
2021年3月26日（金）
アドバンスソフト株式会社



防災シミュレーションに関する解析事例

- ① 領域海洋循環モデルROMS + LTRANSによる解析
- ② 非定常降下火山灰輸送評価コード FALL-3Dによる解析
- ③ 津波シミュレータ T-STOCによる解析
- ④ 領域拡散モデルRAMS+HYPACTでによる筑波山のまわりの拡散解析
- ⑤ 津波遡上解析ソフトウェアの開発（二相流 + 構造の粒子法）
- ⑥ 地下鉄駅構内でのサリンの拡散解析（NHK総合テレビで報道）
- ⑦ 建物内の火災安全・防災のためのシミュレータAdvance/EVE SAYFAによる解析
- ⑧ 地震・噴火解析ソフトウェアAdvance/FrontSTR/GEOSによる解析



① 領域海洋循環モデルROMS + LTRANS による解析

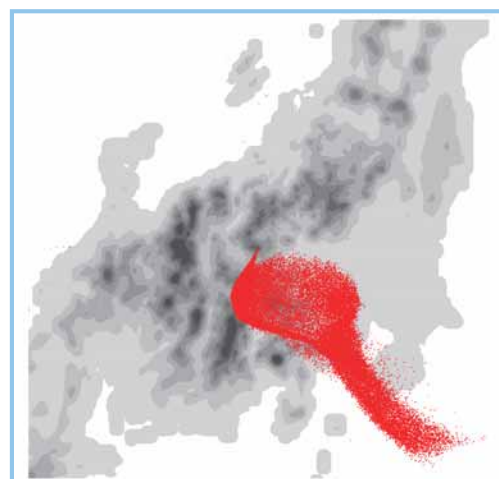
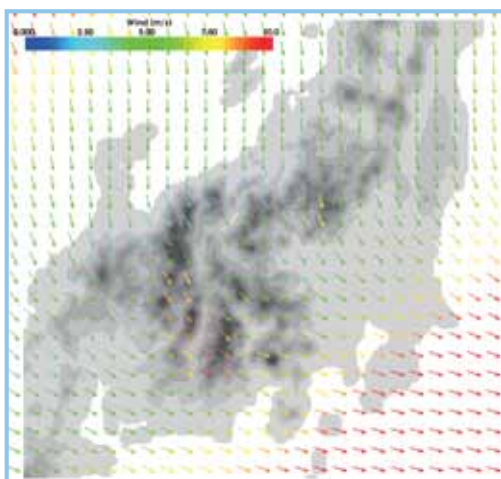
- 事故や災害により有害物質が海洋へ拡散した場合を想定し、太平洋や大西洋などの広域スケールにおける汚染状態を予測
- ROMS (Regional Ocean Modeling System) ※ 1
 - 海洋力学モデル（海流計算）および海洋拡散モデルを有し、オンラインで濃度場を計算
 - 運動方程式はReynolds-averaged Navier-Stokes 方程式
 - Euler型トレーサ輸送モジュール
- LTRANS (Larval TRANSport Lagrangian model) ※ 2
 - 計算された流動場を使ってオフラインで拡散物質を計算
 - ラグランジュ型のトレーサ追跡モジュール（粒子追跡モデル）

