

大気中の汚染物質の移流拡散 地球流体力学の立場から

林 祥介

shosuke@gfd-dennou.org

神戸大学 理学研究科

地球惑星科学専攻・惑星科学研究センター(CPS)

資料協力

GFD Dennou Club(地球流体電脳倶楽部)



2012-09-08 於 静岡県立大学小講堂
静岡県立大学 一般公開 大学授業
放射能・原発・地震・津波 —自然の脅威に挑む科学最前線—



目次

0. 私は誰

1. はじめに

2. 大気中の物質拡散にまつわる流体力学 煙を例にして

3. 大気中の物質拡散を計算するための 基礎知識

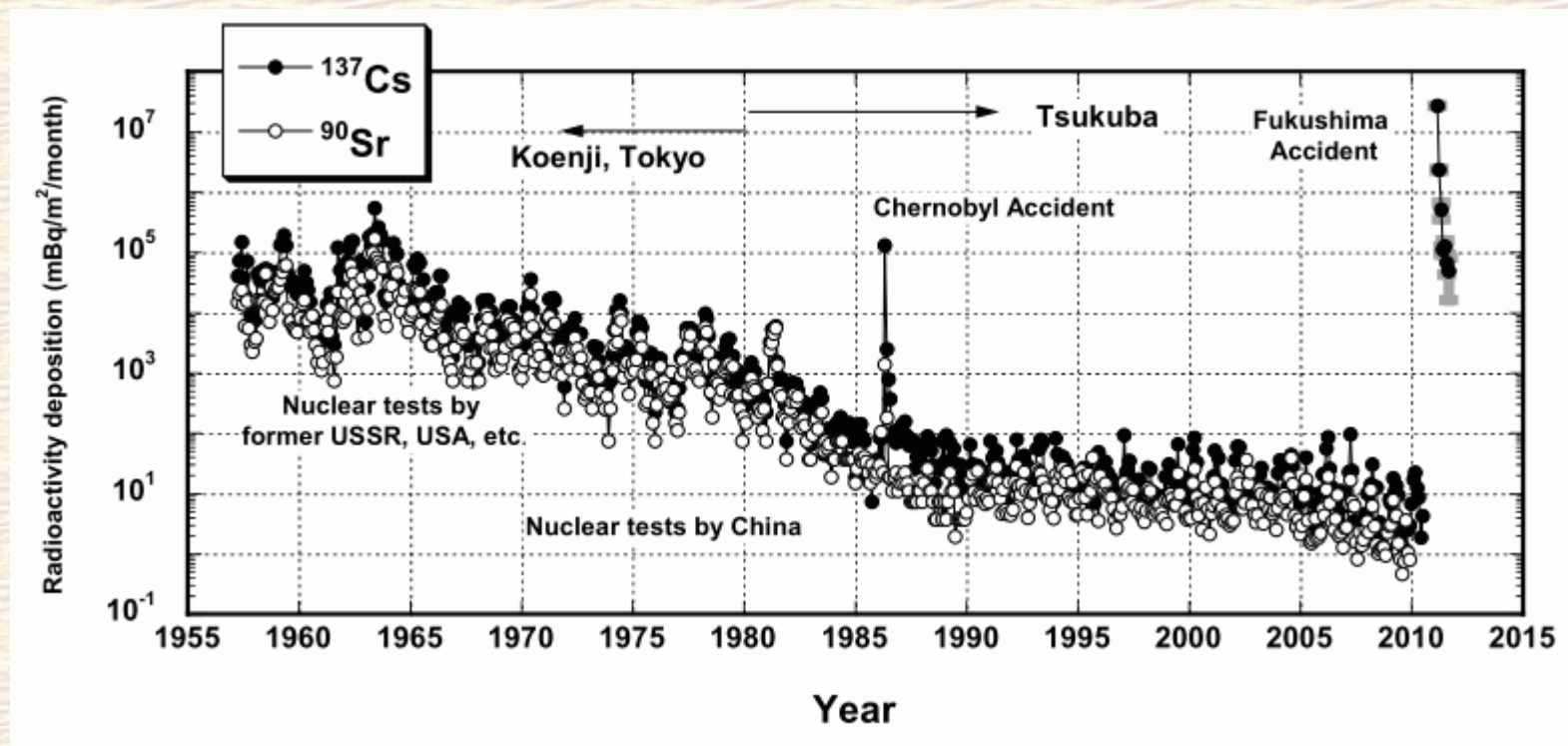
4. SPEEDIについて

5. 観測と予測：気象の場合と放射線の場合

林 祥介 略歴

- 1958.12 生まれ
- 1960' たくさんの核実験
- 1970' 日本の原発営業運転開始
- 1979.03 スリーマイル島事故
- 1981.03 東京大学 理学部 地球物理学科卒
- 1981.04 東京大学 理学系研究科 地球物理学専攻 (気象学岸保勘三郎研究室)
- 1984.01 東京大学大型計算機センターS810稼働
- 1986.04 チェルノブイリ原発事故
- 1987.12 気象庁全球数値予報開始
- 1985.01 同 助手(気象学松野太郎研究室)
- 1987.03-1988.04 MIT (work with Profs. Lindzen, W.R.Young)
- 1988.04- 地球流体電脳倶楽部(酒井・塩谷・余田・林)
- 1989.01 東京大学国際理学ネットワーク(TISN; 釜江, 坂村, 村井,...)
- 1991.04 気候システム研究センター(CCSR)
- 1994.04 北海道大学 大学院地球環境科学研究科 大気海洋圏環境科学 助教授
- 1995.04 東京大学 大学院数理科学研究科 助教授
- 1995.12 高速増殖炉(もんじゅ)ナトリウム事故
- 1998.04 北海道大学 大学院理学研究科 地球惑星科学専攻 教授
- 1999.09 JCO東海村臨界事故
- 2002.03 地球シミュレータ運用開始
- 2006.04 同 大学院理学研究院・理学院宇宙理学専攻 教授
- 2007.04 神戸大学 大学院理学研究科 地球惑星学専攻/惑星科学研究センター 教授
- 2008.07- G-COE 惑星科学研究教育拠点の形成(神戸-北大)
- 2011.03.11 東日本大震災
- 2012.09 京コンピュータ運用開始

林 祥介 略歴？



「環境における人工放射能の研究2011」

気象庁気象研究所

http://www.mri-jma.go.jp/Dep/ge/ge_report/2011Artifi_Radio_report/

目次

0. 此処は何処で私は誰
1. はじめに
2. 大気中の物質拡散にまつわる流体力学
煙を例にして
3. 大気中の物質拡散を計算するための
基礎知識
4. SPEEDIについて
5. 観測と予測：気象の場合と放射線の場合
6. おわりに

はじめに

地球流体電脳倶楽部 大気中物質拡散入門執筆グループ

(林 祥介, 石川裕彦, 乙部直人, 酒井 敏, 塩谷雅人, 竹見哲也, 坪木和久, 山田道夫, 余田成男), 2011:

大気中の物質拡散入門, 原子力発電所からの放射性物質拡散を念頭に
<http://www.gfd-dennou.org/library/kakusan/>

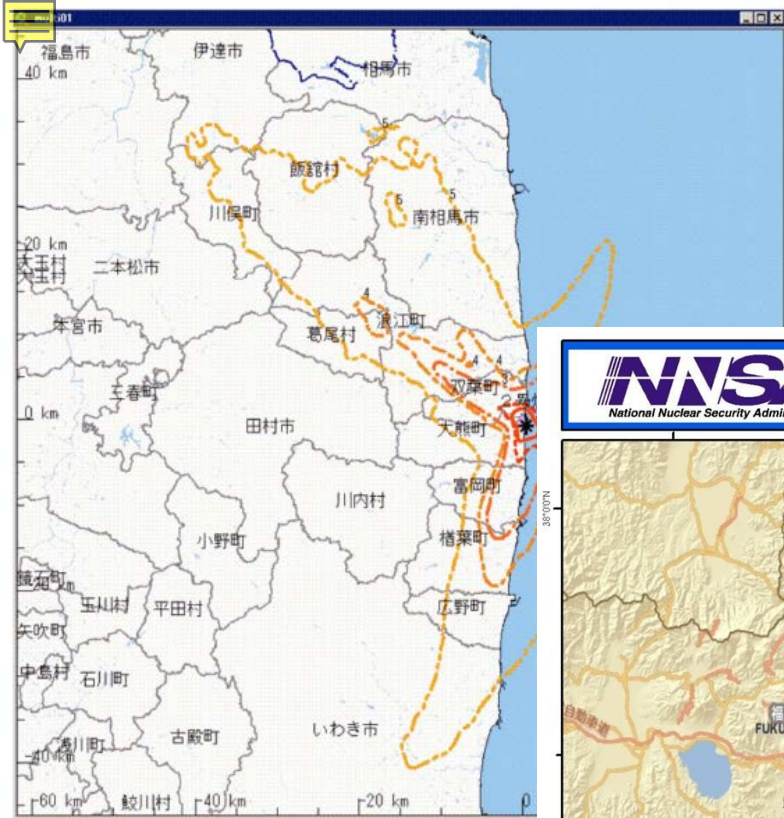
2011年3月11日, 東北地方太平洋沖地震が発生し福島原発の原子炉冷却機能が失われた結果, 放射性物質の環境への拡散という深刻な事態が発生しました. その後, 放射性物質の大気中への拡散について, 国内でもっとも研究開発が進んでいる数値モデルSPEEDIIによる計算結果が公開され, 拡散予測とともに過去の放出時の検討も行われるようになりました. しかし**大気中の物質拡散を予測すること**にどのような困難がありどのような不確実性があるのか, **数値計算結果はどれくらい信用できるのか**という点については, **必ずしも広く理解されているとはいえない状況にある**と思われます. そこでここでは, 気象力学など地球流体力学を専門としている研究者が, このような大気拡散予測の現状を説明することを試みます. この文書は, 震災発生当時, 有志にて大学初年次レベル程度の解説を作ろうと企画したのですが, 遅筆な編集担当のせいで震災からすでに半年が過ぎてしまいました. 時期を逸した感は否めませんが, 個別的な情報は古くなってしまっているかもしれませんが, 一般的な考え方は変わらないと思いますので, QandA形式でまとめた文章を, いまさらではありますが, 掲載したいと思います. このような文章がさらに必要となるような事態が再発することのないことを祈りつつ(2011/09/11)。

はじめに

「SPEEDI(スピーディ)が公開されていれば、北西方向に避難することもなかったのに…」

という報道あるいは意見がある(あった?)ようだが

本当かな？

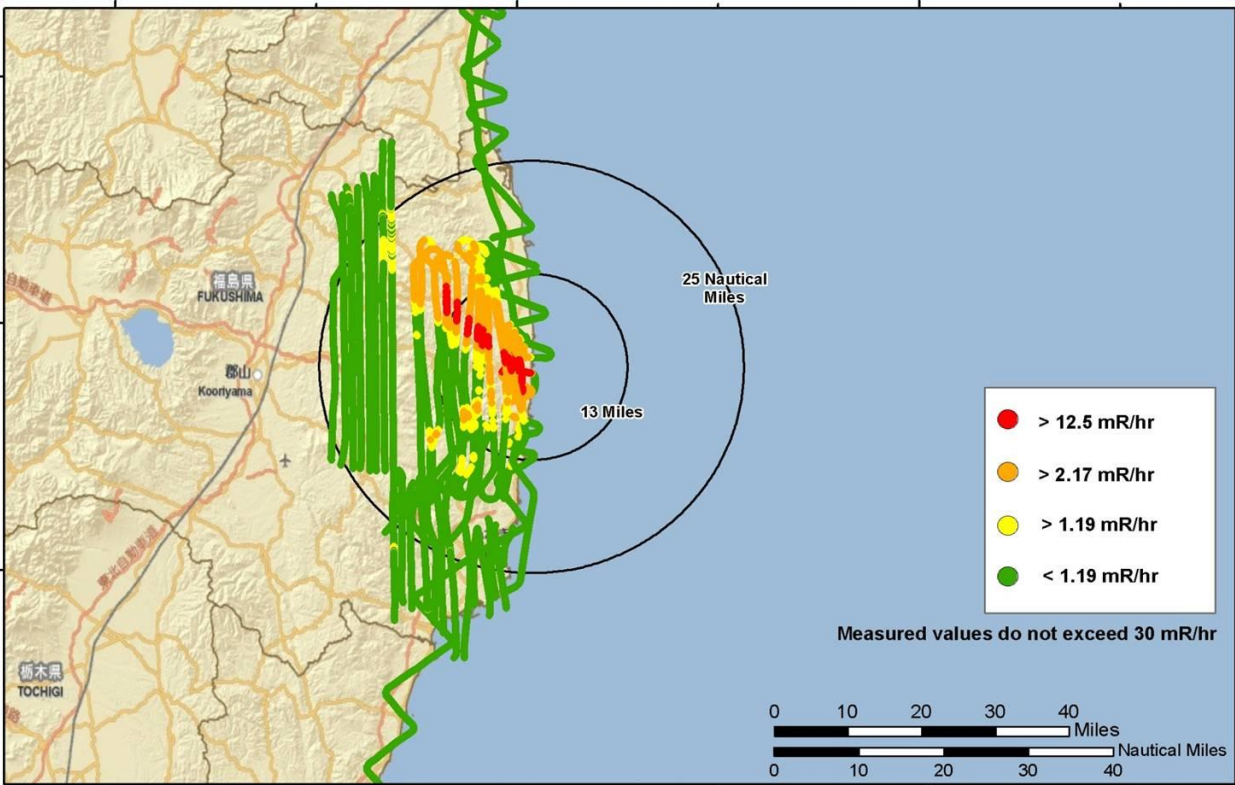


内部被ばく臓器等価線量
 日時 = 2011/03/12 06:00 -
 2011/03/24 00:00 の積算値

領域 : 92km X 92km
 核種名 = ヨウ素合計
 対象年齢 = 1歳児
 臓器名 = 甲状腺

【凡例】
 線量等値線 (mSv)
 1= 10000
 2= 5000
 3= 1000
 4= 500

NNSA National Nuclear Security Administration
Aerial Monitoring Results - C-12 FUKUSHIMA DAIICHI
 Survey Date - 17, 18, 19 March 2011 JAPAN



Map created on 03232011 0210 JST

Name: NIT_C-12 23Mar2011 v4

Nuclear Incident Team DOE NIT



SPEEDI
 (原子力安全委員会 20)

$$mSv = mR / 107.185$$

はじめに

■ なぜ予測はリアルタイムで公開されなかったか？

(本当のところは知らないが)一番うがった見方:

とんでもなく重大事故(あらかじめ設定した避難領域では全然狭すぎるのが計算では(計算しないでも?)明らか)であることを隠ぺいしたかった(あるいは結果をみて当局がパニックになった=東京も逃げないといけない)?

はじめに

- 3.11 に際し、物理学(特に宇宙物理学・原子核物理学)コミュニティーを中心に
 - 電源停止とともに、炉心溶融の心配をしていた
 - 気象コミュニティーに対して拡散予報実験をするような要請がネット上で飛び交った
 - 何人かの気象研究者は計算を行っていたが、公にはならなかった
- 気象学会理事長声明2011.03.18
 - 情報提供の際には、研究者に「適切な対応」を要請した
 - ◆ 一元化原則(文科省が原子力防災対策情報提供の司令塔)
 - ◆ 特に放射性物質の予測にはSPEEDIがあることを思い出せ(陽には書いてない)
 - 気象研究者コミュニティーは「自粛」した
 - 研究の自由を束縛するのか、あるいは、気象学研究者はなぜ黙っているのか、特に気象研究コミュニティー外から非難
- 気象庁
 - ちっとも情報出してくれない(国民は天気予報の素直な延長上で情報提供を期待)
 - でも、原子力災害情報提供の国としての職掌は気象庁じゃなくて文科省(計算予測はそのSPEEDI)
- 私(林)の2011.03当時(現在も)の意見
 - 災害情報提供の一元化原則に従う(学会理事長にまったく同意、学問の自由とは関係ない)
 - 観測を伴わない流体数値予測を公開し、緊急避難の指針にすることには絶対反対
(不確実な情報を公開することの危険性)
不確実性の少ない情報なのにわざわざ隠ぺいすることとは意味が違う
 - 要は遠くに避難する、雨や雪には絶対あたらない、塵を吸わない、..., しかない
 - SPEEDIは本当に業務レベルにあるのか私には疑問だったので、特に緊急時には使えない
(学会がSPEEDIの現業運用レベルでの完成品であるかのような墨付きを与えるような声明を出すことにも反対した)
 - 物理の少なくない人々は流体予測の不確実性に関してあまりにナイーブなのではないか
- 気象コミュニティー
 - 今や利権集団「気象村」呼ばわり?
- 今こそデータを集めてSPEEDIどんどん動かすべきでしょ
 - 原発推進したい人々が反対?
 - いわゆる通常の大気汚染観測のために自治体が採取していたサンプルも提供が滞ってるとか?

目次

0. 此処は何処で私は誰
1. はじめに
2. 大気中の物質拡散にまつわる流体力学
煙を例にして
3. 大気中の物質拡散を計算するための
基礎知識
4. SPEEDIについて
5. 観測と予測：気象の場合と放射線の場合
6. おわりに

新燃岳の噴煙プルーム 2011年2月4日 MODIS/Terra

http://feww.files.wordpress.com/2011/02/kirishima_tmo_2011035.jpg



「ひまわり」による高頻度雲衛星観測

霧島山(新燃岳)の噴煙 2011年2月3日

霧島山(新燃岳)の噴火について、高頻度雲衛星観測で観測した画像です。

火山灰は、降灰によって国民生活に影響があるばかりでなく、空中に拡散すると、航空機の運航に影響します。火山灰が航空機のエンジンに入ると、エンジンが停止する恐れがあることから、火山灰の広がり具合を速やかに把握することが重要です。

このため、気象庁は気象衛星ひまわりの画像を用いて火山灰の動向を監視し、火山灰の拡散状況や予測情報を航空会社や航空局など国内外の航空関係者へ提供し、航空機の安全な運航を支援しています。

【高頻度雲衛星観測とは】

通常気象衛星による30分毎の観測と異なり、日本付近の小さな領域を短い間隔(5~10分)で観測した画像です。

よりきめ細かい現象の把握が可能となります。

http://www.jma-net.go.jp/sat/20110203_sinmoe_eisei/VolAsh20110203_10min.html

流体による粒子の輸送

流体運動による 移流拡散現象

例：煙＝小さな粒子
(μ サイズ)

■ 移流

ながされることをいう
流体力学の用語

■ 拡散(混合)

分子のランダムな熱運動
におされ粒子分布が広が
っていくこと



乙部・酒井(2011)

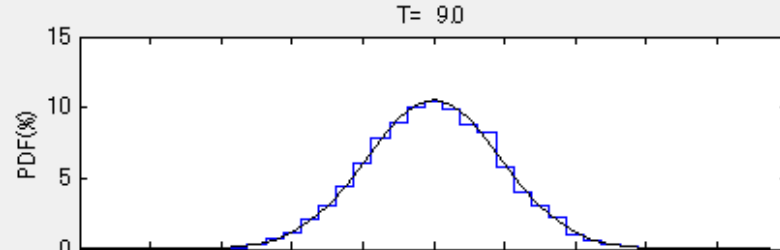
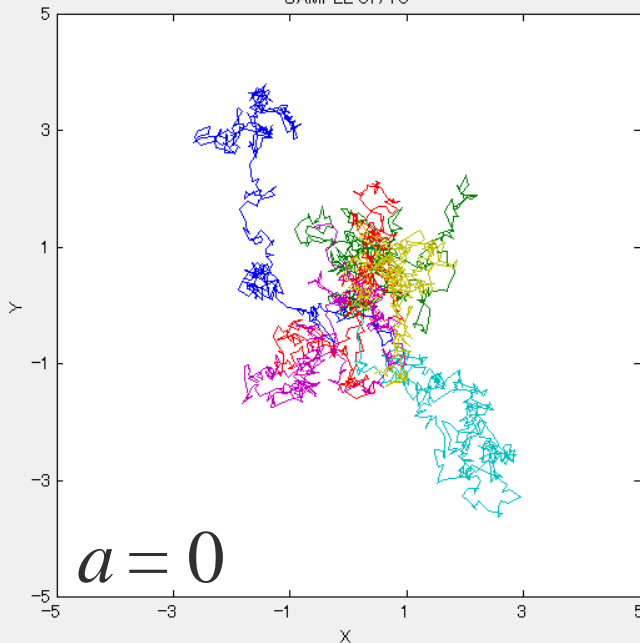
移流拡散: 確率的外力による粒子の運動 (酔歩)

小さな粒子の運動 = ブラウン運動

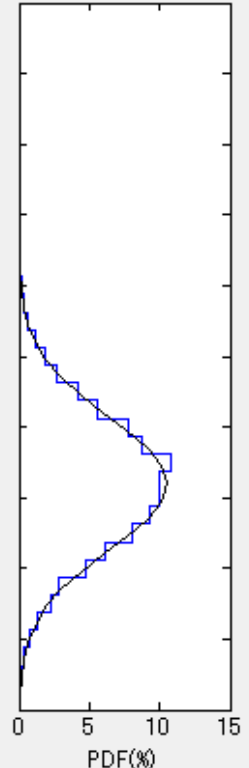
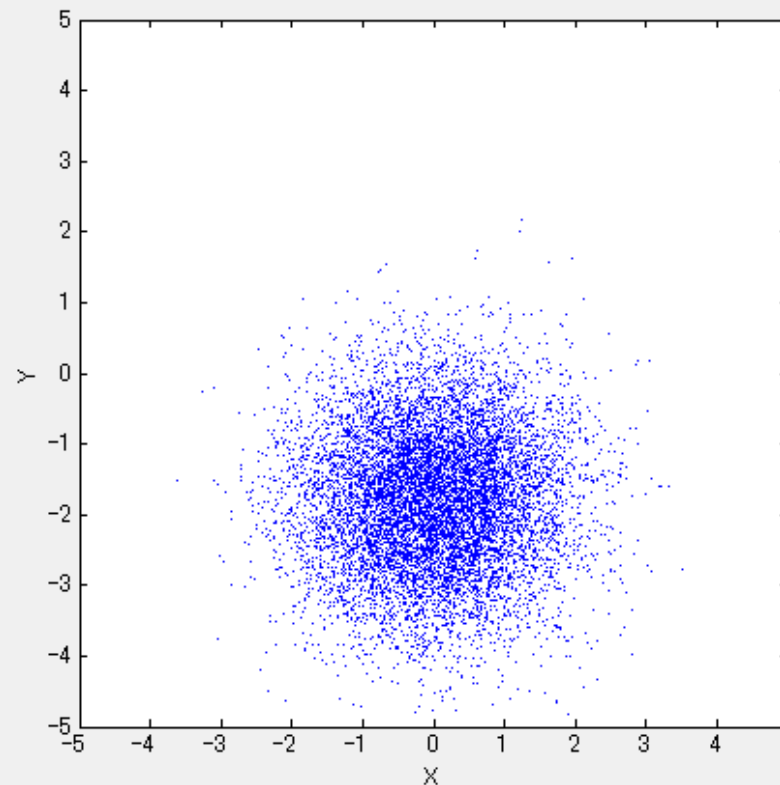
Langevin方程式

$$m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = \mathbf{a} - \beta \frac{d\mathbf{x}}{dt} + \xi(t)$$

SAMPLE 01 / 10



$t = 9$



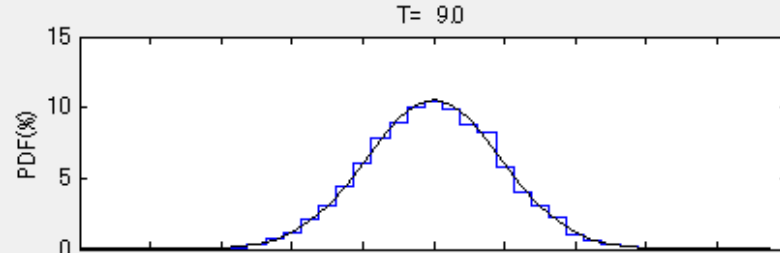
移流拡散:粗視化

■ 粗視化

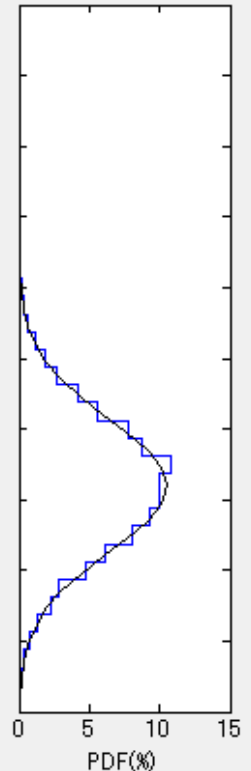
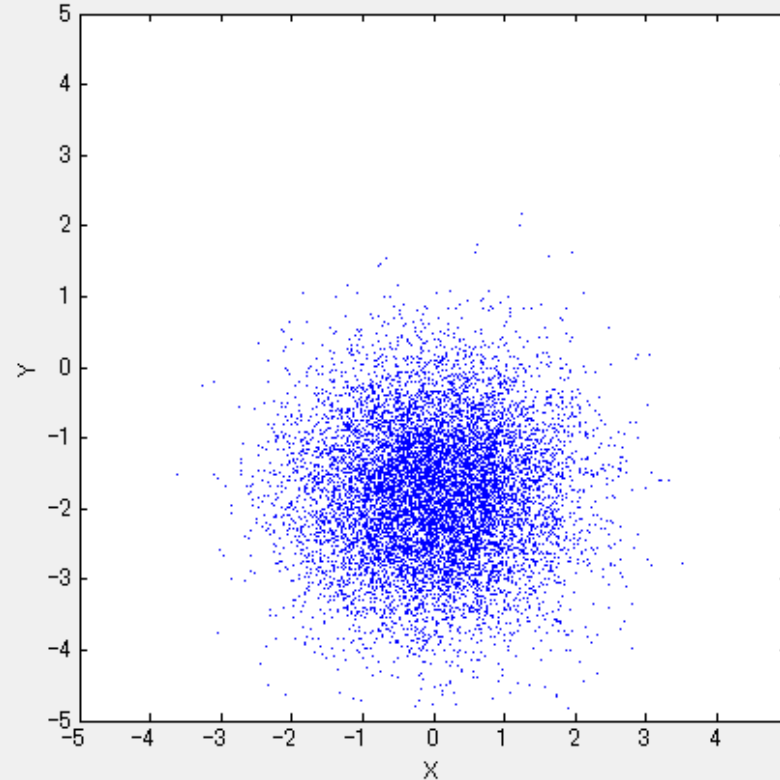
個々の粒子のランダムな運動を
一々追跡しない
粒子の存在度分布
として扱う

■ 濃度 q

単位体積あたりの
個数(数密度)、
あるいは、
質量(密度)など
分布をとらえる
量



$t = 9$



拡散

(1次元) 拡散方程式
$$\frac{\partial q}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 q}{\partial x^2}$$

分子レベルの情報は平滑化して、濃度 q で考える
分子運動の蓋然性に基づく関係式(フィックの法則)

- 物質が単位時間あたりに拡散していく量

[フラックス] \propto [物質の濃度勾配]

比例定数を(分子)拡散係数という

κ [m²/s]

$$F = -\kappa \frac{\partial q}{\partial x}$$

- 濃度時間変化 \propto フラックスの収束

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial x}$$

拡散

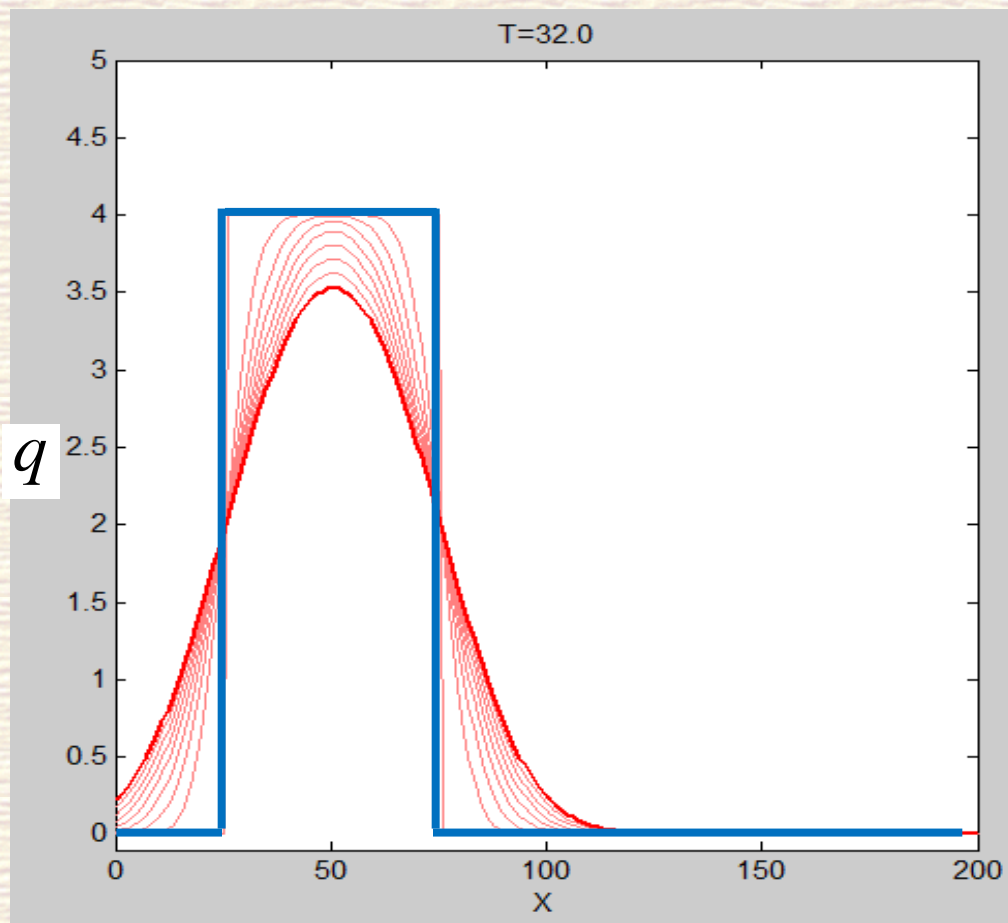
$$\frac{\partial q}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 q}{\partial x^2}$$

- 初期値

$$q(x, 0) = \varphi(x)$$

- 解

$$q(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\kappa t}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \exp\left[-\frac{(x-\xi)^2}{4\kappa t}\right] d\xi \quad (t > 0)$$



移流

(1次元)移流方程式

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} = 0$$

- 物質分布 q が速度 u で流される式
- 特に u が定数 c の場合

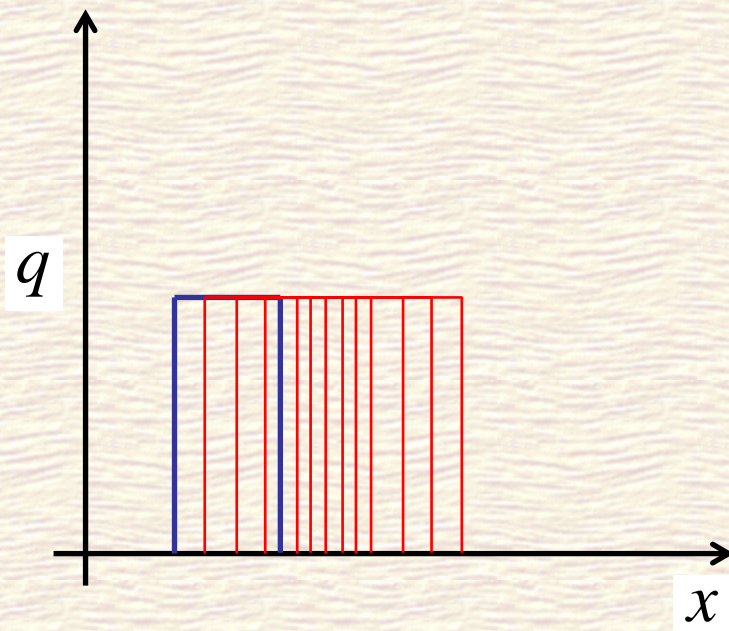
$$\frac{\partial q}{\partial t} + c \frac{\partial q}{\partial x} = 0$$

- 初期値

$$q(x, 0) = f(x)$$

- 解

$$q = f(x - ct)$$



移流拡散

(1次元)移流拡散方程式

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} = \kappa \frac{\partial^2 q}{\partial x^2}$$

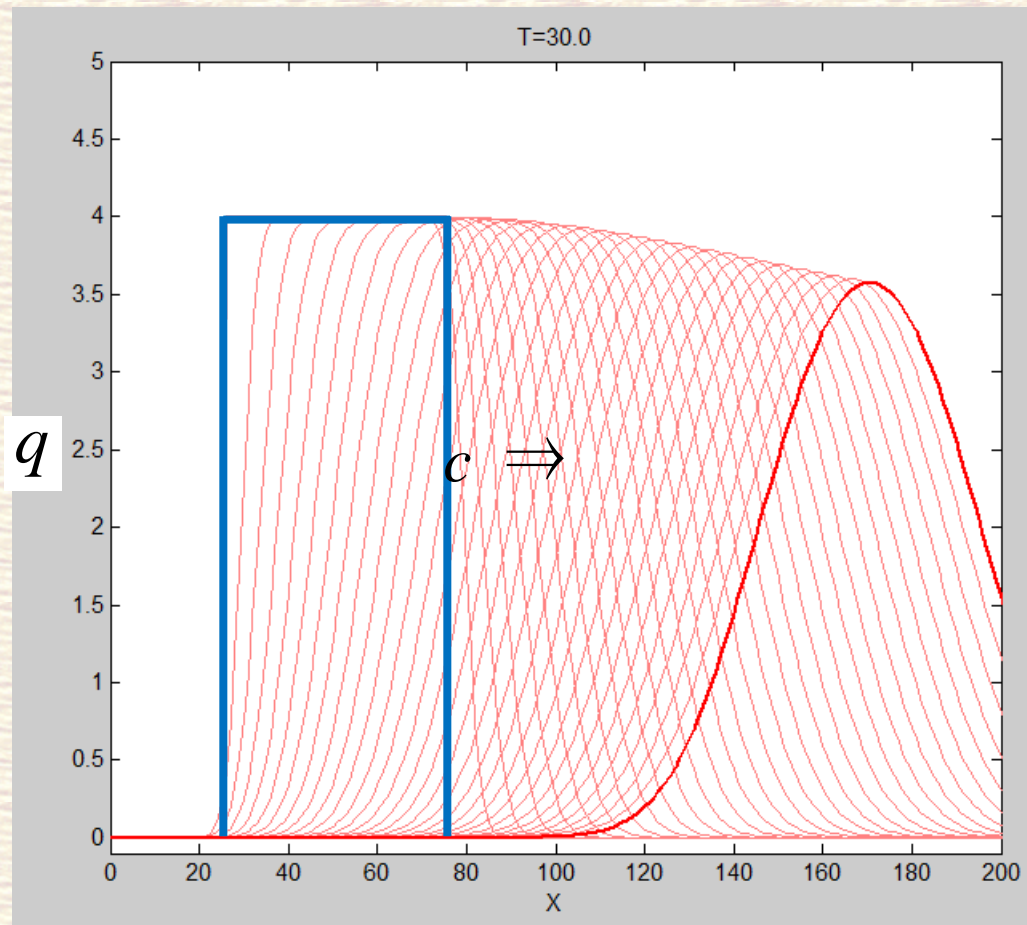
- 定常移流

$$u = c. \quad (\text{一定})$$

- 拡散

- 初期値

$$q(x, 0) = \varphi(x)$$



$$q(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\kappa t}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \exp\left[-\frac{(x - ct - \xi)^2}{4\kappa t}\right] d\xi \quad (t > 0)$$

しかし、分子拡散は登場しない

流体中の拡散の特質: 分子拡散vs乱流拡散

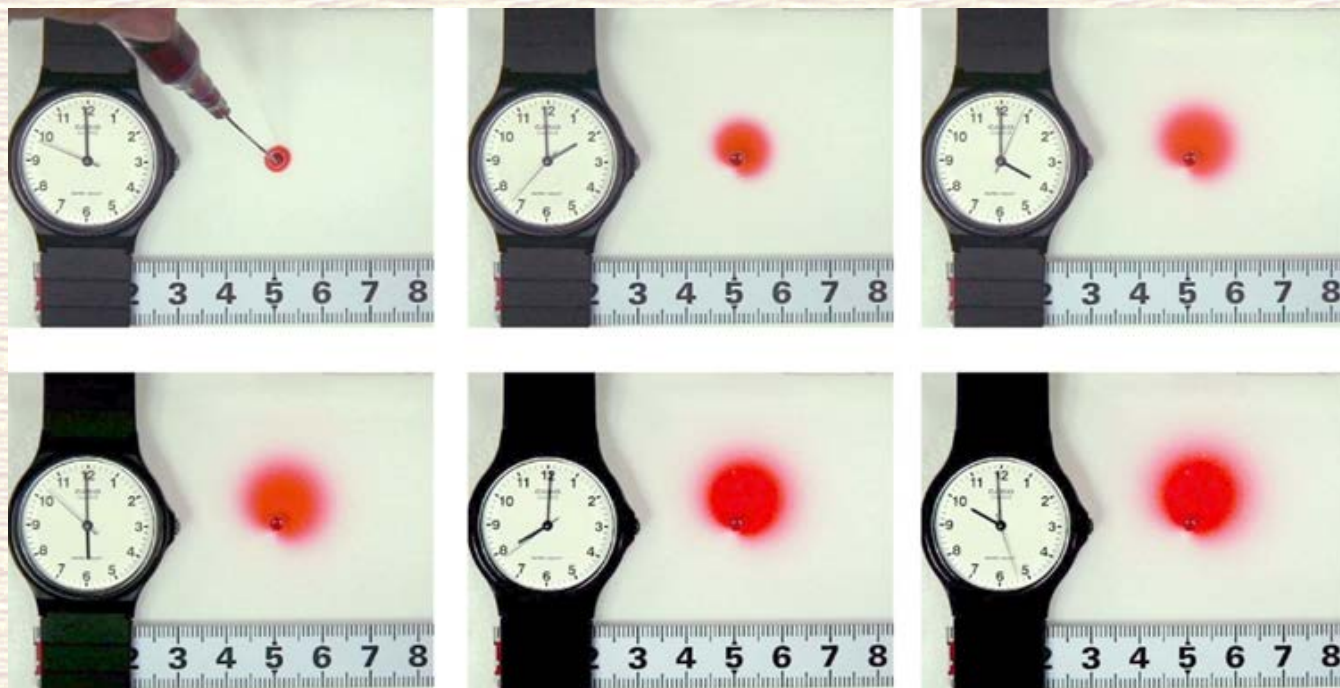
■ 分子拡散

流体を構成する分子のランダムな熱運動による拡散

しかし、分子拡散の速度は流れの速度に比べて遅い
あるいは、着目する時間(流れの変化)に対して関与
するスケールがとても小さい(一声mm単位)

なので、気象現象(ちよとスケールの大きな流体
現象)では分子拡散を直接扱うことはできない/
しない

分子拡散



分子拡散の例：インクの拡散（乙部・酒井, 2011）

- 2枚の板で0.5 mmの隙間を作って、その間をグリセリン水溶液で満たし、そこにインクを注入した。初期の半径数mmのインクが、半日で半径約1 cmに広がる。物質の種類によって拡散の速さは異なるが、液体の場合は、だいたい、この程度の「桁」のスピードになる。
- 水の場合だいたい $\kappa=10^{-9}\text{m}^2/\text{s}$

流れによる輸送・乱れた流

流れの速度 u は単純
ではない

- 層流: なめらかな流れ
- 乱流: 渦々した流れ

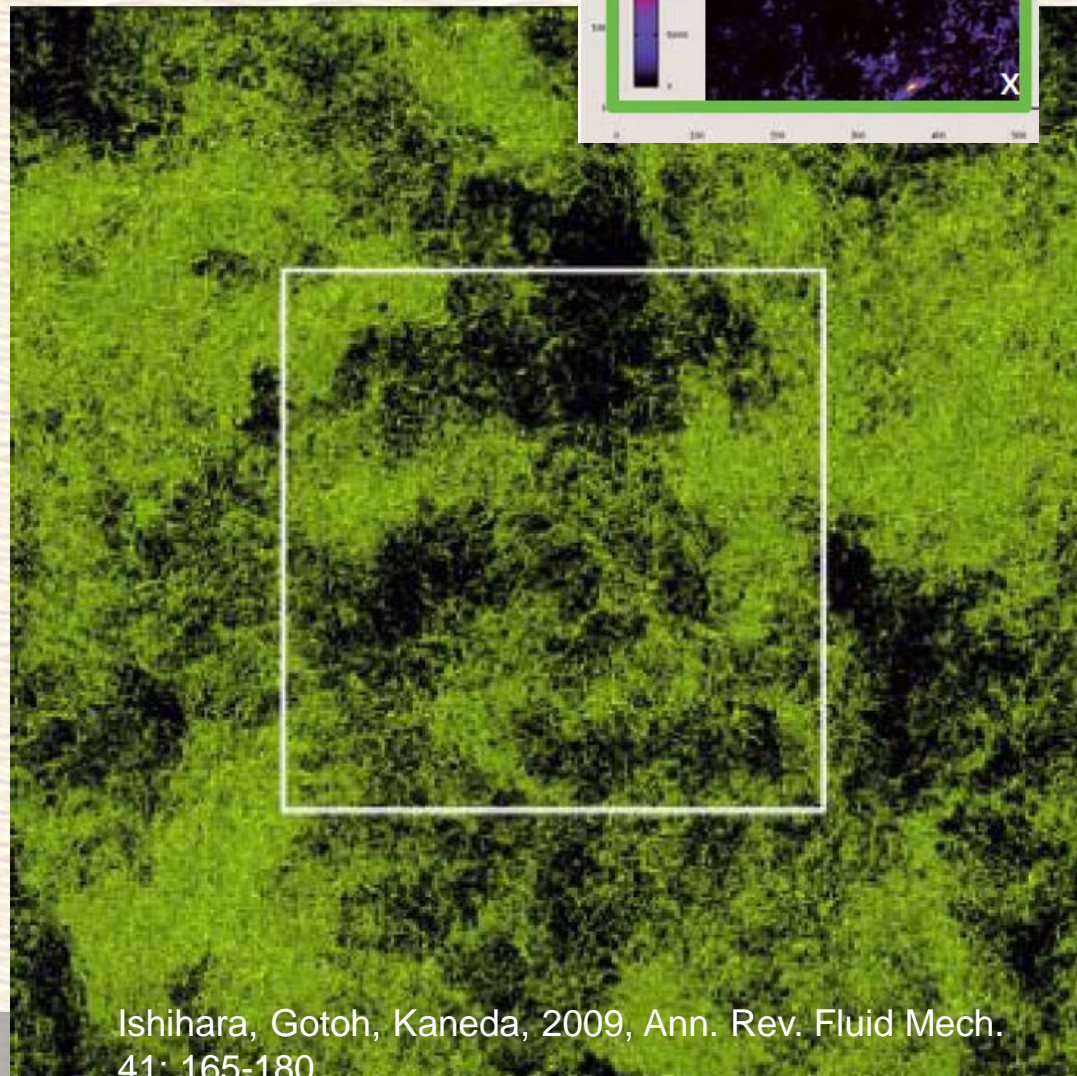
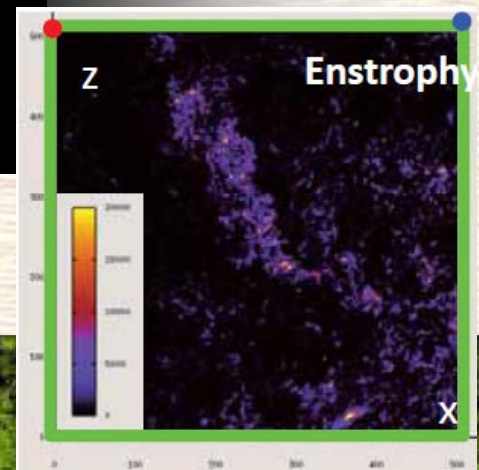


乱流の数値計算(間歇性)

乱流中の秩序構造

■ 金田ほか (2003、...、2011)

- 世界最大規模三次元
等方性乱流数値計算
(DNS)
4096x4096x4096
- 高レイノルズ数:
 $R\lambda=1131$
- シャープな境界をもつ
薄い剪断層(=強い
管状渦の集合体)が
存在
- その出現場所・時刻が
ランダム



流れを粗視化する

例：煙

- **これくらい**の領域なら流体運動を全部観測できるような気がするかもしれない
- 水平100km鉛直1kmぐらいの領域を1mm単位で覆うとすると $10^8 \times 10^8 \times 10^6 = 10^{22}$ 個のデータ
→扱えない

細かい流れ(渦)による移流を統計的に見ることにする



流体を粗視化する

線香の煙のスナップショット(30秒間隔)
と時間(アンサンブル)平均



流体を粗視化する

流体中の拡散の特質: **分子拡散** vs **乱流拡散**

■ **乱流拡散 (渦拡散)**

小さなスケールの乱れた流れ (渦あるいは乱流) による移流の統計的な効果による広がり

→ 小さなスケールの流れによる移流の効果は統計的にはある種の拡散とみなせる

流体力学の基本問題(その1)

流体力学の基本的大問題

小さなスケールの流れによる移流の効果は統計的にはある種の拡散とみなせるのだが

小さなスケールの効果を大きなスケールの量でどう表わしたらいいのか、実はわかってない

- 大きなスケールの流れに小さなスケールの動きはどういう影響をもたらすのか？
- どのような拡散として扱ったらよいのか？

個々の流れの場に関するより具体的なイメージ(理解=経験と感の体系化)が必要

流体を粗視化：上級編

■ 乱流(渦)拡散

- 分子拡散のアナロジー
- 乱流(渦)拡散：乱流運動の蓋然性 → 乱流は本当にランダムか??