※1 <http://www.myroms.org/index.php>

※2 <http://northweb.hpl.umces.edu/LTRANS.htm>

② 非定常降下火山灰輸送評価コード FALL-3Dによる解析

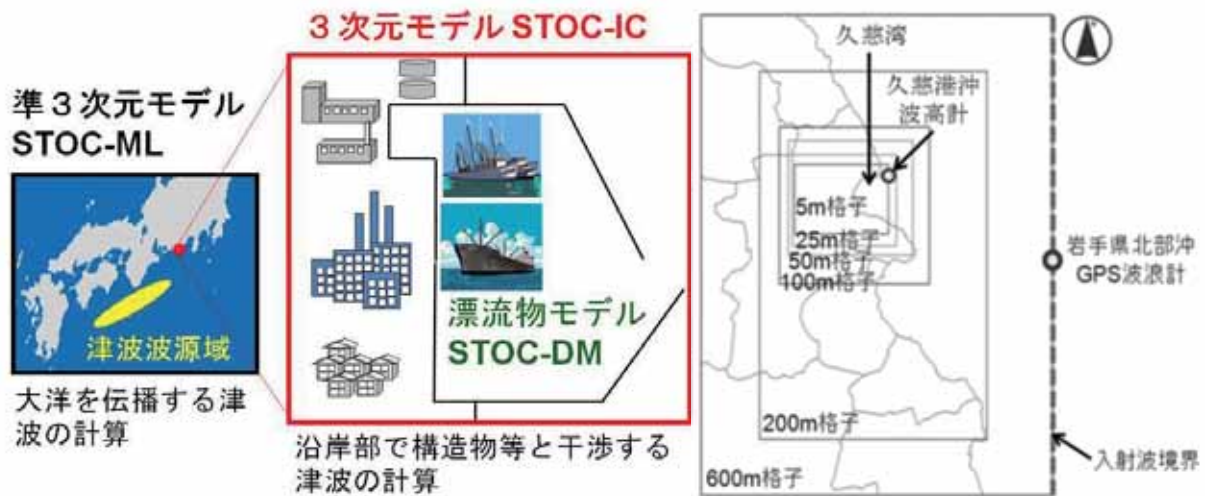
- 火山噴火に伴う火山灰降下の影響を数値シミュレーションにより予測する



浅間山からの噴煙を想定した火山灰予測

③ 津波シミュレータ T-STOCによる解析

- 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 様で開発されたソフトウェア



STOCのモデル構成

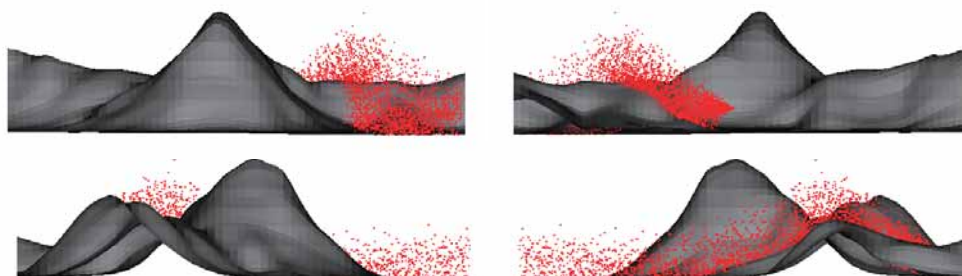
※図は <http://www.pari.go.jp/unit/trc/research/stoc01.html> より引用

ネスティングにより広域から臨海部まで対応可能

※富田孝史・本多和彦・千田優 "高潮津波シミュレータ (STOC) による津波被害解析手法", 港湾空港技術研究所報告 第55巻第2号

④ 領域拡散モデルRAMS+HYPACTによる筑波山のまわりの拡散解析

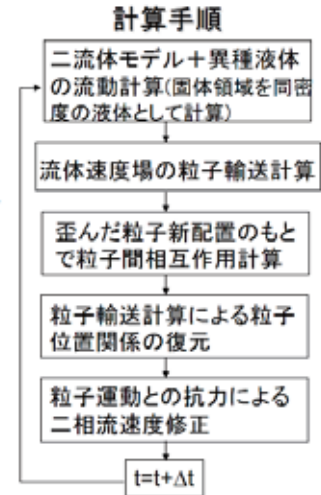
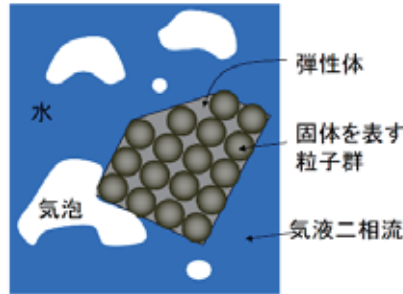
- 大気拡散シミュレーションシステム
 - 気象状態（風向、風速、気温、気圧、湿度、降雨量）を予測し、拡散物質の濃度シミュレーションをおこなう
 - 気象モデル：非静力学メソスケールモデル
 - 拡散モデル：移流・拡散のほかに地表沈着量も予測
 - 放射性物質の場合、地表沈着量から被ばく線量を算出