■ レイノルズ方程式

- 平均値と偏差： $u = \langle u \rangle + u'$,

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \langle u \rangle \cdot \text{grad} \right) \langle u \rangle + \langle (u' \cdot \text{grad})u' \rangle = -\frac{1}{\rho_0} \text{grad} \langle p \rangle + \nu \Delta \langle u \rangle + K,$$

- レイノルズ応力： \mathbb{T}

$$\langle (u' \cdot \text{grad})u' \rangle = -\frac{1}{\rho_0} \text{grad} \cdot \mathbb{T},$$
$$\mathbb{T} = \begin{pmatrix} -\rho_0 \langle u'^2 \rangle & -\rho_0 \langle u'v' \rangle & -\rho_0 \langle u'w' \rangle \\ -\rho_0 \langle u'v' \rangle & -\rho_0 \langle v'^2 \rangle & -\rho_0 \langle v'w' \rangle \\ -\rho_0 \langle u'w' \rangle & -\rho_0 \langle v'w' \rangle & -\rho_0 \langle w'^2 \rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \tau_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \tau_{zz} \end{pmatrix},$$

- closure簡便法：

混合距離理論 →

$$\frac{1}{\rho_0} \text{grad} \cdot \mathbb{T} = \left\{ A_H \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + A_V \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\} \langle u \rangle.$$

流体力学の基本問題(その2)

カオス

ある時刻のちょっとした違いが時間と共に急速に大きくなって後の時刻の様子が全く変わってしまう, というとても不安定な性質

流体カオスの二重性

- **流れ(速度)自体**がカオス的振る舞いをする
 - ◆ 例: 天気予報の気圧予測
- 同じ流れでも、その流れに乗って**流される粒子(煙)**の動き(**位置**)はカオス的振る舞いをする
 - ◆ 例: 天気予報の水蒸気・雨の予測、物質移流予測

小さなスケールの流れの効果を考慮することの必要と困難の所以

目次

0. 此処は何処で私は誰
1. はじめに
2. 大気中の物質拡散にまつわる流体力学
煙を例にして
3. 大気中の物質拡散を計算するための
基礎知識
4. SPEEDIについて
5. 観測と予測：気象の場合と放射線の場合
6. おわりに

気象(流体)数値計算のキモ

対象を、有限の計算機資源(メモリの大きさと計算速度)に収まるようにうまく粗視化する

通常、着目する流体現象に特徴的に存在する渦運動(特に、カオスの原因となる流れの不安定性)を直接表現できれば、とりあえず良い

- 高気圧低気圧の予測ならその波動的構造(傾圧不安定波動1000kmスケール)
- 竜巻なら竜巻の元となる上昇気流から竜巻の渦の構造まで(mスケール)

気象(流体)数値計算のキモ

要すれば、答え(対象の運動構造)をあらかじめ知っていないと計算を設計できない

かならず**答え合わせ(=観測)**が必要

- そもそも表現されるべき対象(流体の挙動)を知っているか？
- 粗視化は対象の表現にふさわしいか？
 - ◆ 小さなスケールの流れの影響を取り込むモデルはうまく作れたか
- カオス的振る舞いに対するに、初期値・境界値データは十分か？カオス的振る舞いによる予測限界は？

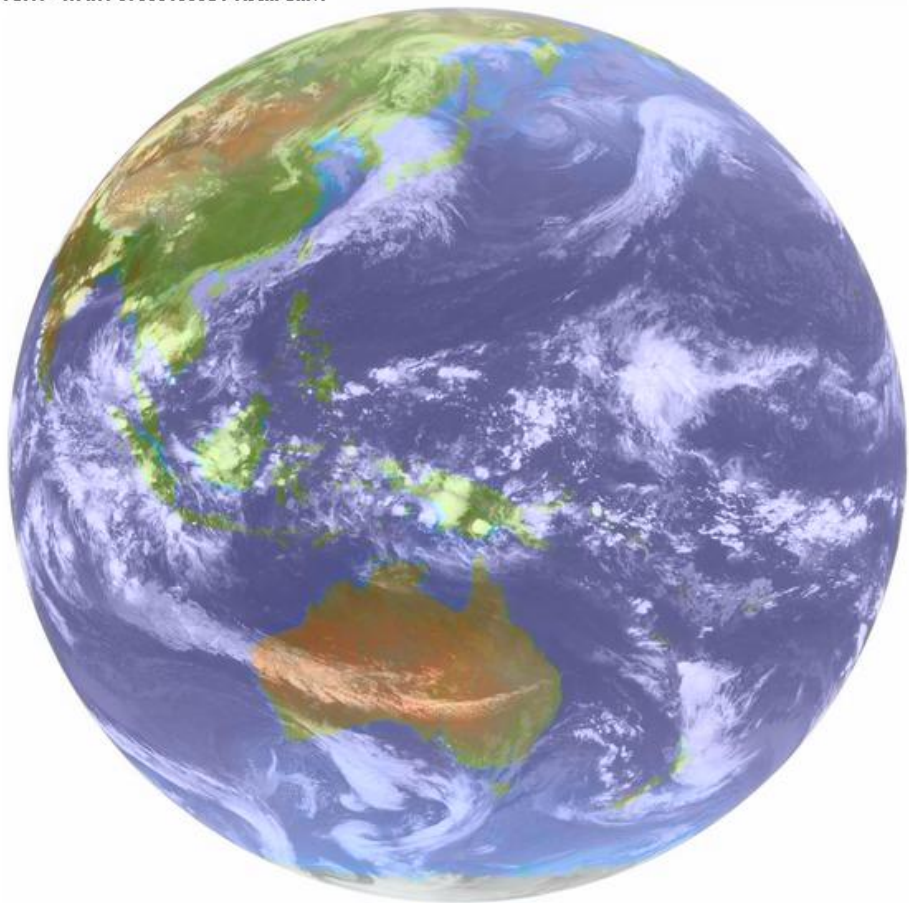
煙の場合

- 決定論的に語れる部分とカオス的で統計的にしか語れない部分
- 計算資源やデータ(観測)による



地球全球の大気の流れ

MTSAT-1R IR1 07050100JST Kochi Univ.



赤外線を衛星から観測

暖かいところ＝放射が強い＝青く表示
冷たいところ＝放射が弱い＝白く表示

下敷きに陸を重ねてある

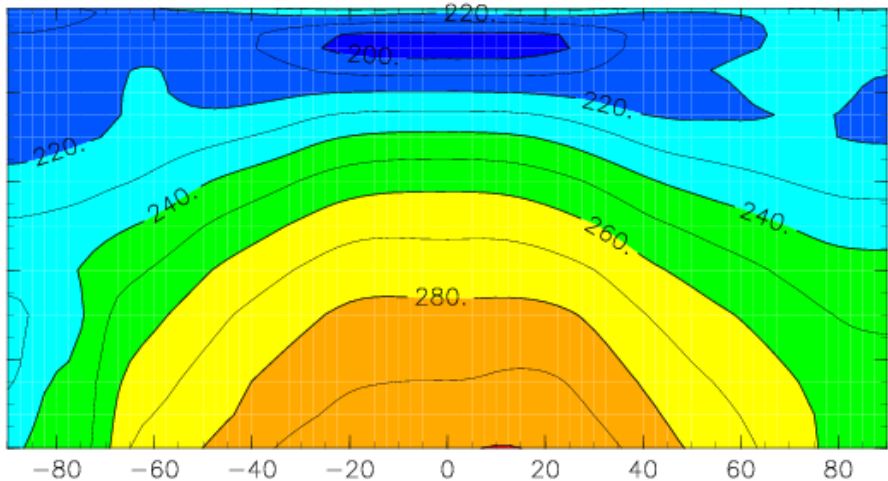
<http://weather.is.kochi-u.ac.jp/>

地球大気の東西平均子午面構造

T_2000-04_NCEP

4月温度

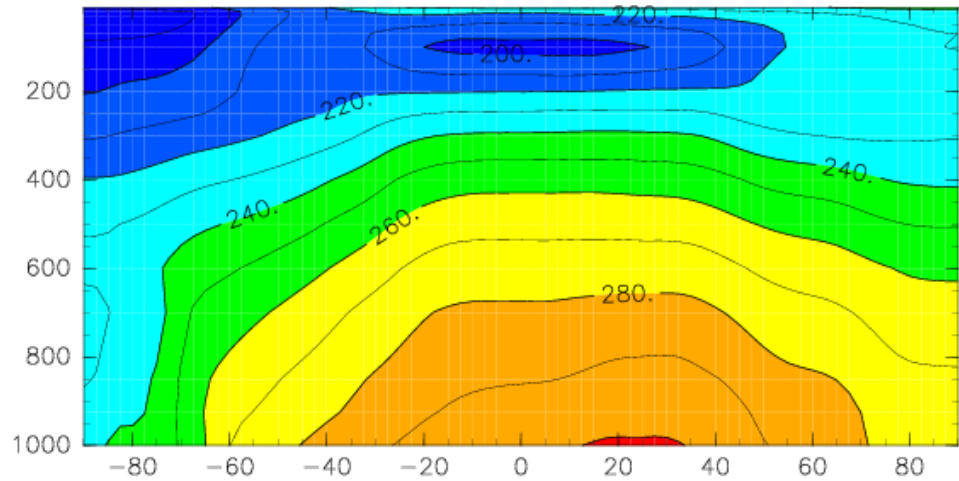
(libar)



T_2000-07_NCEP

7月温度

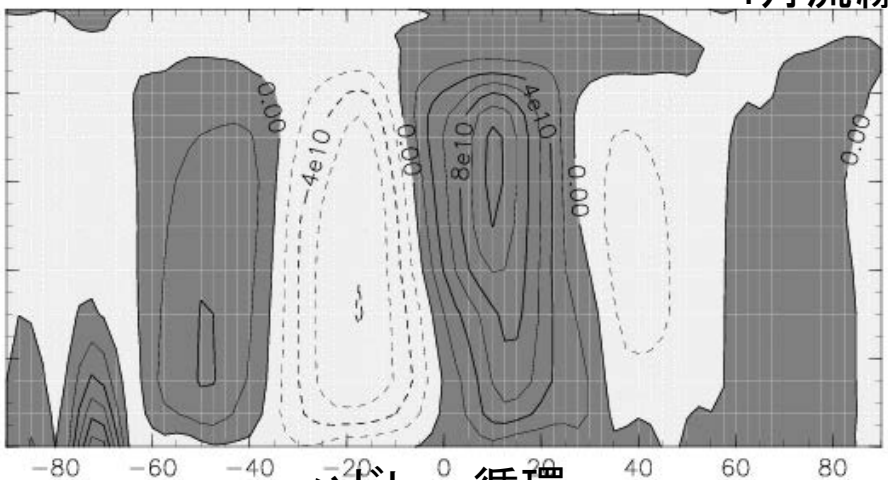
(libar)



STRM_2000-04_NCEP

4月流線

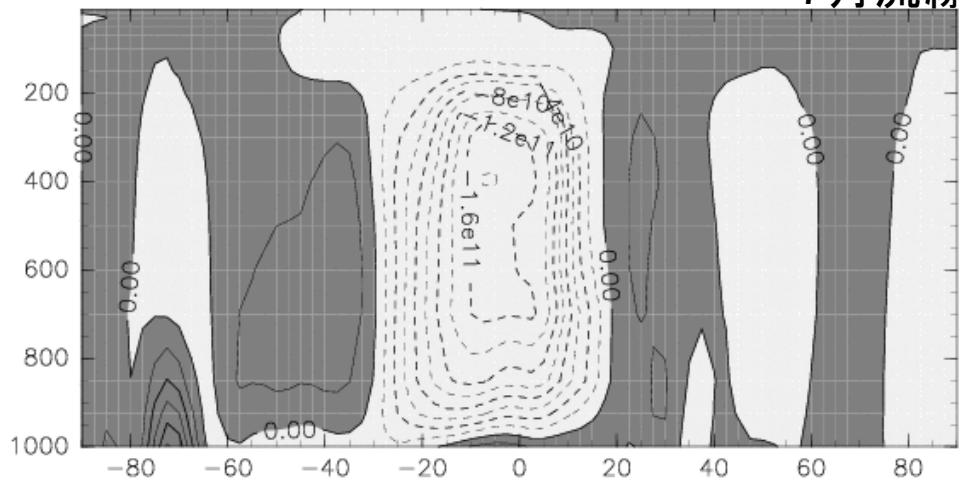
(libar)



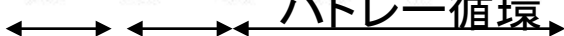
STRM_2000-07_NCEP

7月流線

(libar)



ハドレー循環



フェレル循環

Latitude

NCEP 再解析データ

CONTOUR INTERVAL = 2.000E+10

Latitude

<http://www.gfd-dennou.org/arch/dcchart/>

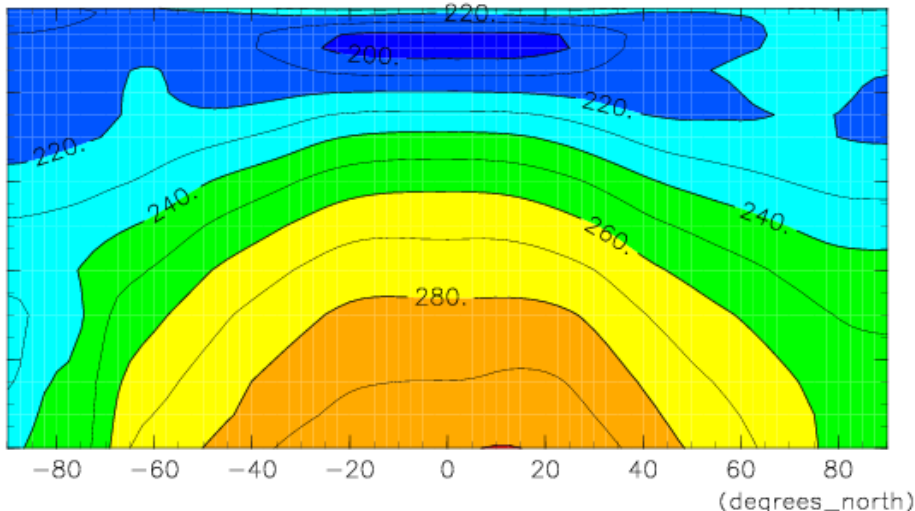
CONTOUR INTERVAL = 2.000E+10

地球大気の東西平均子午面構造

T_2000-04_NCEP

4月温度

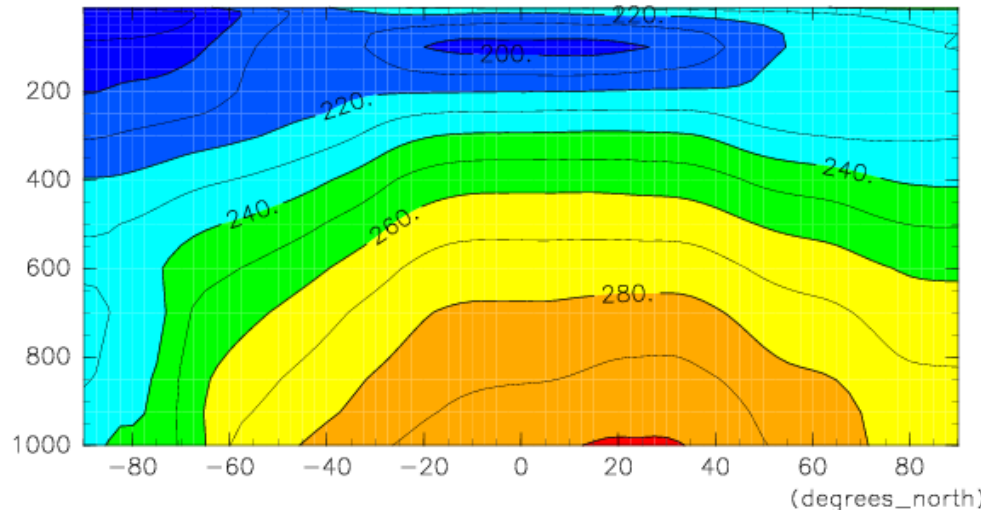
libar)



T_2000-07_NCEP

7月温度

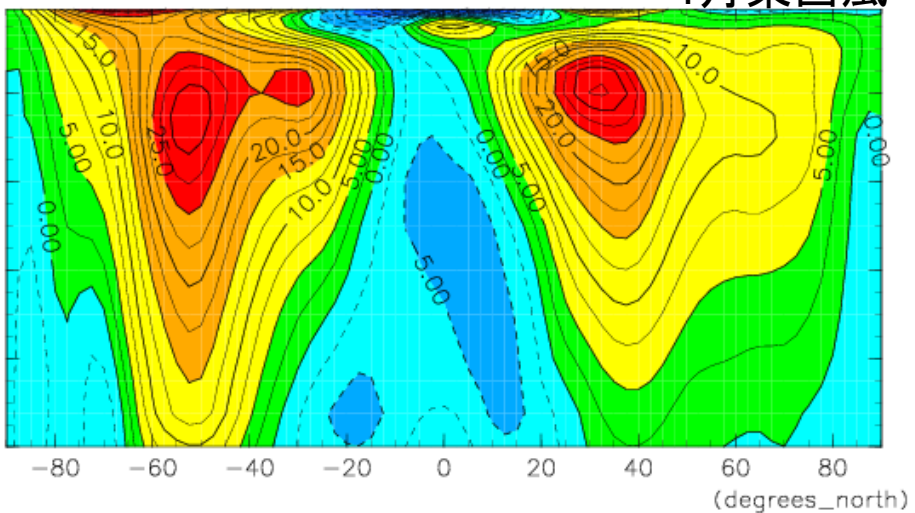
libar)



UWND_2000-04_NCEP

4月東西風

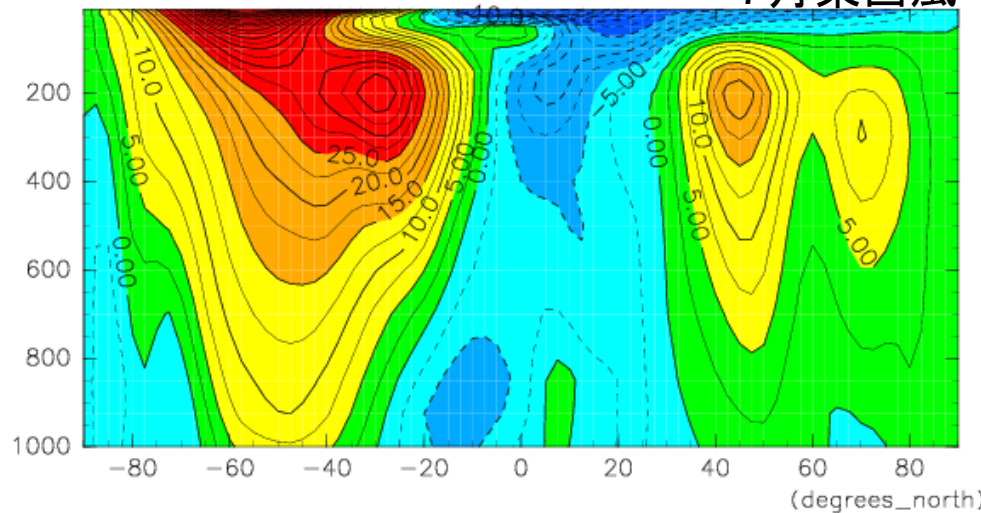
libar)



UWND_2000-07_NCEP

7月東西風

libar)



Latitude

NCEP 再解析データ

<http://www.gfd-dennou.org/arch/dcchart/>

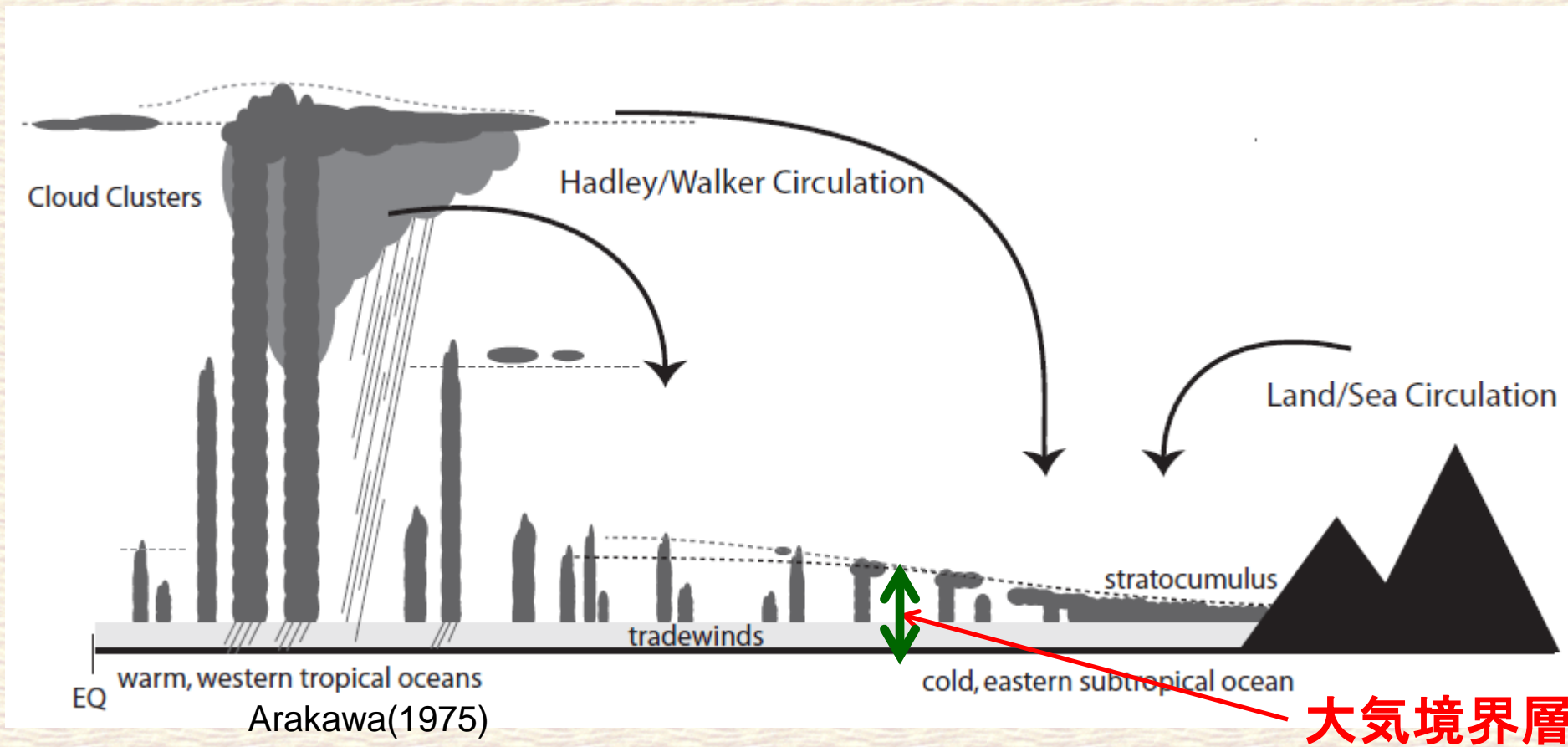
Latitude

CONTOUR INTERVAL = 2.500E+00

CONTOUR INTERVAL = 2.500E+00

地球全球の大気の流れ

大気の平均的な鉛直温度構造は熱帯の積雲が作っている



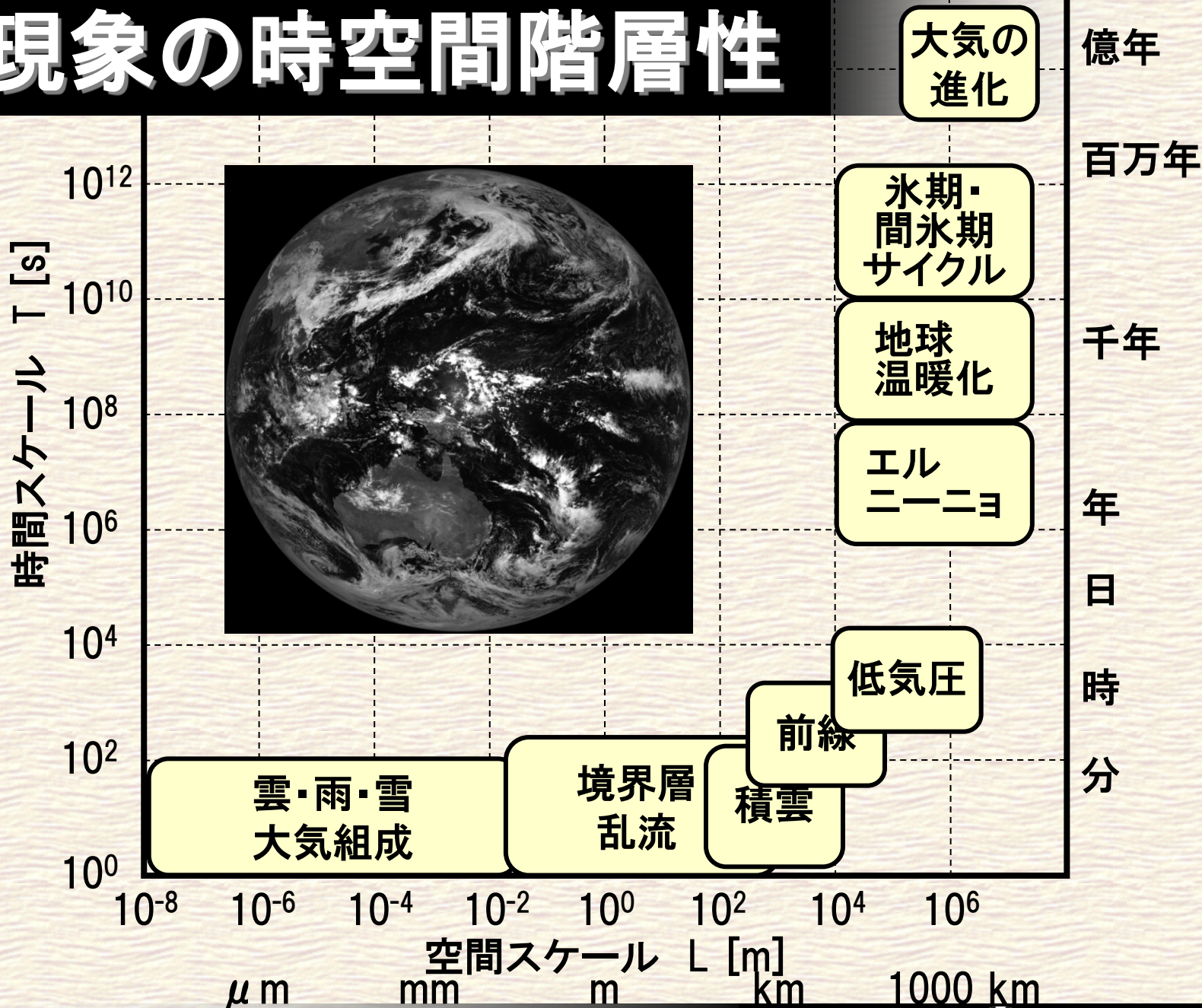
Arakawa(1975)

<http://www.atmos.ucla.edu/~bstevens/Figures/arakawa.pdf>

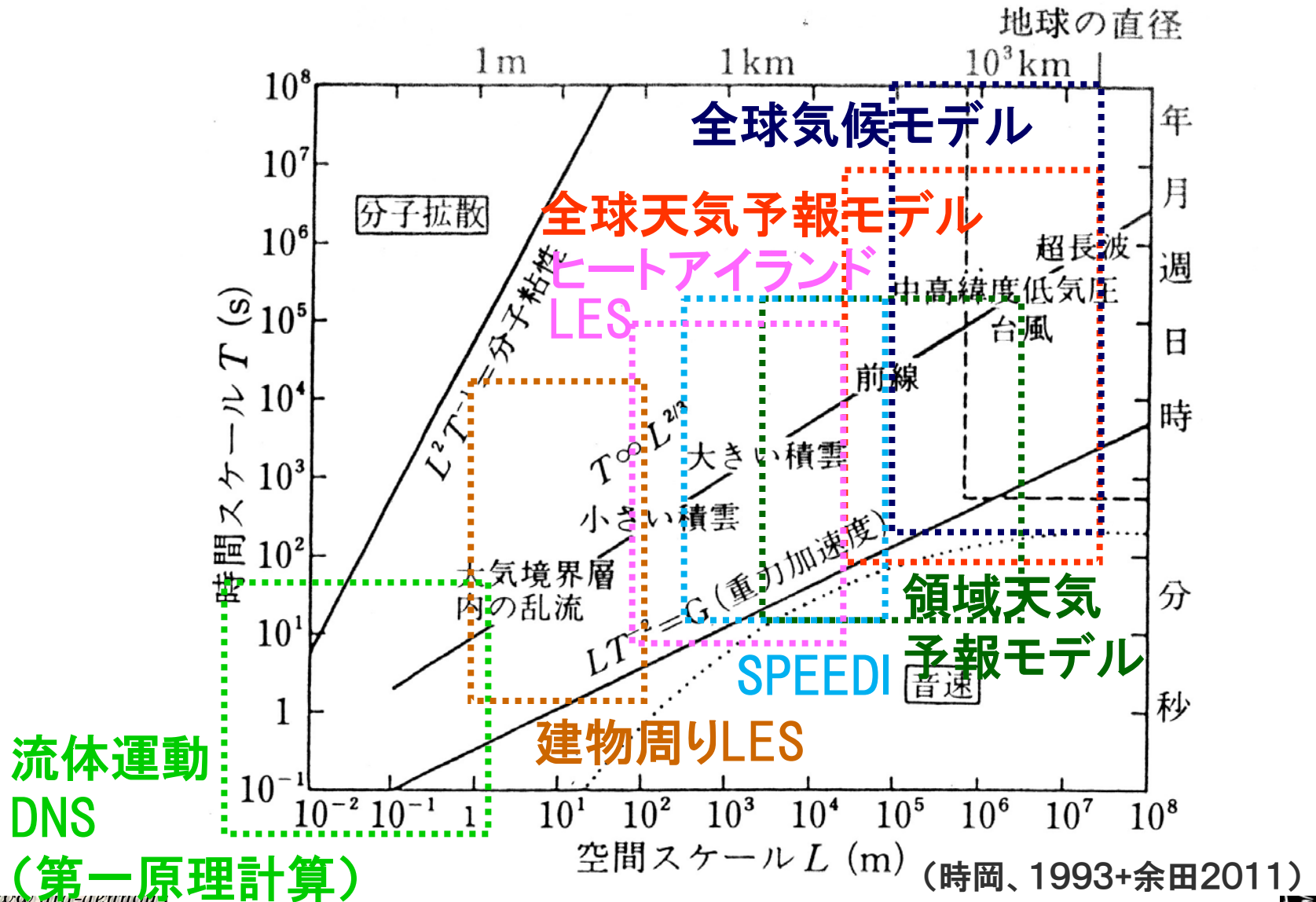
by Bjorn Stevens

大気境界層

大気現象の時空間階層性



数値計算で扱える気象世界概観

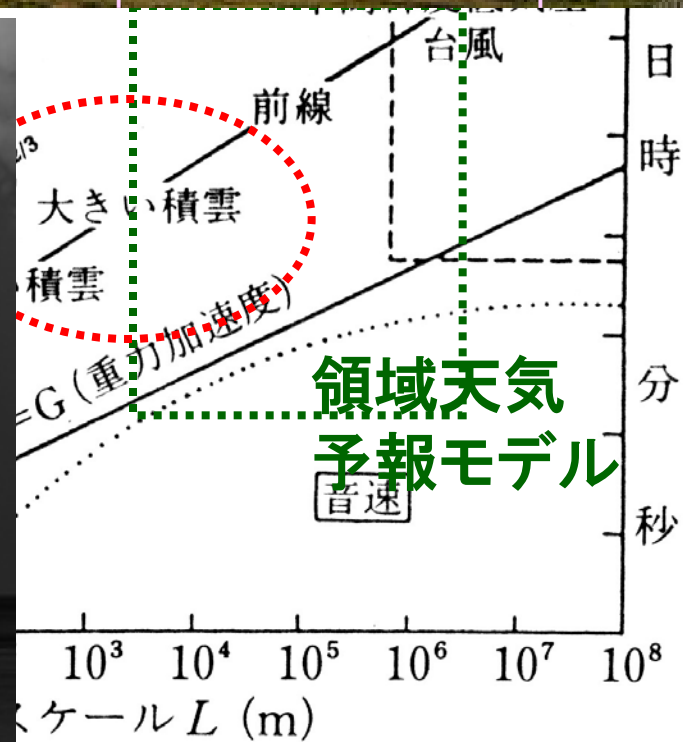


例: メソスケール(前線)

寒冷前線 (cool change in Australia)

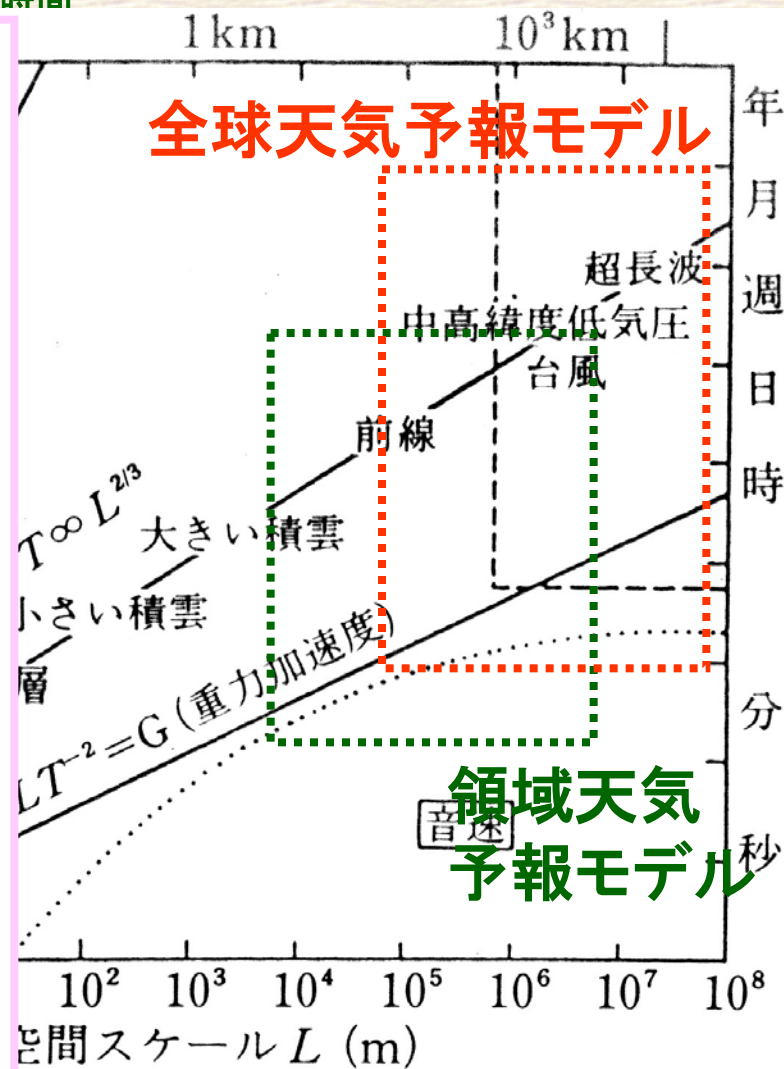
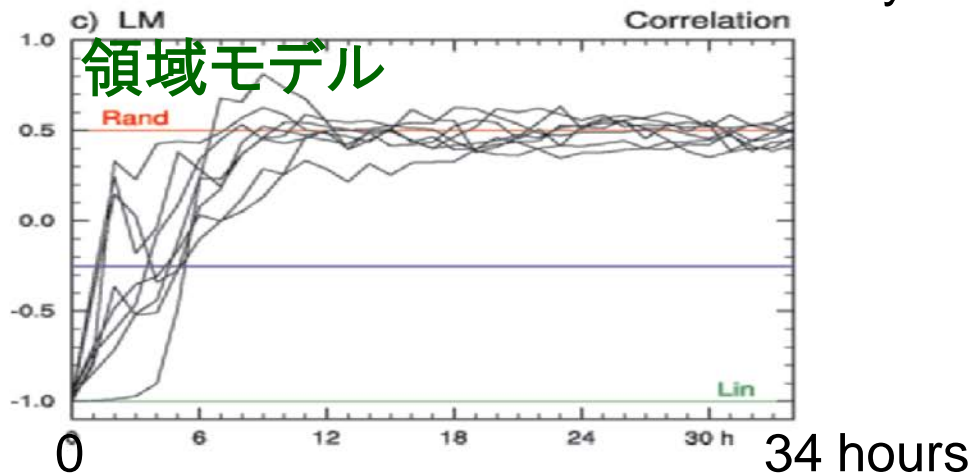
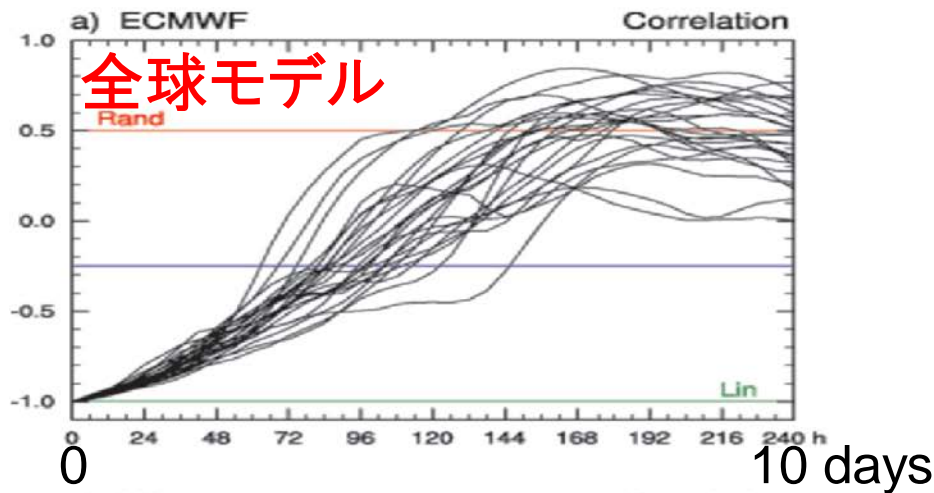


<http://www.flickr.com/photos/stevpas68/5421361050/in/photostream/>



予測可能性の時間空間スケール依存性

- Hohenegger and Schaer (2007)
 - ◆ 初期値誤差の正・負符号ペアの成長比較実験
 - ◆ 接線型性の妥当な時間スケールは、54時間、1.5時間



予測可能性の時間空間スケール依存性

- カオス的性質をもたらす大気的不安定現象の違い
 - 全球モデル： 傾圧不安定
 - 領域モデル： 対流不安定
(特に、水蒸気凝結を伴う湿潤対流、その組織化)
対流不安定成分は急激に発達するがすぐに飽和してしまう
 - 大気境界層モデル(地上からの汚染物質の拡散が関与する世界)
 - 大気が安定成層し風があまり強くない→カオス性弱い
 - 大気が不安定でよくかき混ざる(夏場)→予測は限られる

流れによる物質輸送数値計算のキモ

物質の移流拡散計算:

流れ(流れの速度)の計算結果を使って、物質の移流計算を行う

いわば二段目

困難な点

- 初期条件が重要(初期値が違くと答えが違う)
- 小さなスケールの効果による拡散(乱流拡散モデル)をどう評価するかは自明でない

さらに

気象条件によってカオス性の発現(関与する流体運動)が異なる

気象現象・気象予測に精通してないと予測の確実性がわからない

目次

0. 此処は何処で私は誰
1. はじめに
2. 大気中の物質拡散にまつわる流体力学
煙を例にして
3. 大気中の物質拡散を計算するための
基礎知識
4. SPEEDIについて
5. 観測と予測：気象の場合と放射線の場合
6. おわりに

SPEEDI

System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information

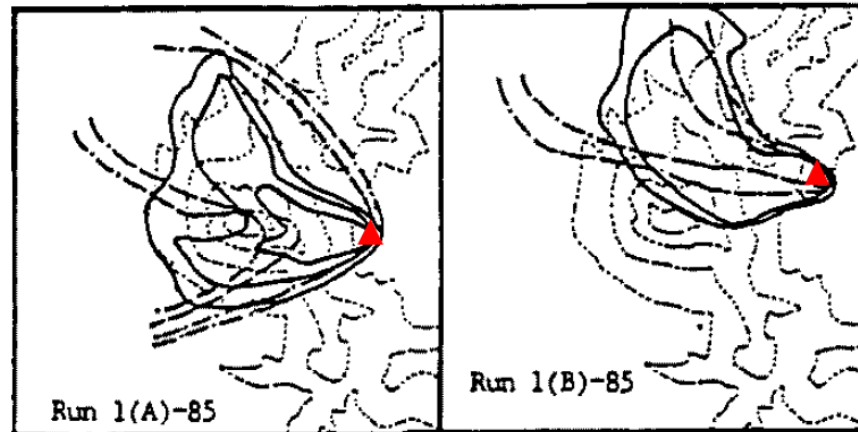
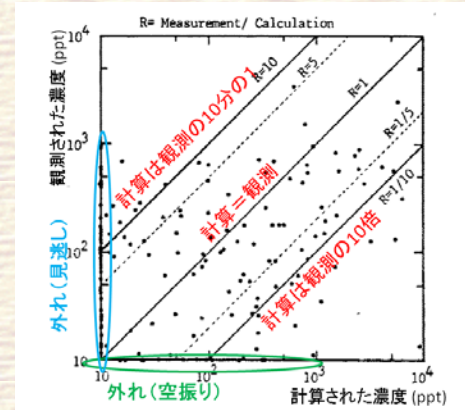
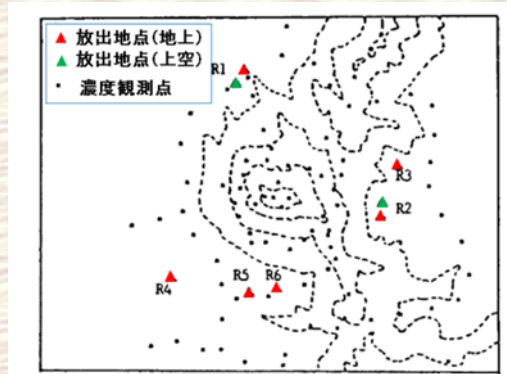
- 領域大気モデルダウンスケーリング → 水平格子間隔 2km
- Mass-Consistent Wind Model内挿 → 水平格子間隔 500m
- 予測可能な最大時間幅は67時間から79時間の間、1時間刻み

さらに

■ 濃度・線量計算

- 水平分解能 500m の風速場の計算結果、放出源情報、地形データなどを入力
- 湿性沈着(降雨等)、乾燥沈着、放射能減衰
→ 放射性物質の大気中濃度および地表蓄積量の予測計算
- 各核種からの複数の γ 線による寄与を個別計算・合算
→ 空気吸収線量率
- 空気吸収線量率
→ 外部被ばく実効線量
- 放射性物質の大気中濃度
→ 吸入による臓器等価線量や内部被ばく実効線量等を計算
- 水平格子間隔 250mで出力

筑波山周辺で行ったSPEEDIの検証観測



計算されたガス分布のパターン(実線が濃度の等高線)と
観測されたガス分布のパターン(一点鎖線が濃度の等高線)の比較

Chino, M., Ishikawa H: Experimental Verification Study for System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information System: SPEEDI, (II) Simulation of field tracer experiment at isolated mountain, J. Nucl. Sci. and Technol., Vol. 25, 805-815 (1988).

チェルノブイリデータによるWSPEEDIの精度評価

Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 41, No. 5, p. 632-640 (May 2004)

Improvement of Worldwide Version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information (WSPEEDI), (I) New Combination of Models, Atmospheric Dynamic Model MM5 and Particle Random Walk Model GEARN-new

Hiroaki TERADA*, Akiko FURUNO and Masamichi CHINO

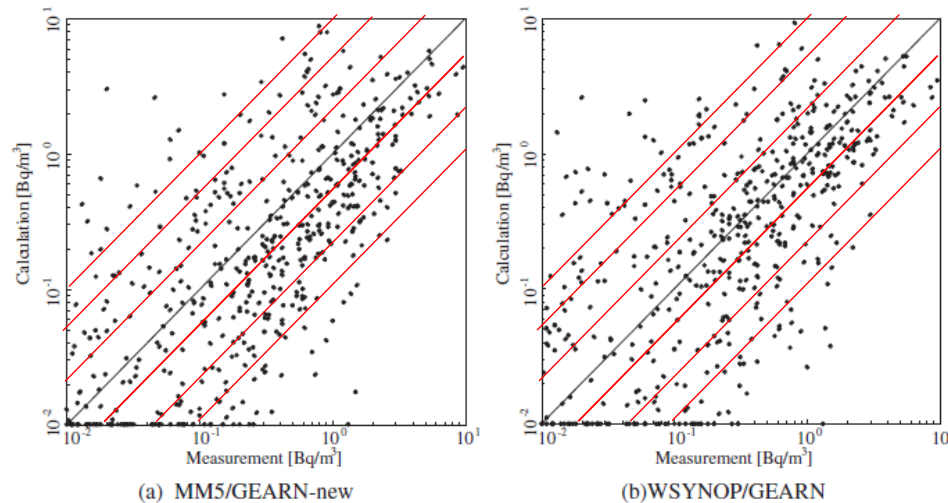


Fig. 6 Scatter diagrams of measured versus calculated surface air concentrations of ^{137}Cs for calculation results (a) by MM5/GEARN-new and (b) by WSYNOP/GEARN

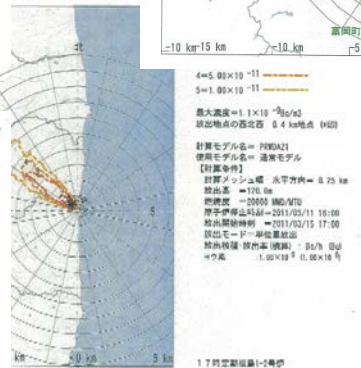
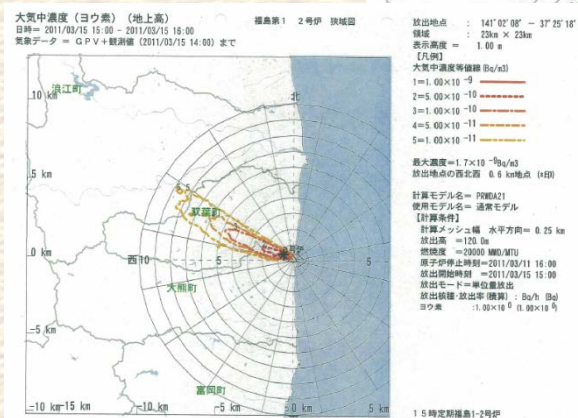
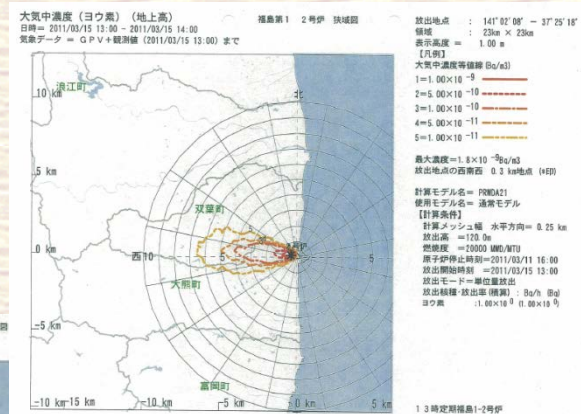
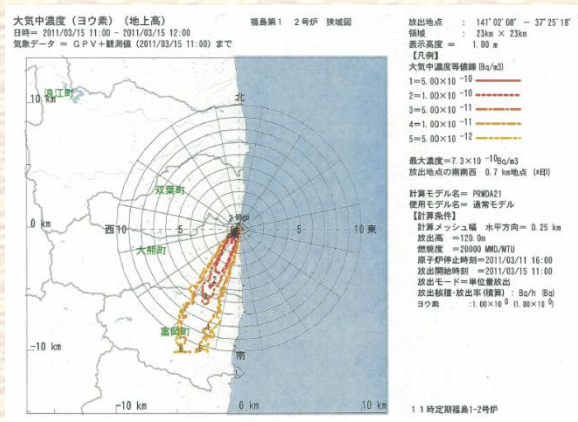
Table 1 Comparison of model performances

| Models | Factor 2 | Factor 5 | Factor 10 | <i>R</i> |
|---------------|----------|----------|-----------|----------|
| MM5/GEARN-new | 32.2% | 69.6% | 84.6% | 0.638 |
| WSYNOP/GEARN | 39.5% | 68.8% | 82.6% | 0.630 |

R: Correlation of logarithm of concentration

横軸が実測値, 縦軸が計算値. 評価地点は, 放出点から数百 km~2000 km離れたヨーロッパの諸都市.