つくば山におけるトレーサ輸送解析

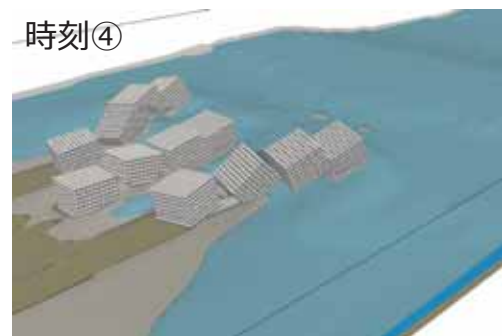
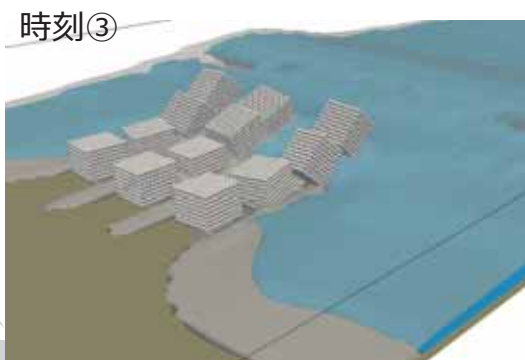
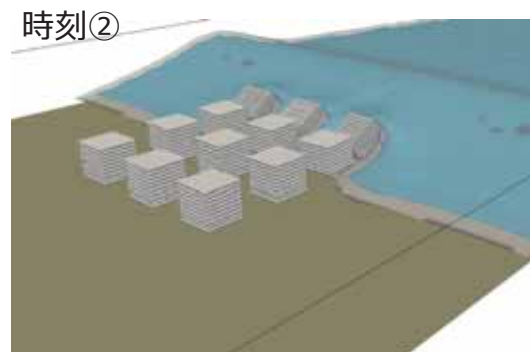
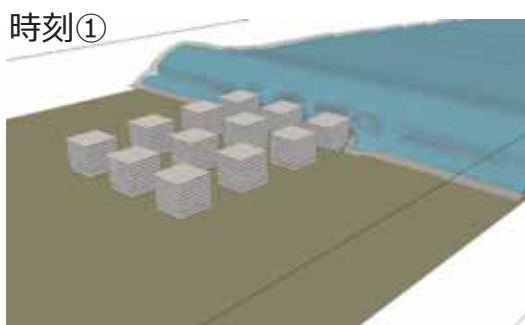
⑤ 津波遡上解析ソフトウェアの開発 (二相流 + 構造の粒子法連成解析)

- 津波による建造物の破壊、衝突が評価可能とするため、流体構造連成プログラムを開発した
- 流体：二流体モデル
- 構造：粒子モデル



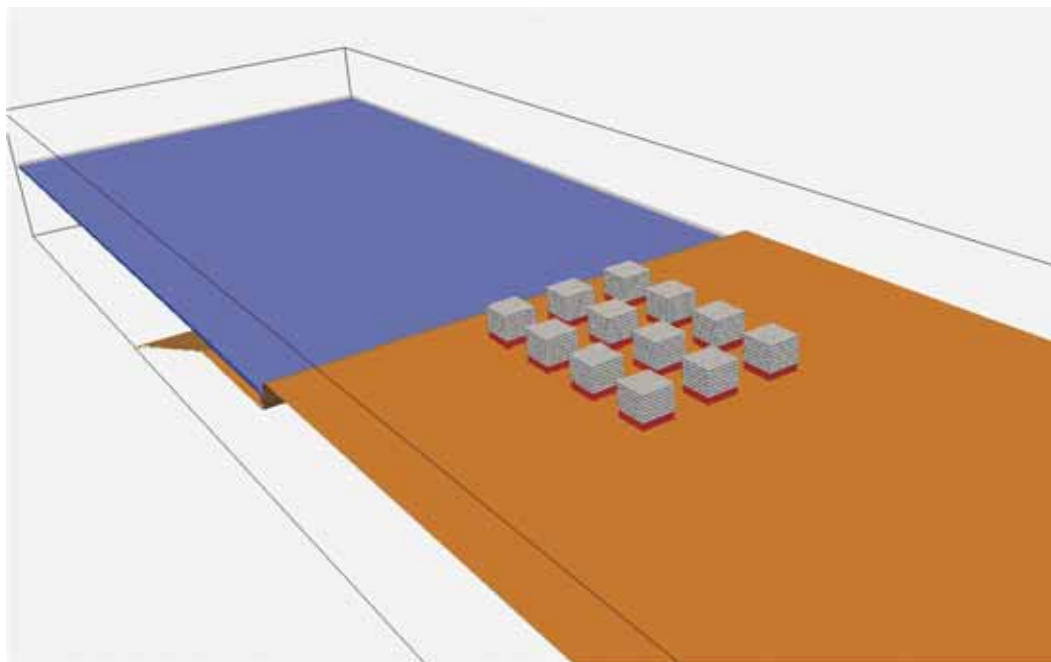
気液二相流 - 固体連成解析モデル

⑤ 津波遡上解析ソフトウェアの開発 (二相流 + 構造の粒子法連成解析)