SPEEDIによる大気中濃度(ヨウ素)の分布予測図



単位量放出を仮定し放出開始時刻を3月15日11時, 13時, 15時, 17時とした場合の, それぞれ1時間後の分布. 毎回新たな放出を仮定してその移流拡散だけを計算しており, それ以前に放出された部分は含まれていないことに注意する必要がある.

http://www.nsc.go.jp/mext_speedi/index.html

<http://www.gfd-dennou.org>



WSPEEDI-II

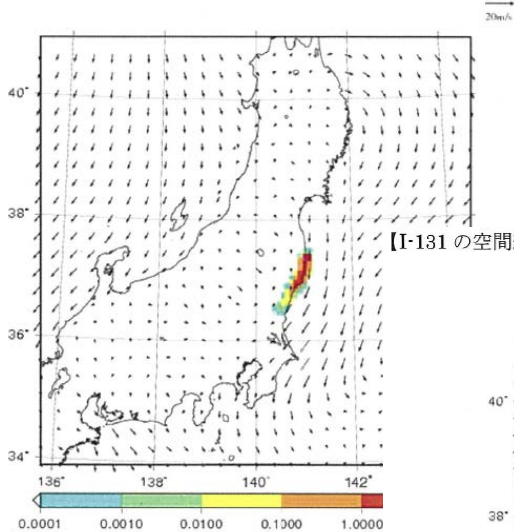
例 3月15日0時から1日放出(2011.3.16計算)

I-131 4.517×10^{14} Bq/h 高度10m放出

<http://www.jaea.go.jp/02/tei120706/20110316.pdf>

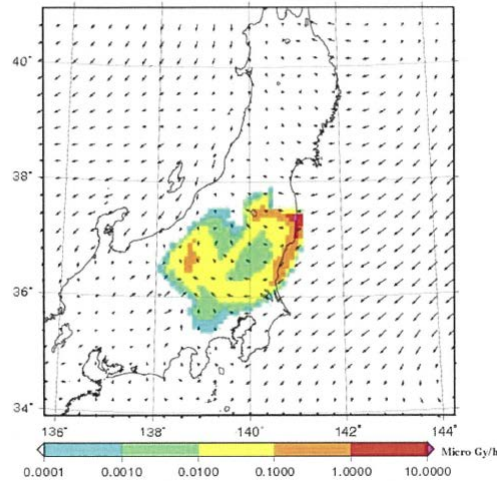
の空間線量率分布 3月15日6時

2011-03-14_21h



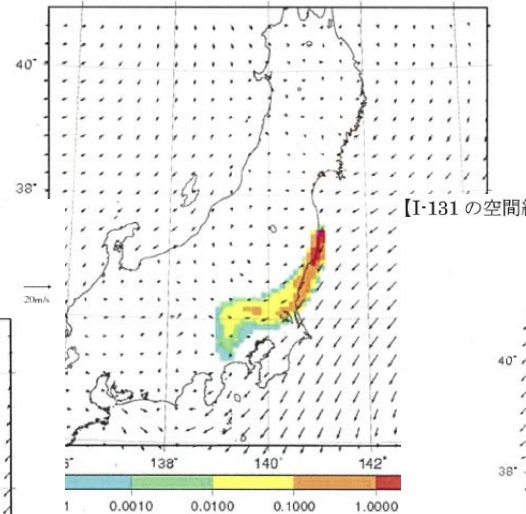
【I-131の空間線量率分布 3月15日18時】

2011-03-15_09h



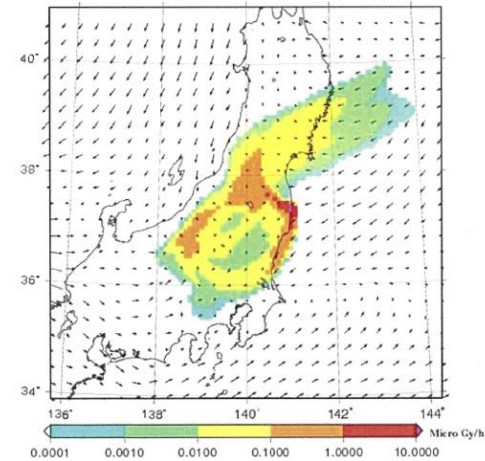
【I-131の空間線量率分布 3月15日12時】

2011-03-15_03h



【I-131の空間線量率分布 3月16日0時】

2011-03-15_15h



ちなみに消息筋によると

- SPEEDIの開発(原研→原子力機構)と運用(文科省・原子力安全センター)は完全に切り離されている
- 3.11事故対応において開発(OBも含めて)はノータッチ！！！！
声もかかってない

目次

0. 此処は何処で私は誰
1. はじめに
2. 大気中の物質拡散にまつわる流体力学
煙を例にして
3. 大気中の物質拡散を計算するための
基礎知識
4. SPEEDIについて
5. 観測と予測：気象の場合と放射線の場合
6. おわりに

ダウンスケーリング + 仮想粒子追跡

- 計算に使用したモデルとその詳細計算設定
 - ◆ モデル: MM5 V3.6.2 (水平 5 km 150 x 150 格子, 鉛直 41 層)
 - ◆ 積雲パラメタリゼーション無し、微物理: Reisner mixed-phase
 - ◆ 境界層スキーム: Blackadar
 - ◆ 放射: Cloud radiation scheme
 - ◆ 初期値境界値: NCEP FNL 1deg x 1deg, 6-hourly
 - ◆ 計算期間: 2011-03-11 00UTC (09JST) から 11日、結果出力: 10 分

ダウンスケーリング + 仮想粒子追跡

- 多粒子ラグランジュ追跡

- ◆ 初期粒子位置:

(37.4047N, 141.0566E) を中心に

東西 10 km, 南北 10 km, 鉛直約 40-290 m の範囲

- ◆ 放出時刻・点数:

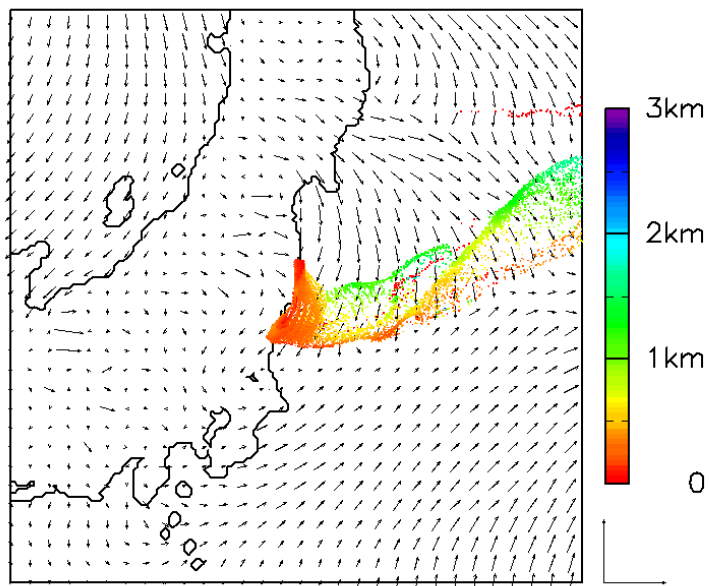
2011-03-12 16JST (一号機爆発後に対応) に粒子を放出開始, 10分おきに $5 \times 5 \times 5 = 125$ 点を放出

- ◆ 追跡方法:

モデルの三次元風速場を内挿して移流計算 (ランダム項拡散は無し)

モデル最下層 (約 40 m) と地表面の間は、出力に含まれる高度 10 m の風速を地表面の風の代わりに用いて内挿処理する簡便な方法で計算

2011-03-15 00:00:00 JST



XUNIT = 3.000E+01, YUNIT = 3.000E+01

大塚・余田 2011, 2012

モデル:MM5 V3.6.2

水平 5 km 150x150格子, 鉛直 41 層

積雲パラメタリゼーション:無し

境界層スキーム:Blackadar

微物理:Reisner mixed-phase

放射:Cloud radiation scheme

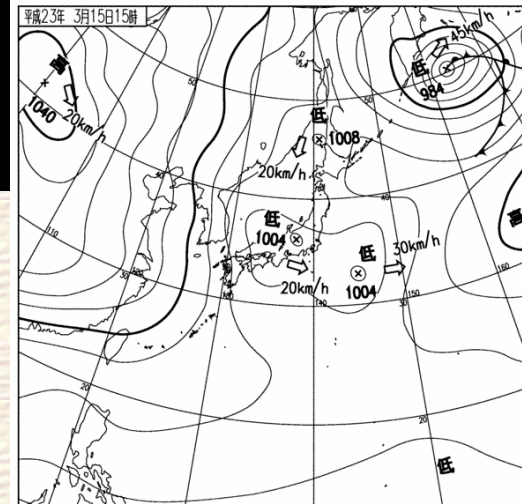
初期値境界値:NCEP FNL 1x1deg, 6-hourly

10 km × 10 km × 最下層(約 40 m) ~ 第 4 層(約 290 m)に
5 × 5 × 5粒を10分おきに放出

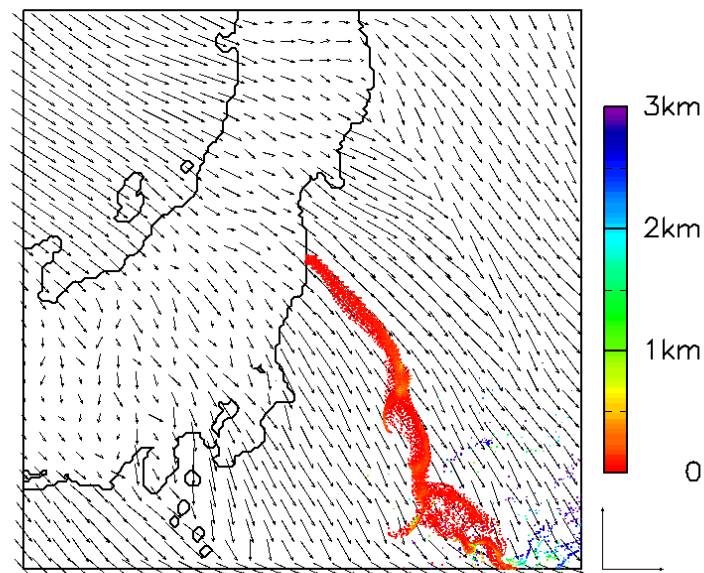
計算期間:2011-03-11 00UTC からモデル出力間隔:10 分

動画は <http://www.gfd-dennou.org/library/kakusan/> にて
公開

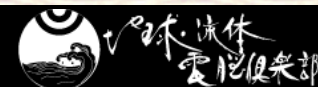
<http://www.gfd-dennou.org>



2011-03-16 18:00:00 JST

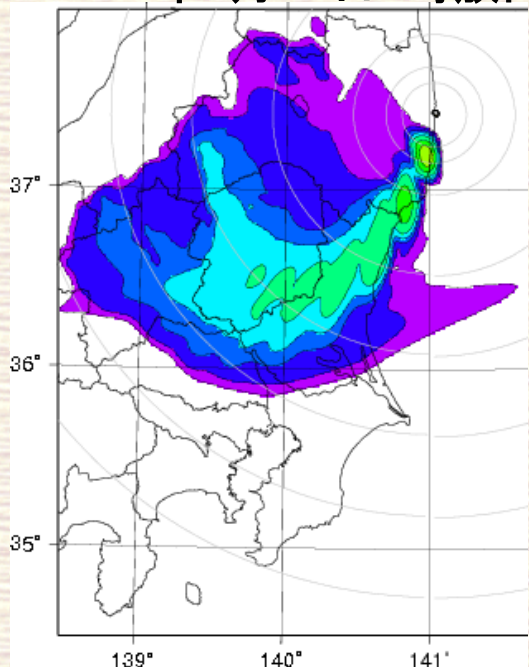


XUNIT = 3.000E+01, YUNIT = 3.000E+01

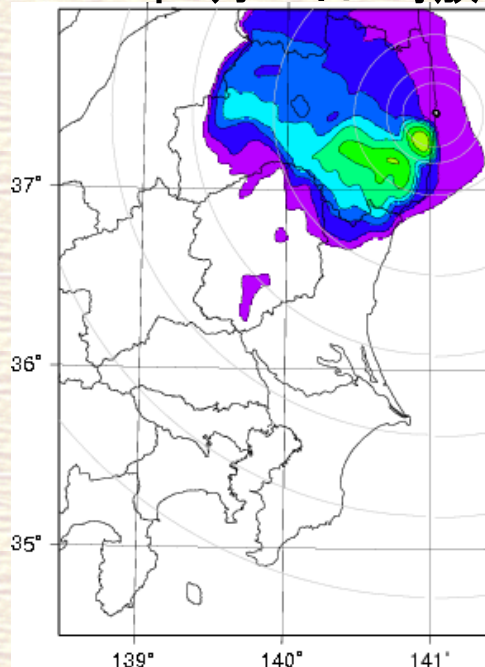


初期値依存性(カオスの振る舞い)

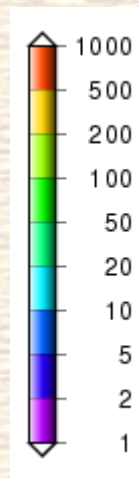
2011年3月15日6時放出



2011年3月15日9時放出



CReSS による計算例



(左)2011年3月15日6時から, (右)3時間後の同9時から, 福島第一原発で一定量の物質を瞬間的に放出した場合の計算結果. 初期から30時間の地上における混合比を平均(データは1時間ごとに出だし31データを平均)したもの. カラーレベルの値は相対値で, 絶対値そのものには意味がない. また, データ出力間隔1時間はかなり荒く, 図中で等値線が凸凹している原因の一つと考えられる. なお, この計算での物質は降水とは無関係に移流拡散されるだけにしてある. (加藤・篠田・坪木・相木 2011, 2012)

CReSS http://www.rain.hyarc.nagoya-u.ac.jp/~tsuboki/cress_html/

動画は <http://www.gfd-dennou.org/library/kakusan/> にて公開

名大グループでは日々のシミュレーション実験を行っている(CReSS)

| PNF2.5KM | PNF1.5KM |
|---------------------------------|---------------------------------|
| 格子数: 803x811x36 | 格子数: 603x603x36 |
| 境界値: GSM(日本域) | 境界値: MSM |
| 初期値: 毎日 21JST | 初期値: 毎日 9JST |
| 積分時間: 36時間 | 積分時間: 30時間 |
| 計算機: Xeon X5570 2.93GHz (128コア) | 計算機: Xeon X5570 2.93GHz (128コア) |
| 所要時間: 約7時間30分 | 所要時間: 約3時間40分 |

放出条件

福島第一原発上空 100m を中心に水平1.5km、鉛直0.5km の楕円球を与え、中心を 1 として、中心から離れるに従って小さくなる混合比分布を連続的に放出

計算条件:

乱流混合 (TKE を予測する1.5次のクロージャー) と移流のみ。沈着過程等は考慮していない。

$$\Delta x = 2.5\text{km} (3/12 - 5/2)$$

$$\Delta x = 1.5\text{km} (3/23 - 4/5)$$

日々のシミュレーション結果を眺めて...

- 他機関の拡散シミュレーションの結果とほぼ同様
- より詳細な分布が計算されている
- 解像度1.5km と 2.5km で分布が異なる場合がある

3月15日6時10分頃福島第一原子力発電所2号炉で発生した水素爆発に伴うレーザー放出実験とトラジェクトリー解析を通して、移流・拡散シミュレーションのさまざまな依存性を明らかにする

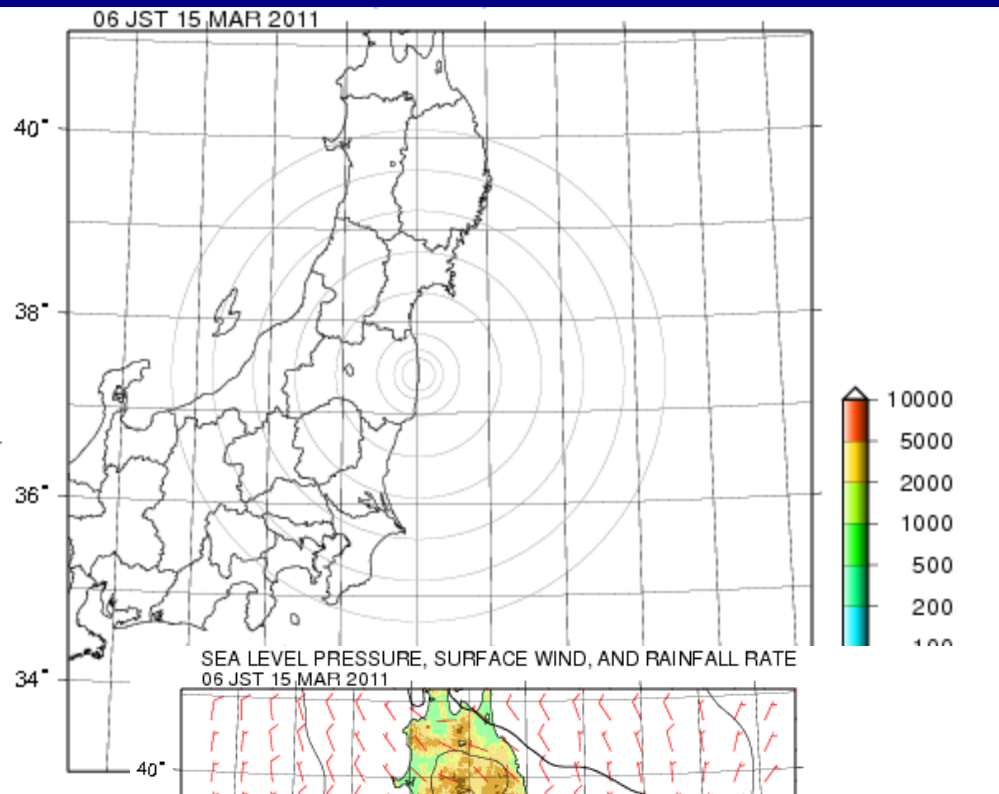
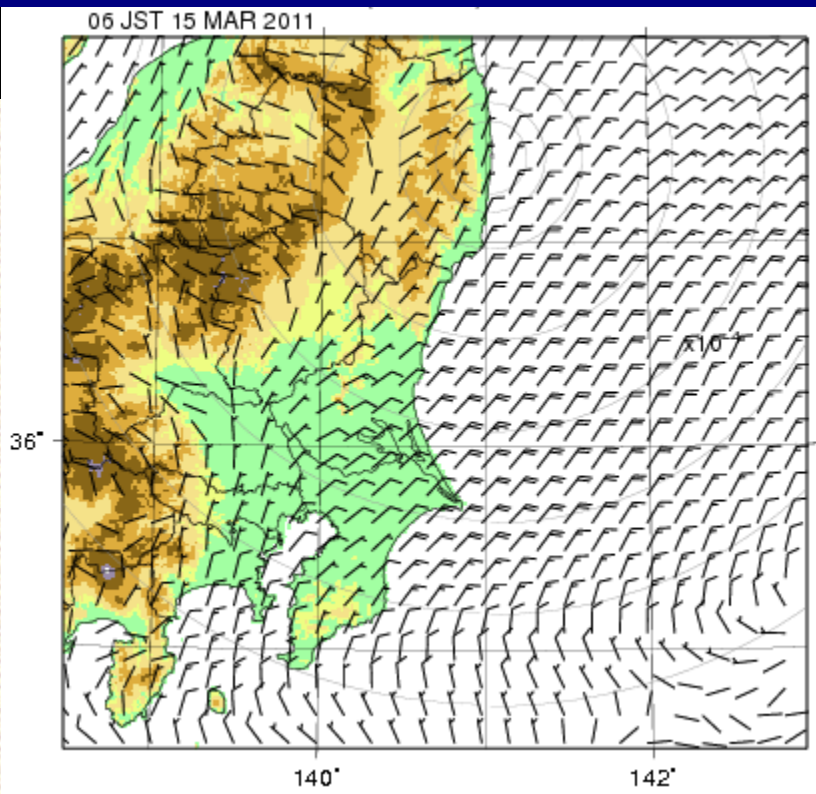
- 水平格子解像度依存
- 初期値依存
- 沈着過程

3月15日福島第一原子力発電所で起こったこと

| | | |
|--------|-----|--|
| 0:02 | 2号機 | ドライイベントのため、弁を「開」操作 |
| 0:45 | 2号機 | 原子炉圧力 1823kPa |
| 3:00 | 2号機 | ドライウェル(D/W)圧力 750kPa(D/W圧力が設計上の最高使用圧力を 超えたことから、減圧操作及び原子炉内の注水作業を行っているが、減 圧しきれていない) |
| 5:00 | 2号機 | 原子炉圧力低下 (626kPa) |
| 6:00 | 2号機 | 圧力抑制室(S/C)付近において水素爆発と思われる衝撃音を確認(S/C 付近で、大きな衝撃音)。作業に必要な要員を残し非難(原子炉水位 TAF-2800mm、原子炉圧力とS/P圧力不明、D/W圧力0.73MPa) |
| 6:10頃 | 4号機 | 大きな衝撃音が発生。原子炉建屋屋根付近にて、損傷を発見 |
| 6:56 | 4号機 | 建屋の上が変形した模様 |
| 8:11 | 4号機 | 原子炉建屋に損傷が確認され、正門付近で 500 μ Sv/h を超えたことか ら15条報告事象(火災、爆発等による放射性物質の異常放出)が発生 したと事業者が判断 |
| 8:25 | 2号機 | 原子炉建屋5階付近より、白い煙(湯気らしきもの)を確認 |
| 9:38 | 4号機 | 原子炉建屋3階北西コーナー付近より火災発生確認、消防へ連絡 米軍及び自衛消防隊による消火活動実施予定 |
| 11:00頃 | 4号機 | 原子炉建屋火災について現場確認したところ、自然に消えていることを確認 |
| 15:25 | 2号機 | 原子炉圧力が格納容器圧力より低 (原子炉圧力 0.119MPa gage、D/W圧力 0.174MPa gage) |
| 15:30 | 2号機 | 炉心損傷割合14%から35%に変化 |
| 16:00 | 3号機 | S/C 側 AO弁開操作 |
| 16:05 | 3号機 | S/C AO弁開操作 |

経済産業省「原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書について」より

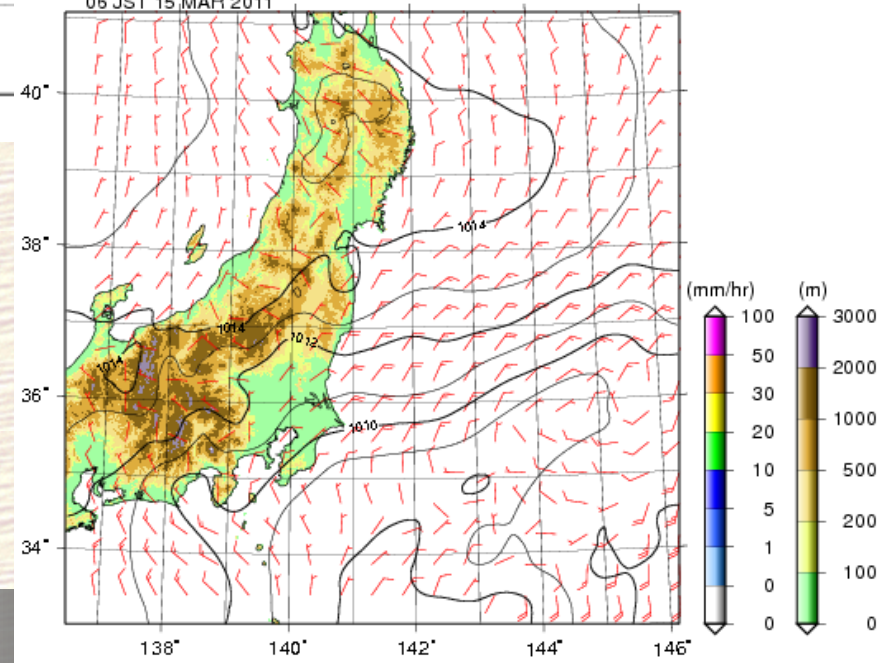
2011年3月15日6時を初期値とした計算結果(CReSS)



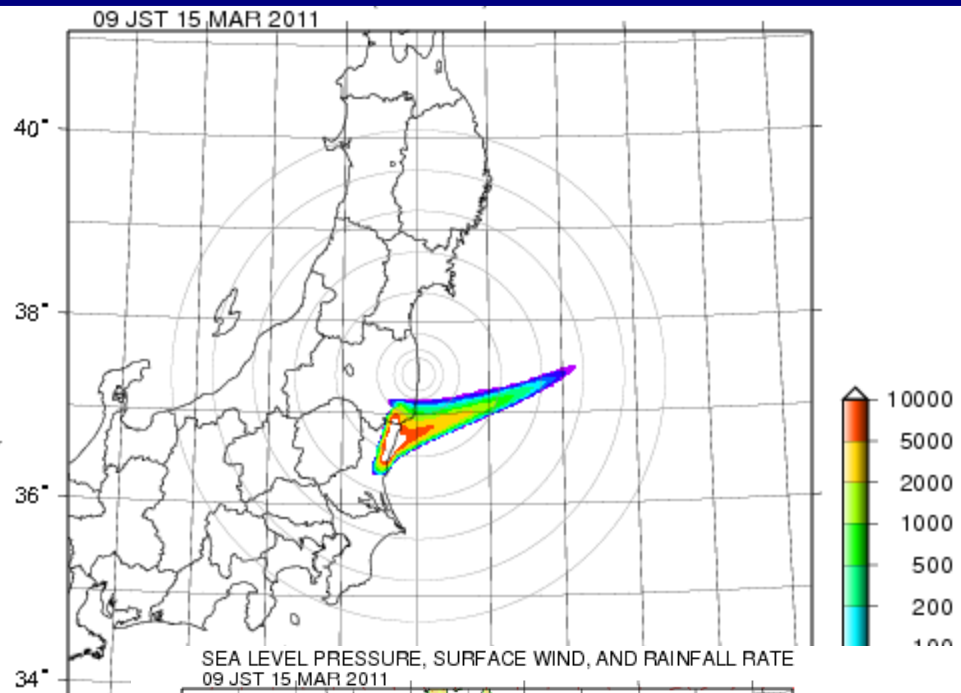
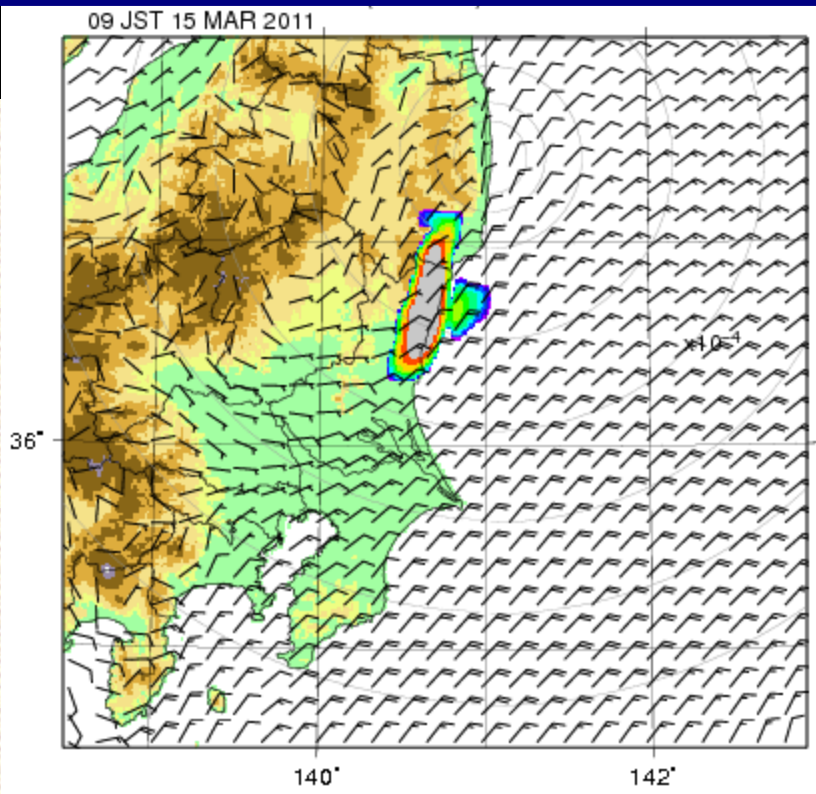
2011年3月15日6時

- 右上: トレーサ濃度(地表)
- 左上: トレーサ濃度(カラム)
- 左下: 気圧、地上風、降水

加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012



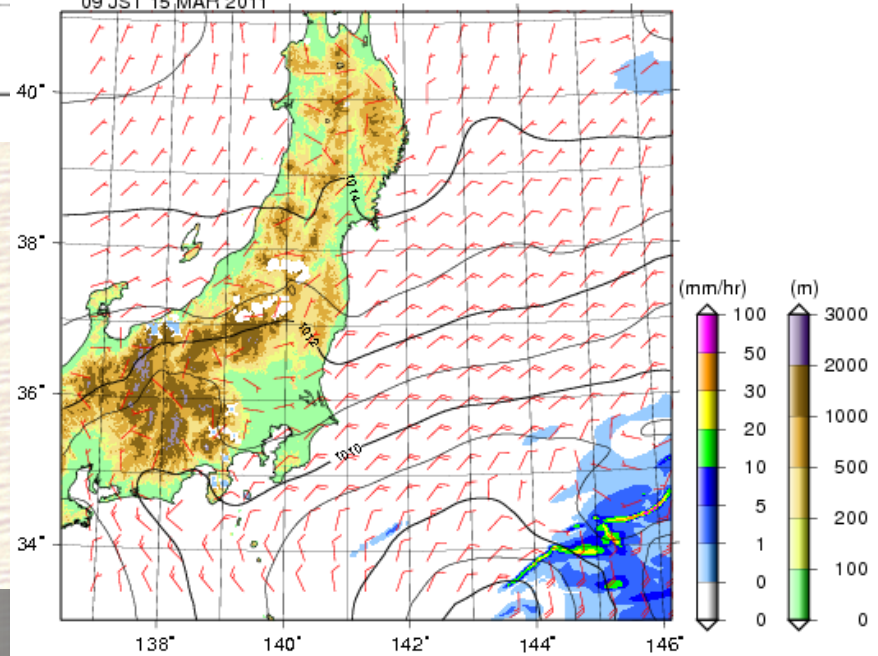
2011年3月15日6時を初期値とした計算結果(CReSS)



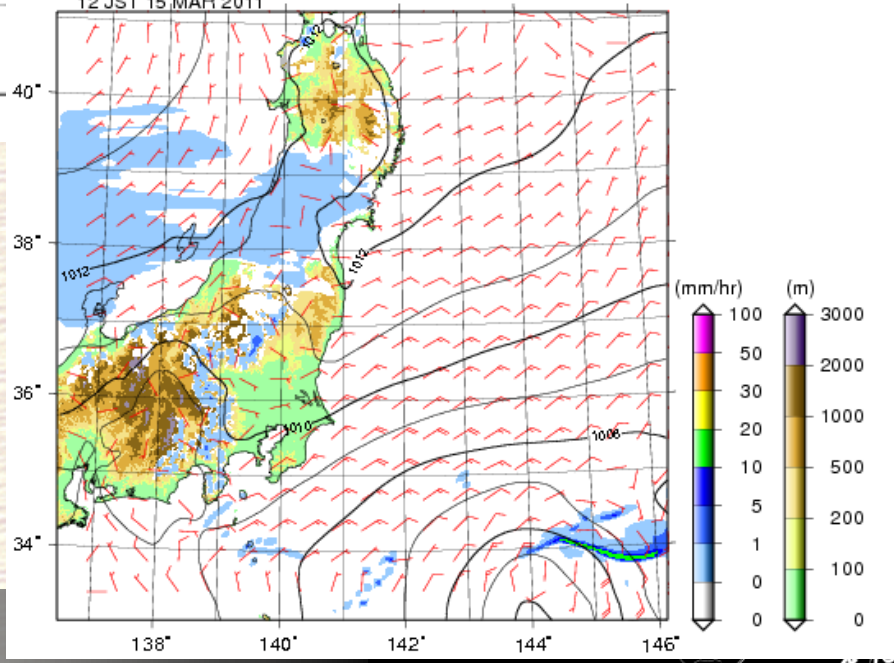
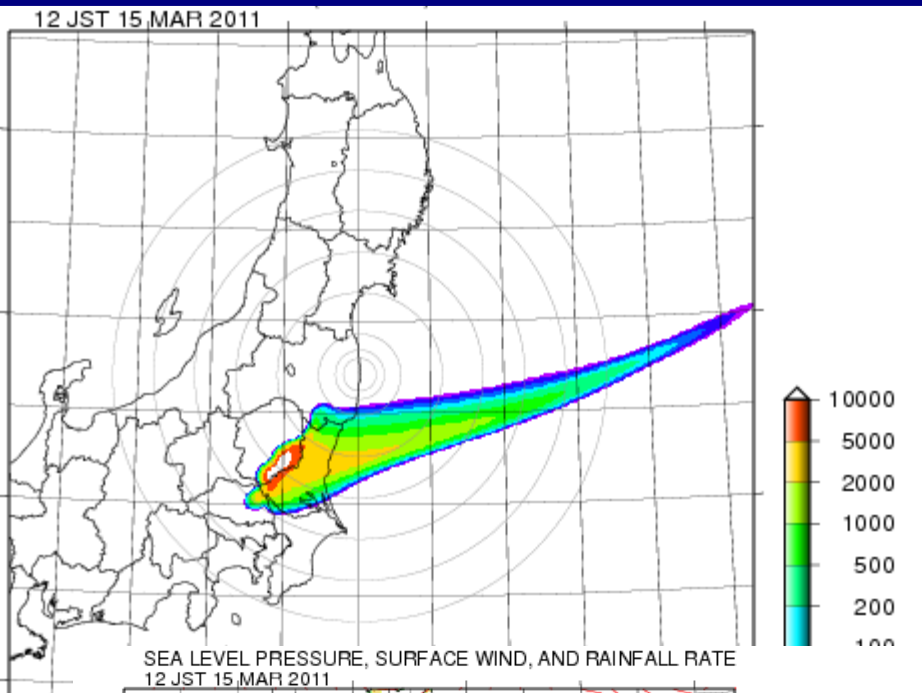
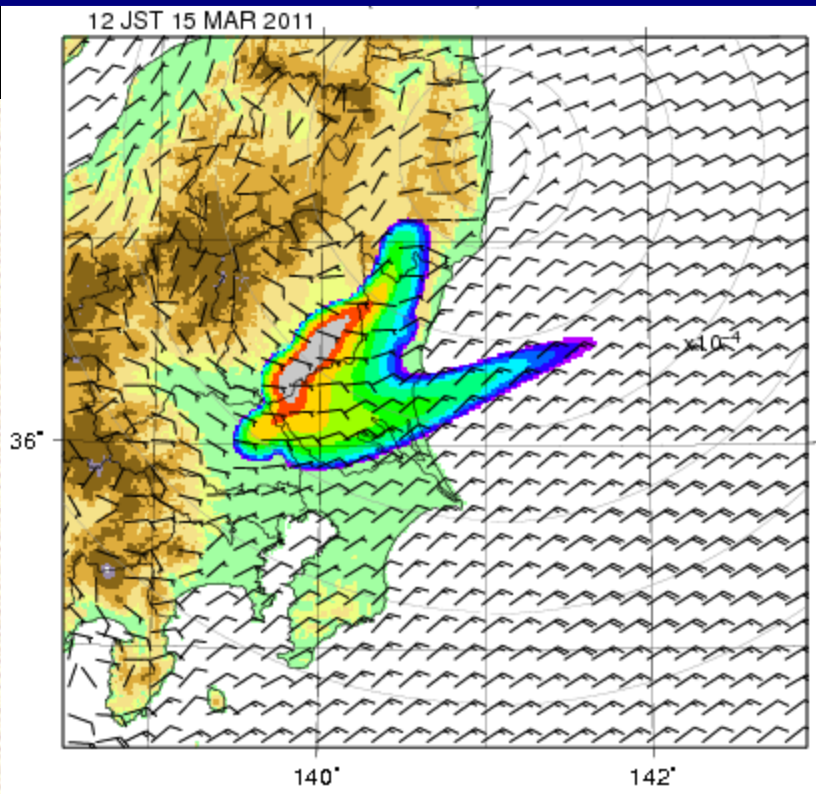
2011年3月15日9時

- 右上: トレーサ濃度(地表)
- 左上: トレーサ濃度(カラム)
- 左下: 気圧、地上風、降水

加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012



2011年3月15日6時を初期値とした計算結果(CReSS)

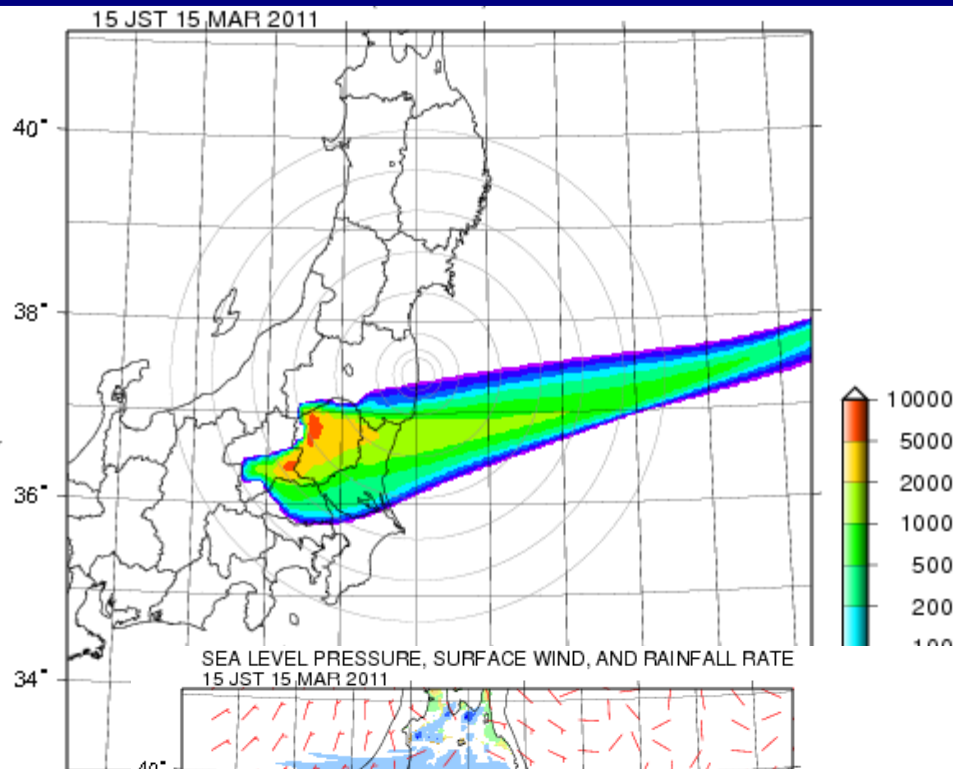
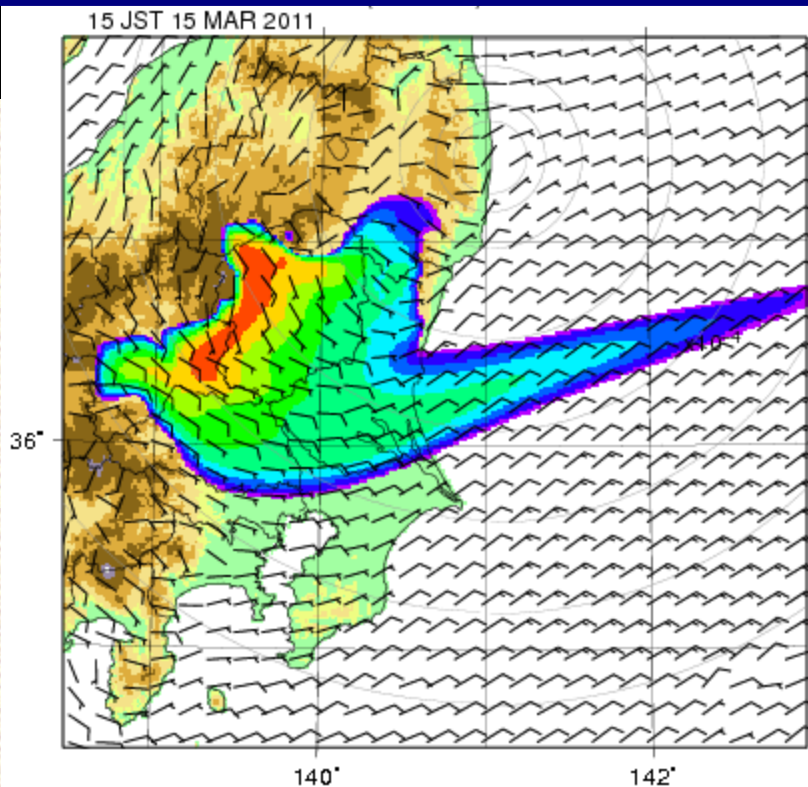


2011年3月15日12時

- 右上: トレーサ濃度(地表)
- 左上: トレーサ濃度(カラム)
- 左下: 気圧、地上風、降水

加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

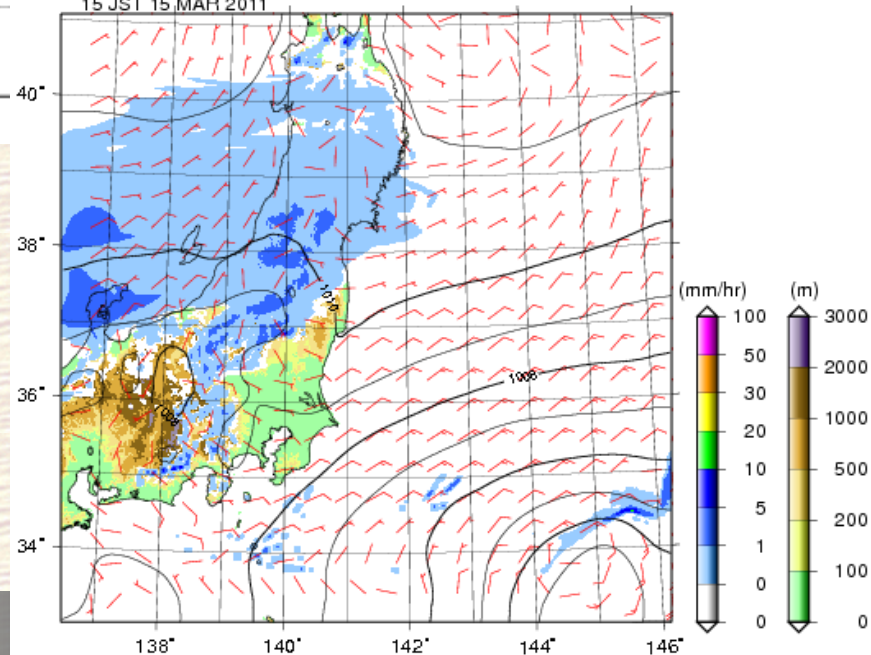
2011年3月15日6時を初期値とした計算結果(CReSS)



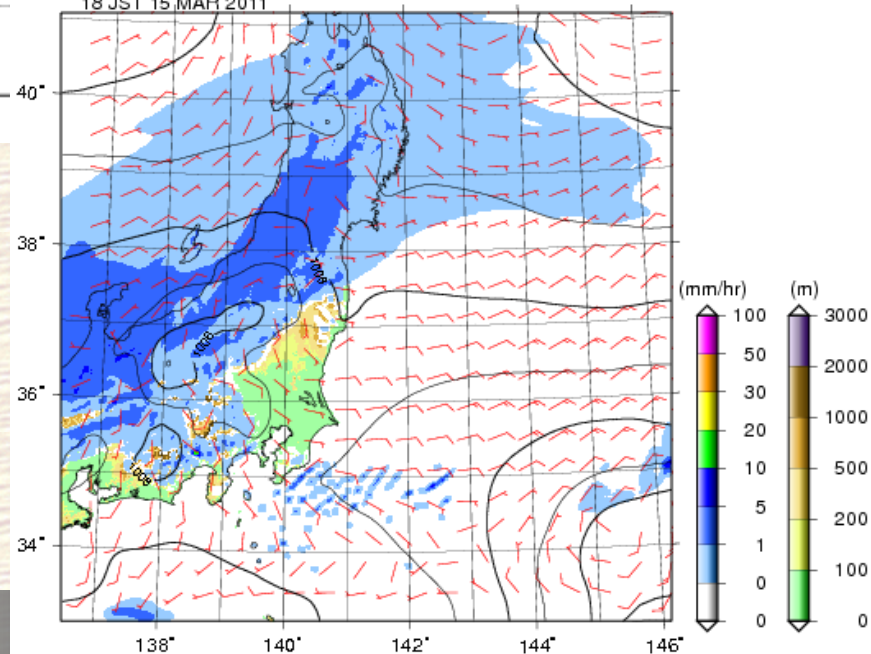
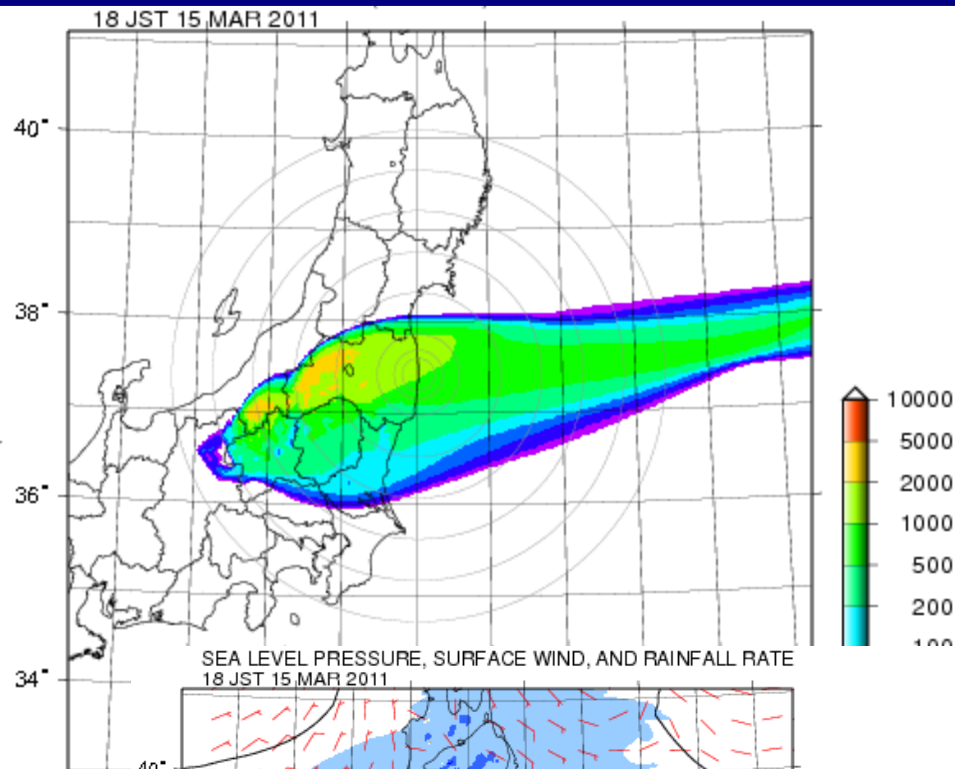
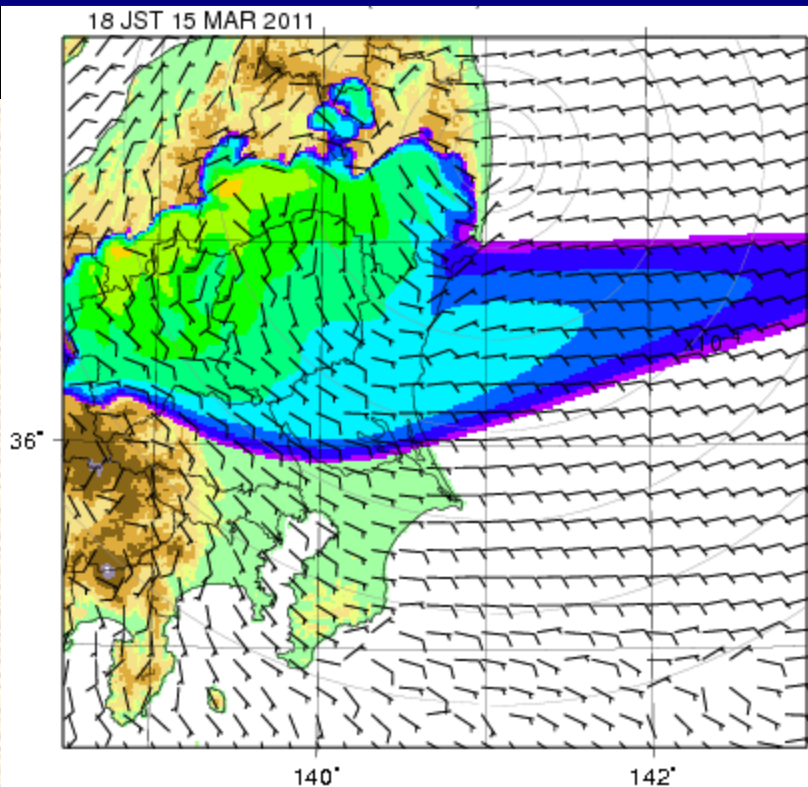
2011年3月15日15時