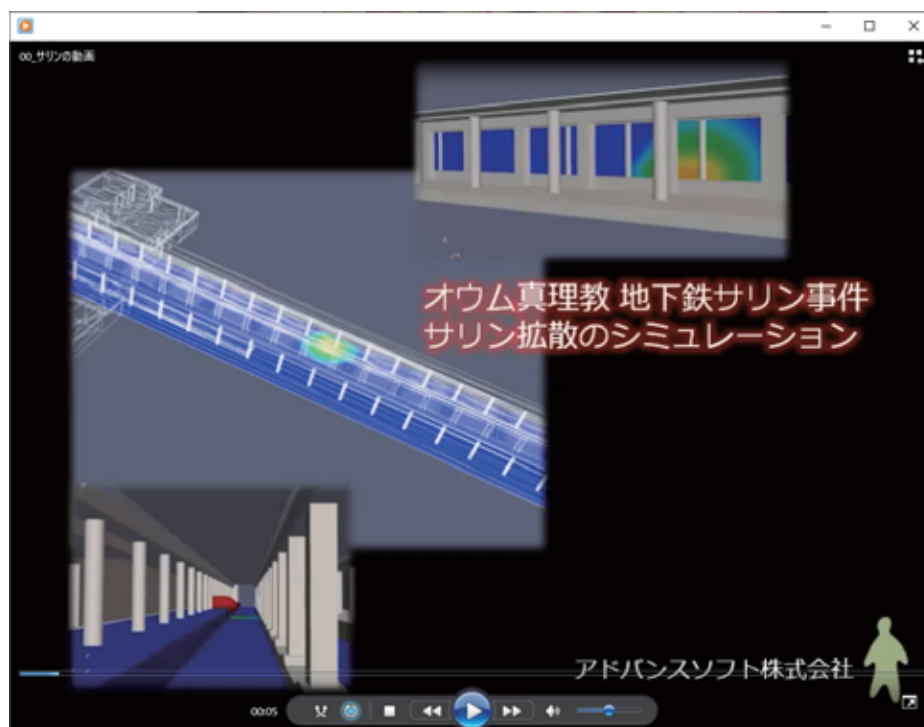
気液二相流 - 固体連成解析モデル

⑤ 津波遡上解析ソフトウェアの開発 (二相流 + 構造の粒子法連成解析)