右上: トレーサ濃度(地表)
左上: トレーサ濃度(カラム)
左下: 気圧、地上風、降水

加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012



2011年3月15日6時を初期値とした計算結果(CReSS)

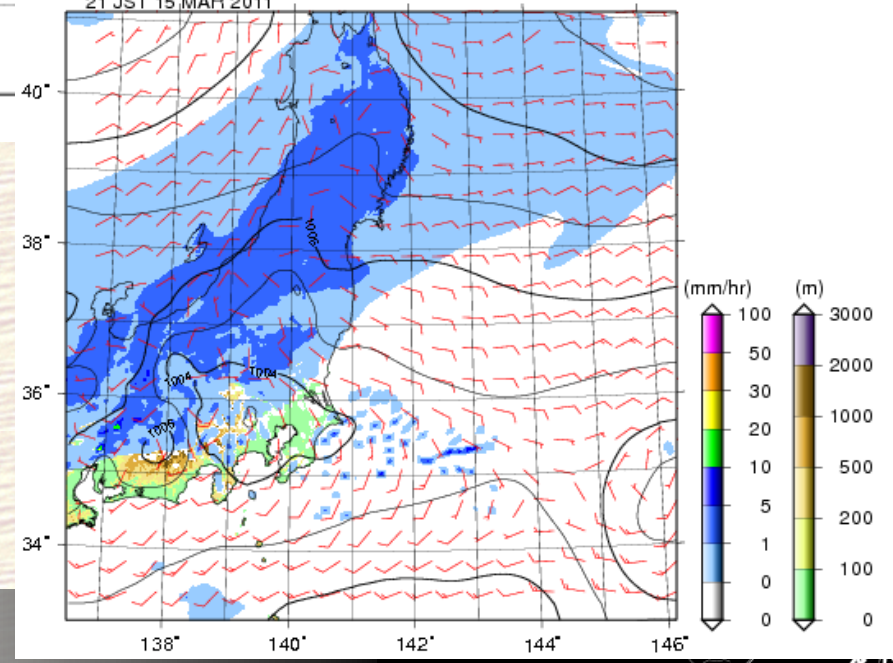
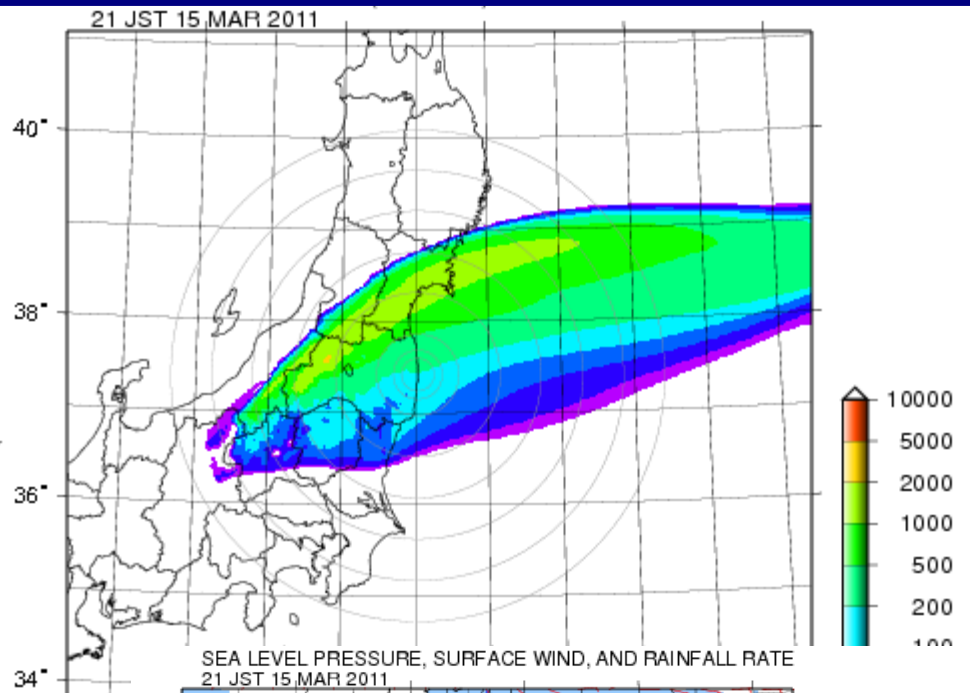
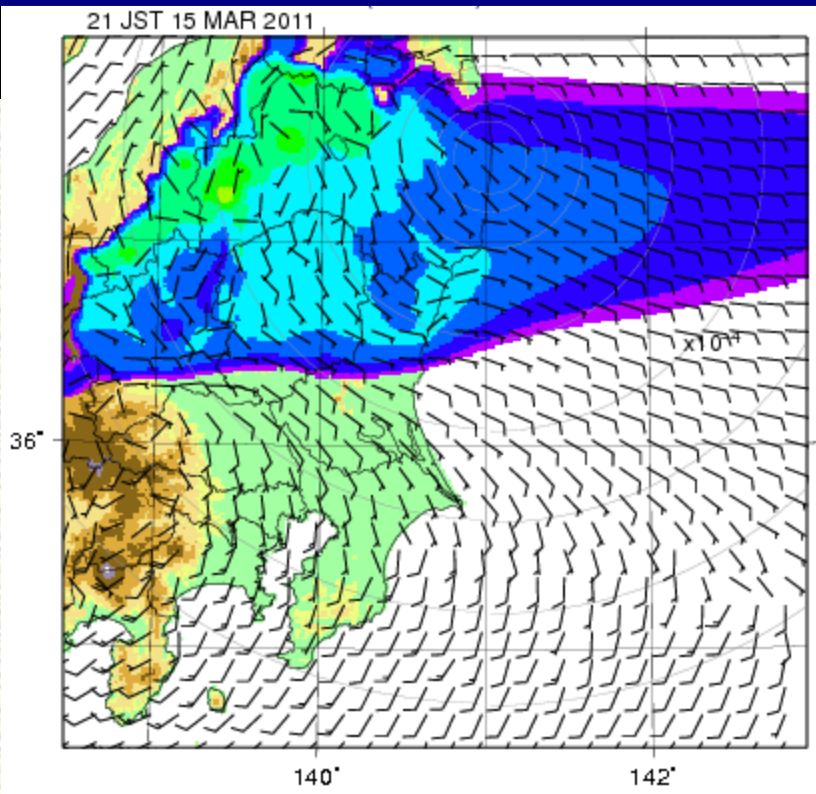


2011年3月15日18時

- 右上: トレーサ濃度(地表)
- 左上: トレーサ濃度(カラム)
- 左下: 気圧、地上風、降水

加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

2011年3月15日6時を初期値とした計算結果(CReSS)

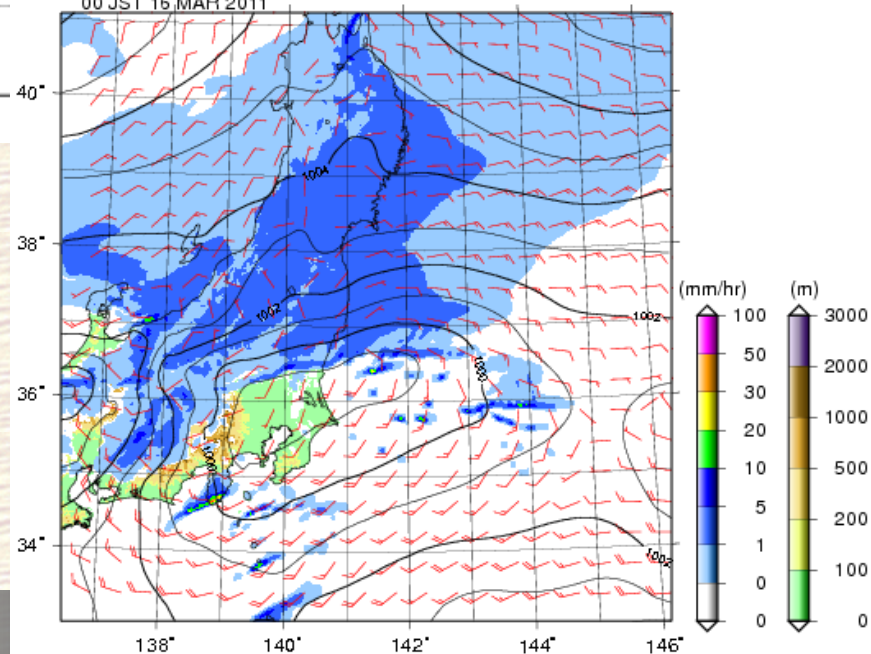
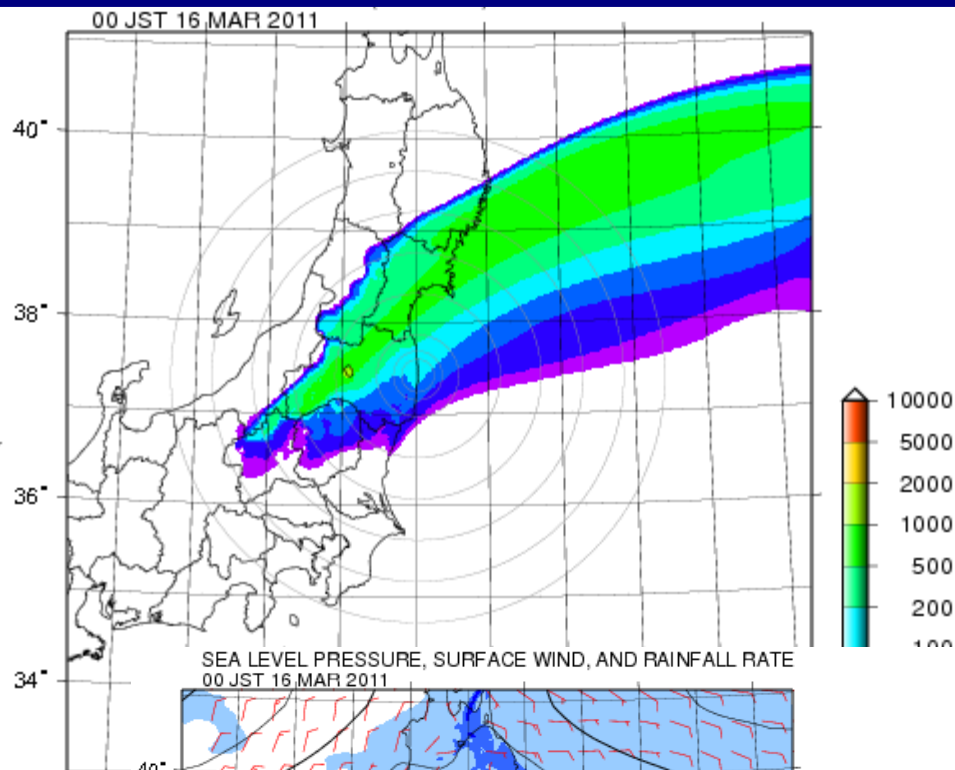
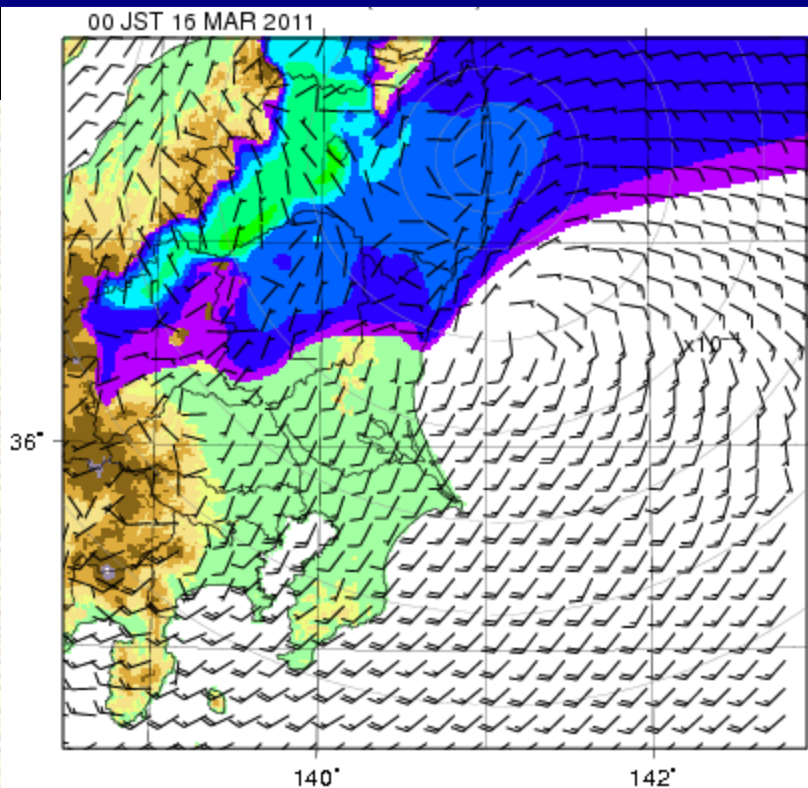


2011年3月15日21時

- 右上: トレーサ濃度(地表)
- 左上: トレーサ濃度(カラム)
- 左下: 気圧、地上風、降水

加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

2011年3月15日6時を初期値とした計算結果(CReSS)

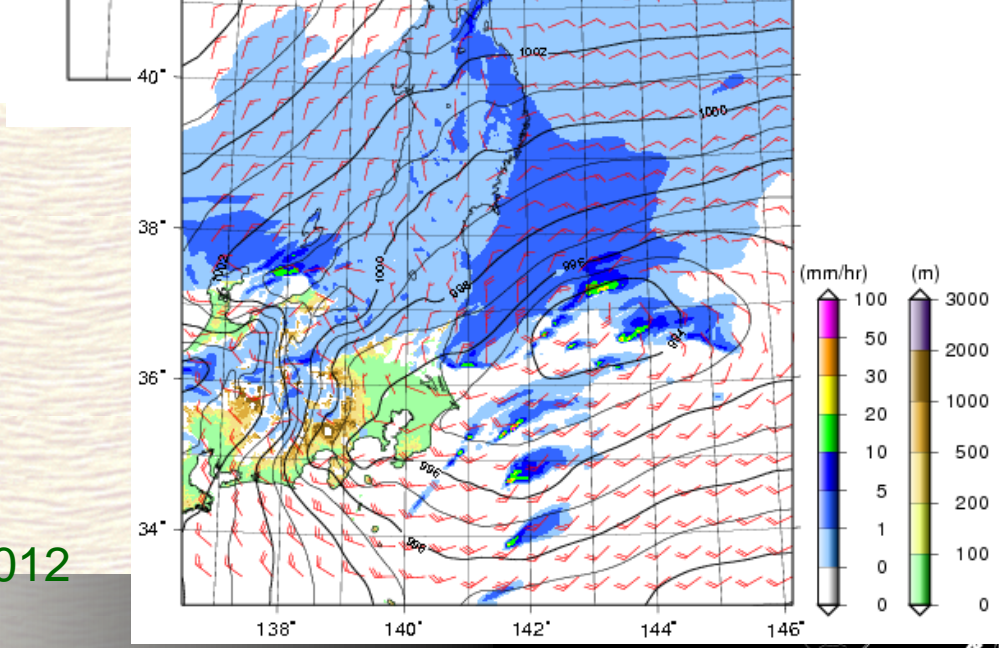
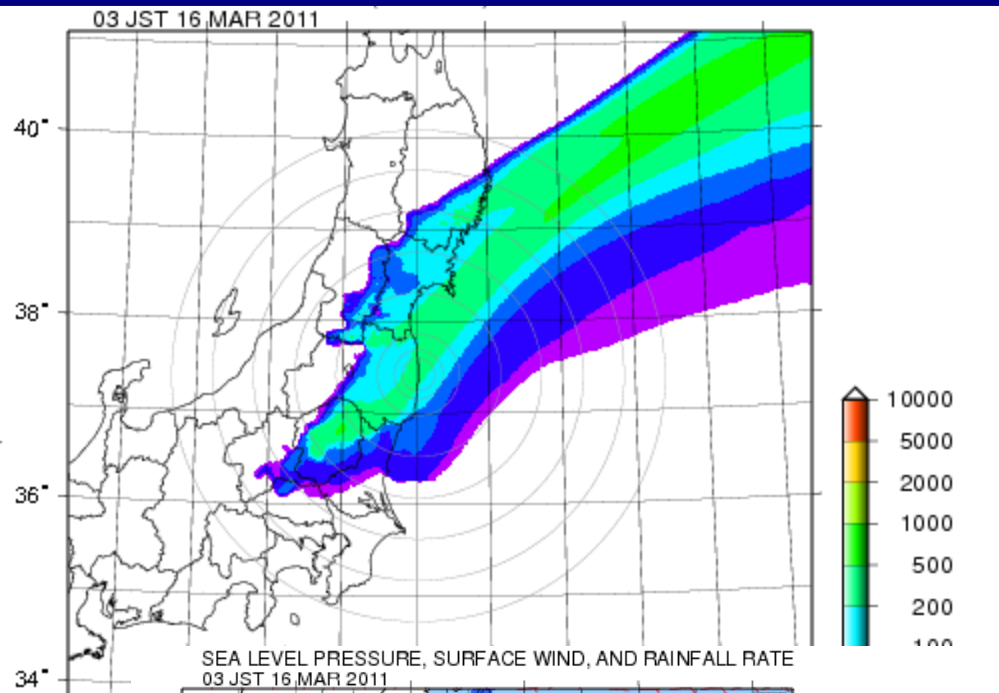
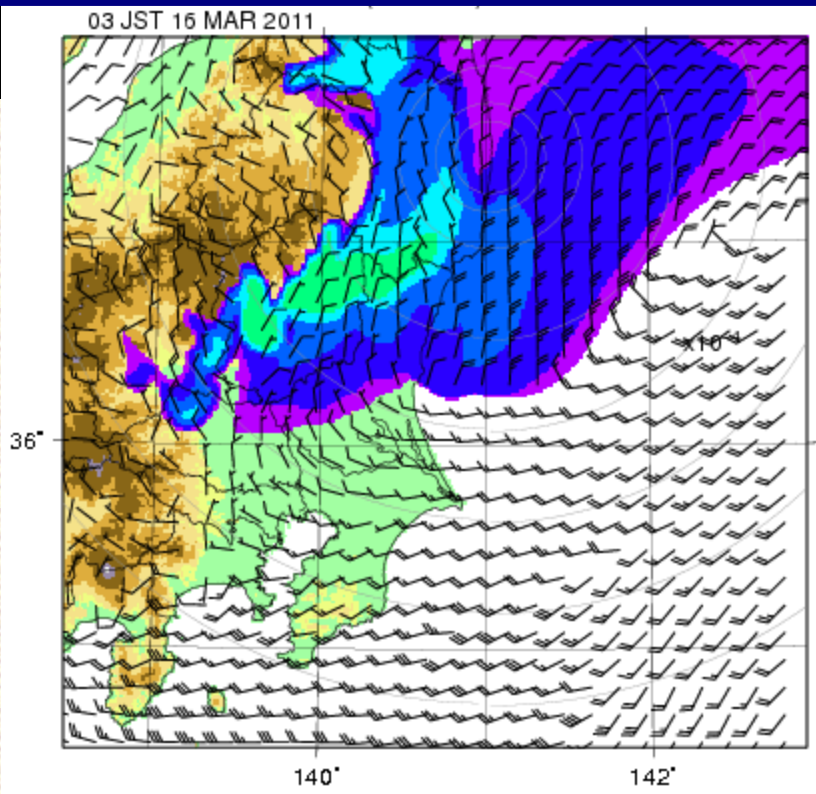


2011年3月16日0時

右上: トレーサ濃度(地表)
左上: トレーサ濃度(カラム)
左下: 気圧、地上風、降水

加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

2011年3月15日6時を初期値とした計算結果(CReSS)