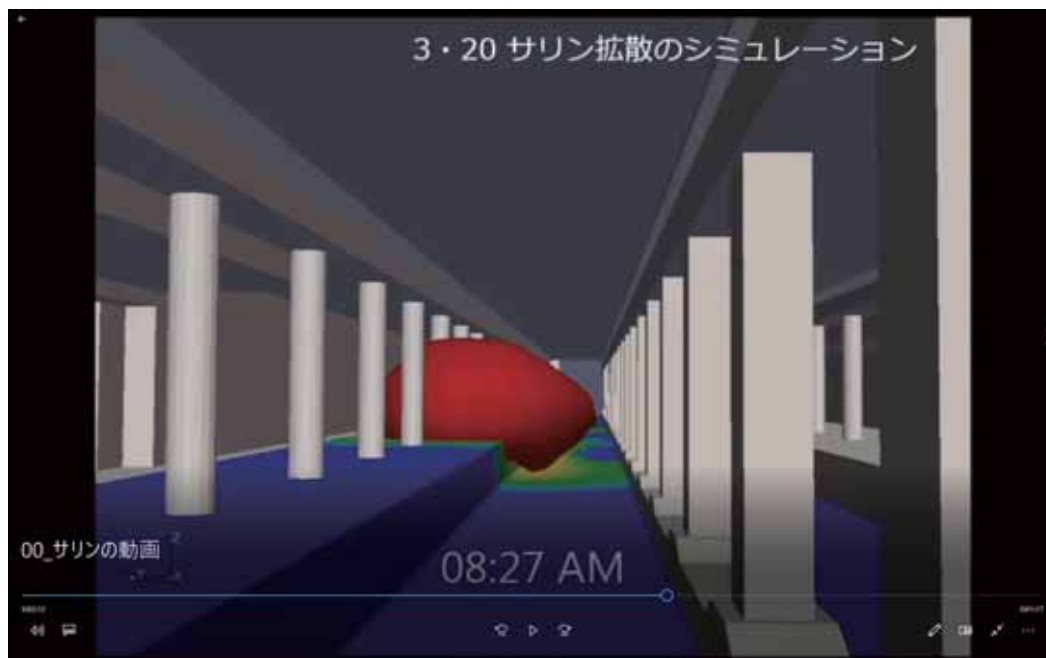


気液二相流 - 固体連成解析モデル

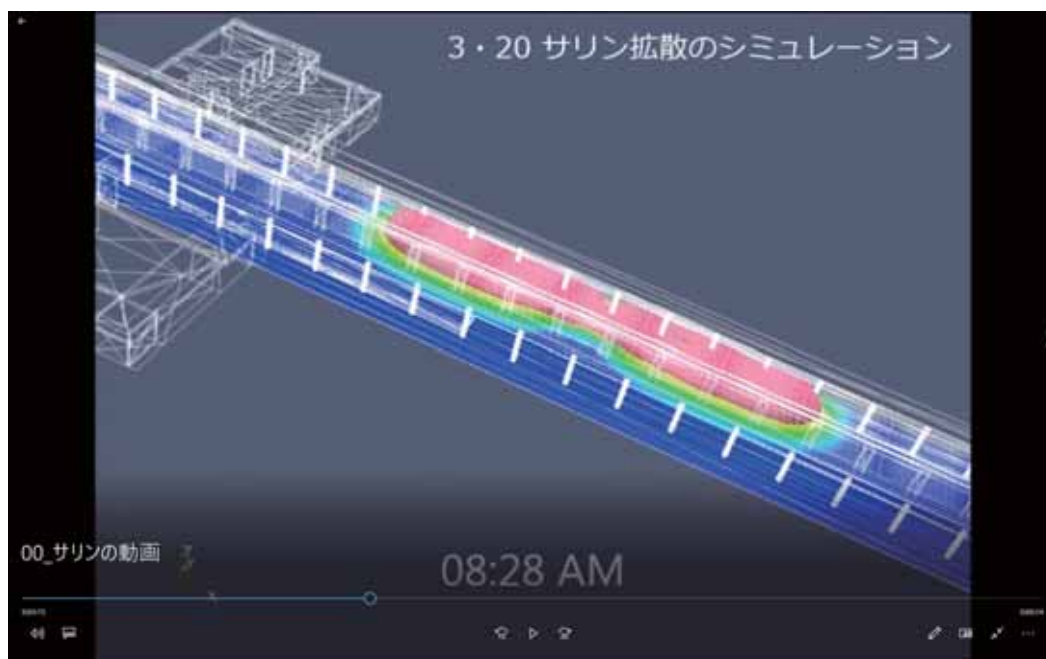
⑥ 地下鉄駅構内でのサリンの拡散解析 (NHK総合テレビで報道)



⑥ 地下鉄駅構内でのサリンの拡散解析 (NHK総合テレビで報道)



⑥ 地下鉄駅構内でのサリンの拡散解析 (NHK総合テレビで報道)

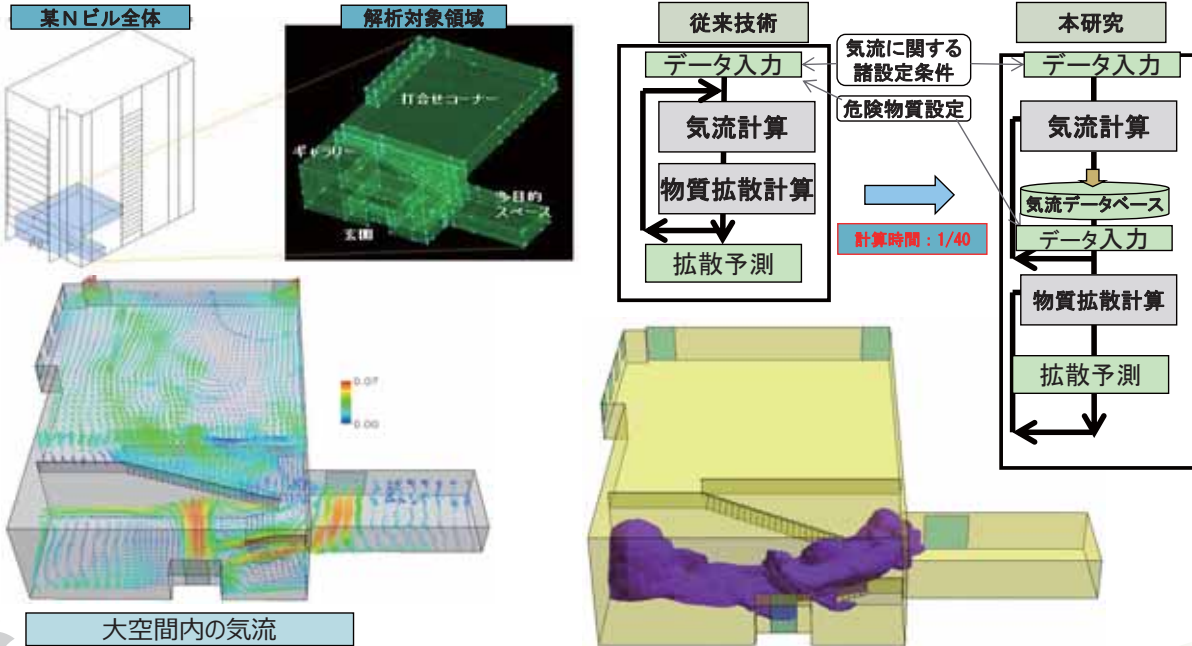


⑦ 建物内の火災安全・防災のためのシミュレータ AdvanceSoft Advance/EVE SAYFAによる解析



http://www.advancesoft.jp/

a) 実在のビル内大空間の拡散解析 b) システムの高速化



文部科学省「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発プロジェクト (RSS21)」並びに「文部科学省 安全・安心科学技術プロジェクト」によって得られた研究成果を利用しています。

滞在10分以内に半数が死亡するサリン濃度範囲

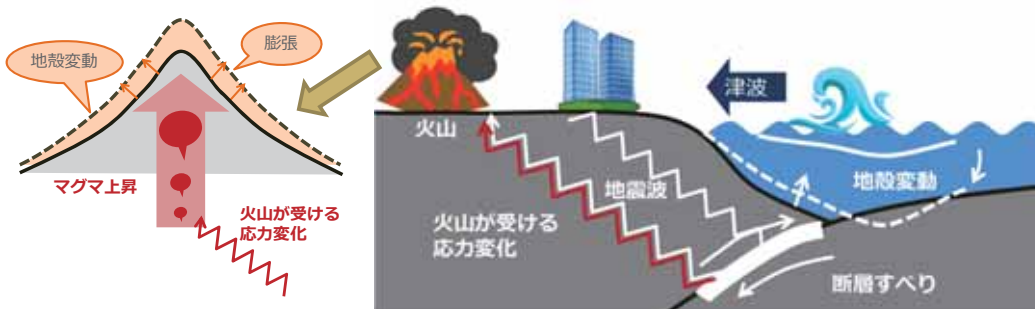
⑧ 地震・噴火解析ソフトウェア AdvanceSoft Advance/FrontSTR/GEOSによる解析



http://www.advancesoft.jp/

• 何ができるか

- 断層やマグマ供給源を設定して、地殻内部と地表で変位や応力を計算
- 粘弾性による変位や応力の緩和を計算
- マグマが割れ目を拡大しながら上昇する過程を計算
- 断層からの地震波の伝播を計算
- 観測データから震源やマグマ供給源の位置と状態を計算



文部科学省「戦略的基盤ソフトウェアの開発プロジェクト」並びに「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発プロジェクト (RSS21)」によって得られた研究成果を利用しています。

- **ご清聴ありがとうございました**





警告

このレポートに収録されている文章および内容については、ご自身のために役立つ用途に限定して無料配布しています。このレポートを、販売、オークション、その他の目的で利用するには、著作権者の許諾が必要になります。このレポートに含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。