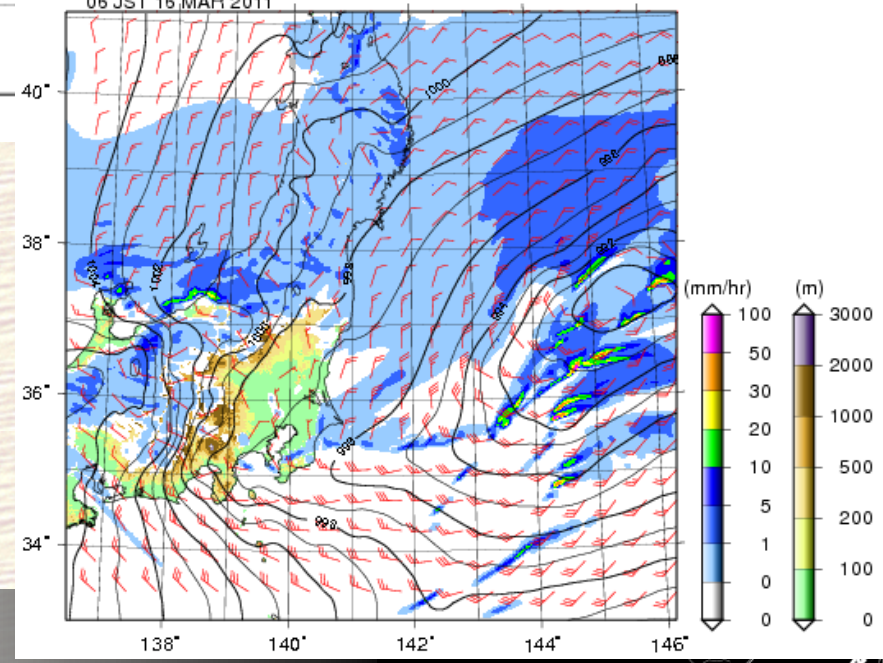
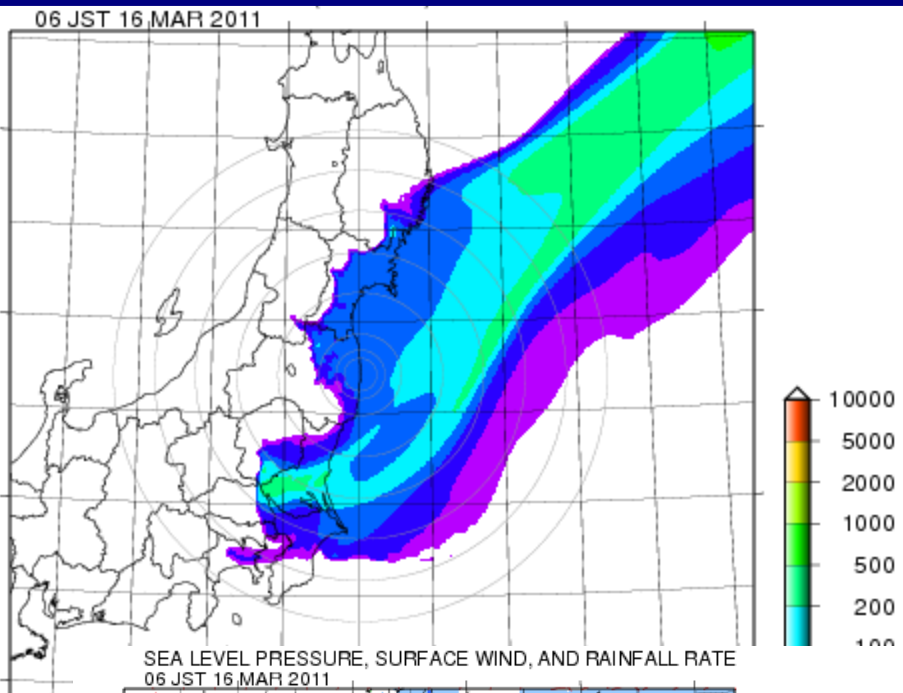
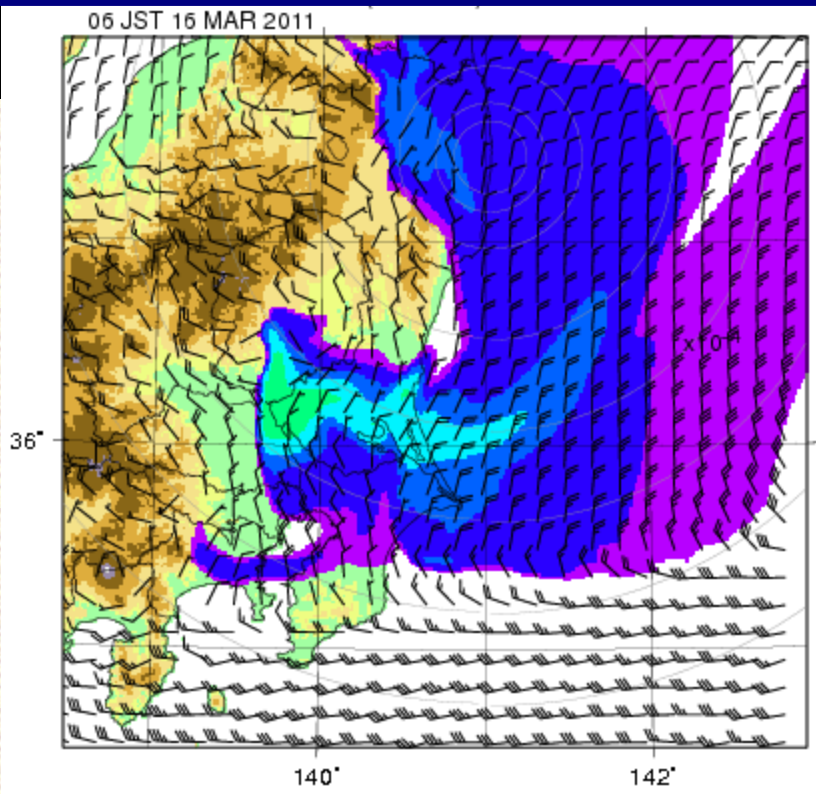


2011年3月16日3時

- 右上: トレーサ濃度(地表)
- 左上: トレーサ濃度(カラム)
- 左下: 気圧、地上風、降水

加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

2011年3月15日6時を初期値とした計算結果(CReSS)

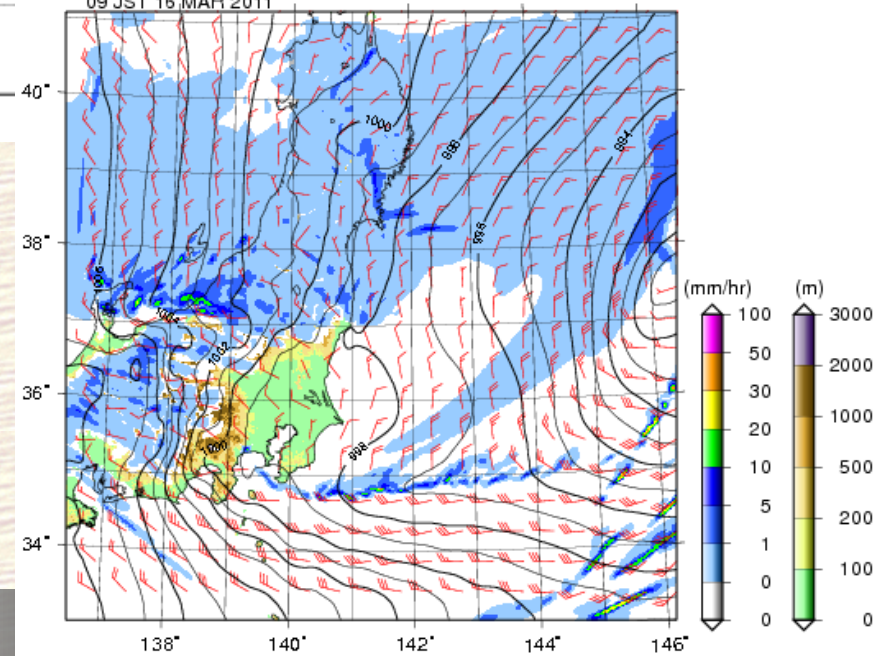
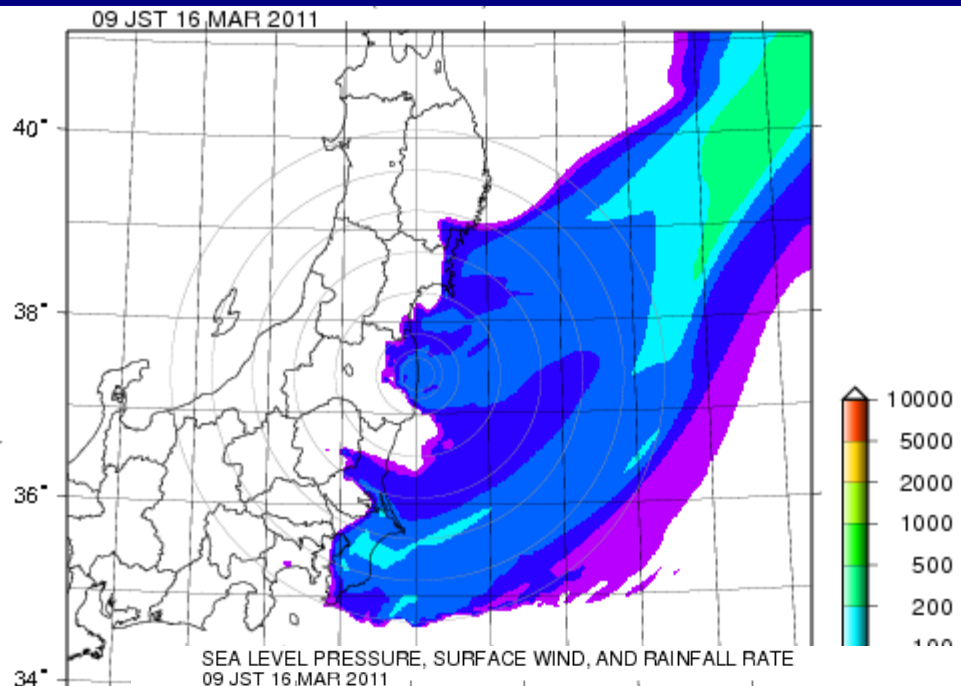
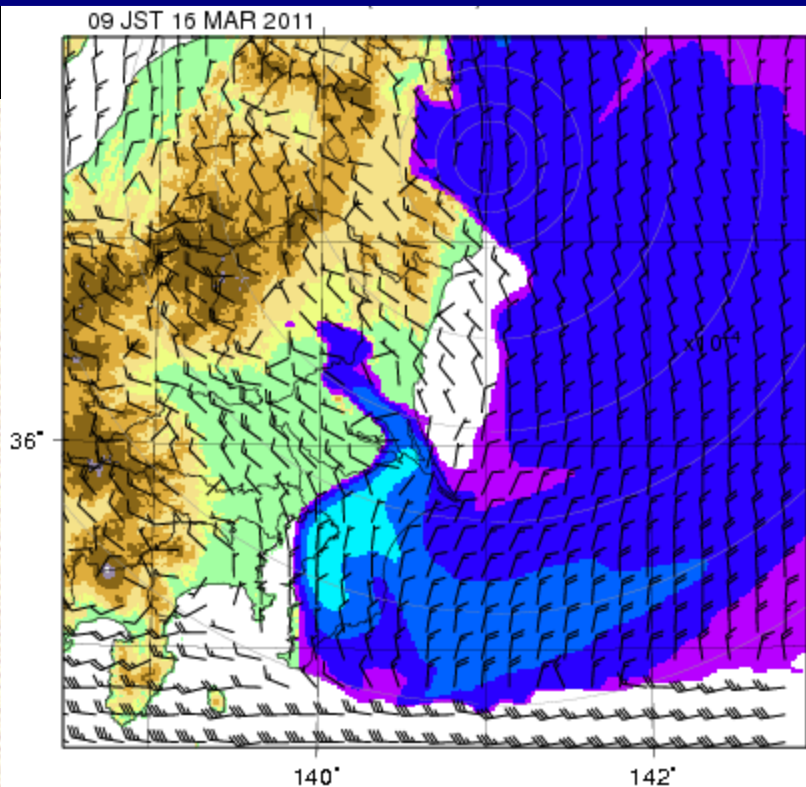


2011年3月16日6時

- 右上: トレーサ濃度(地表)
- 左上: トレーサ濃度(カラム)
- 左下: 気圧、地上風、降水

加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

2011年3月15日6時を初期値とした計算結果(CReSS)

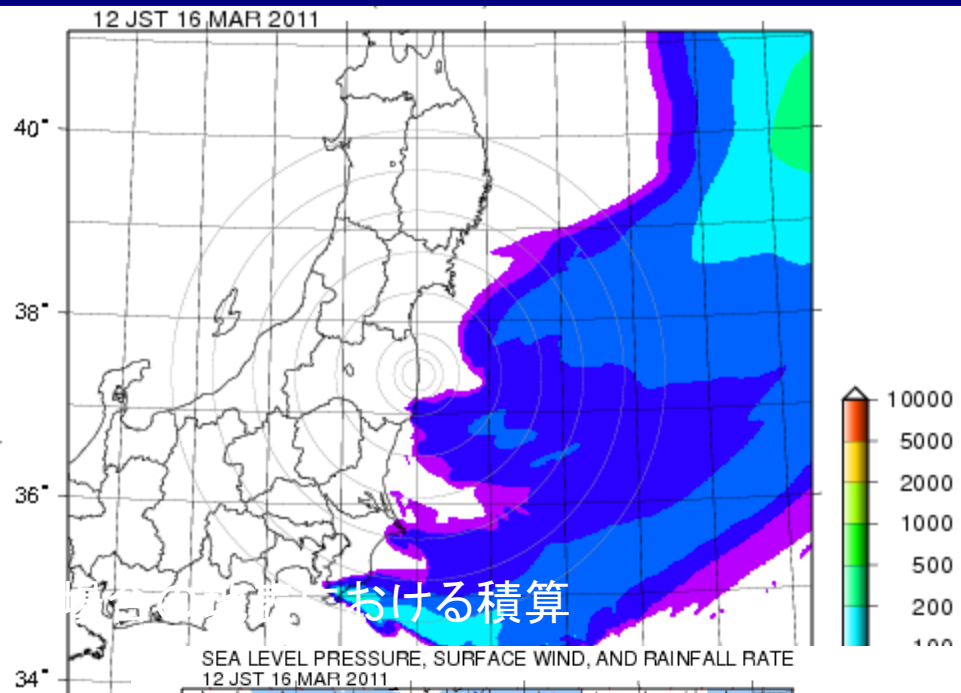
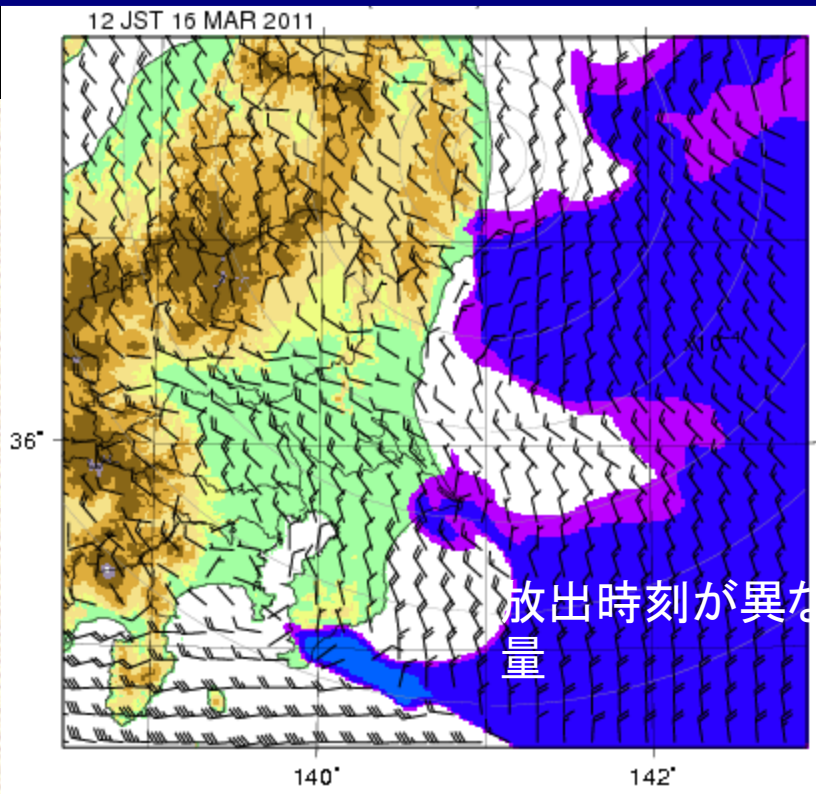


2011年3月16日9時

- 右上: トレーサ濃度(地表)
- 左上: トレーサ濃度(カラム)
- 左下: 気圧、地上風、降水

加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

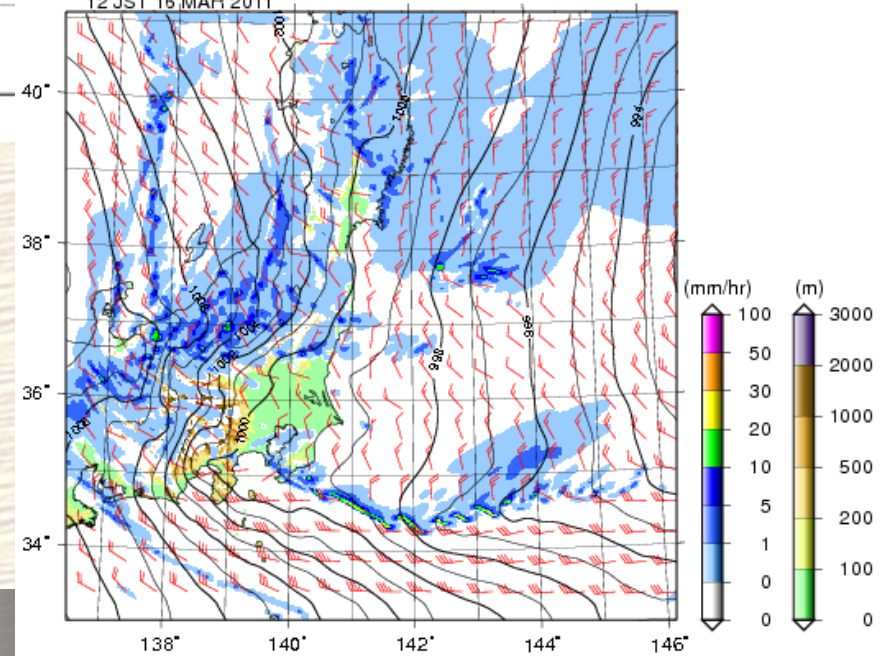
2011年3月15日6時を初期値とした計算結果(CReSS)



2011年3月16日12時

- 右上: トレーサ濃度(地表)
- 左上: トレーサ濃度(カラム)
- 左下: 気圧、地上風、降水

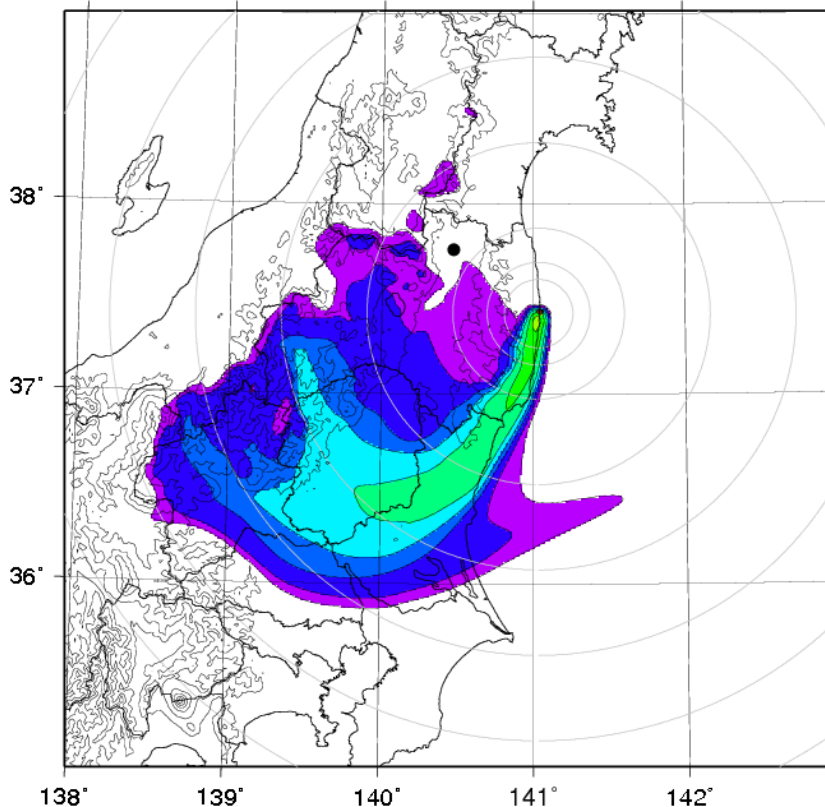
加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012



2011年3月15日6時を初期値とした計算結果 (CReSS) 水平格子解像度が異なる場合における積算量

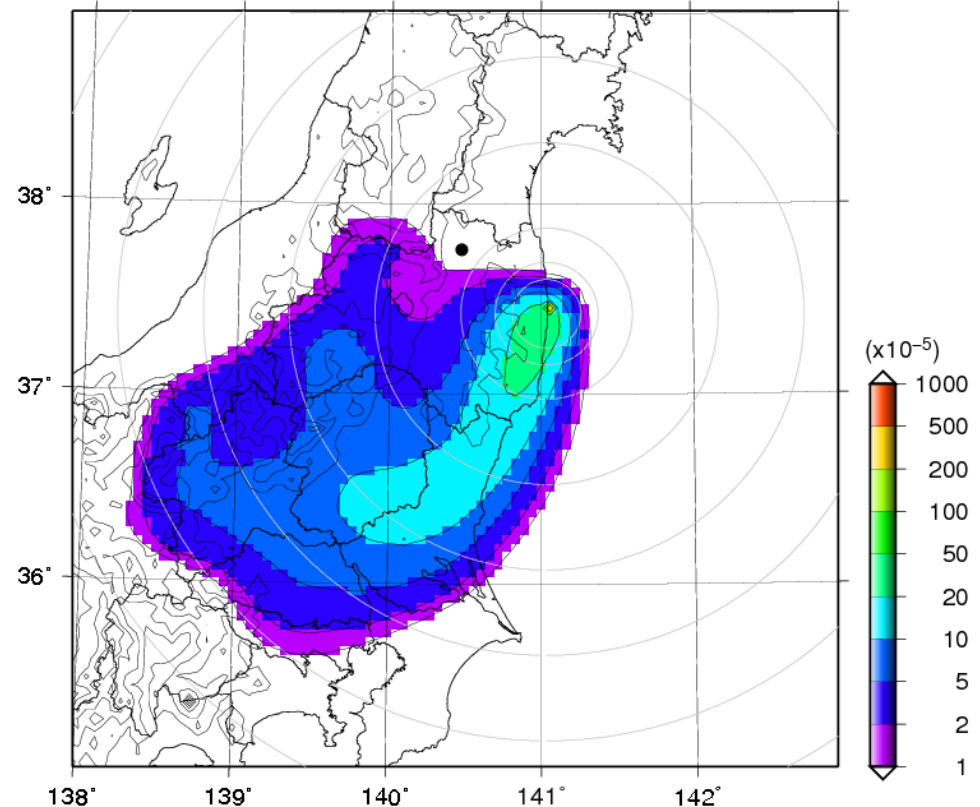
$\Delta x = 1.5\text{km}$

ACCUMULATED SURFACE TRACER MIXING RATIO



$\Delta x = 5\text{km}$

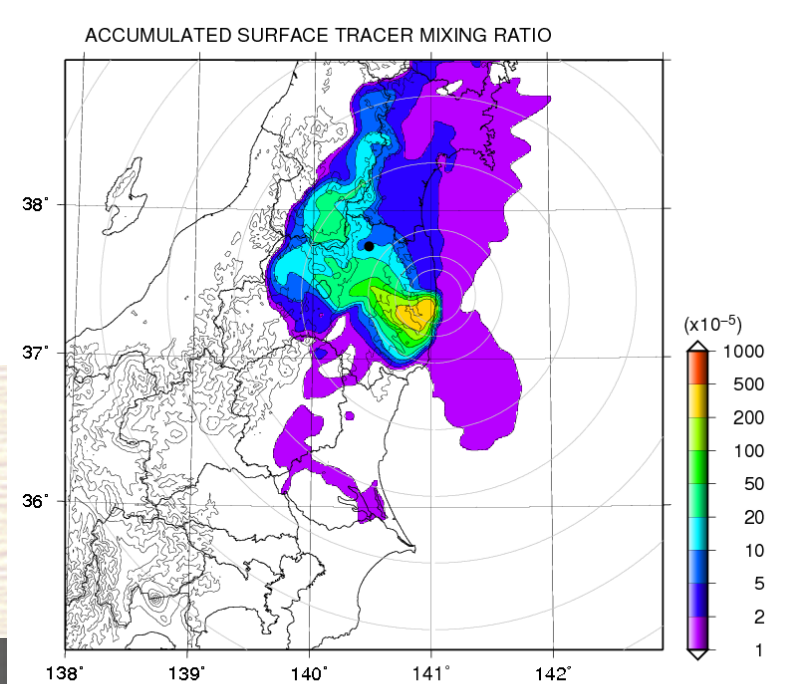
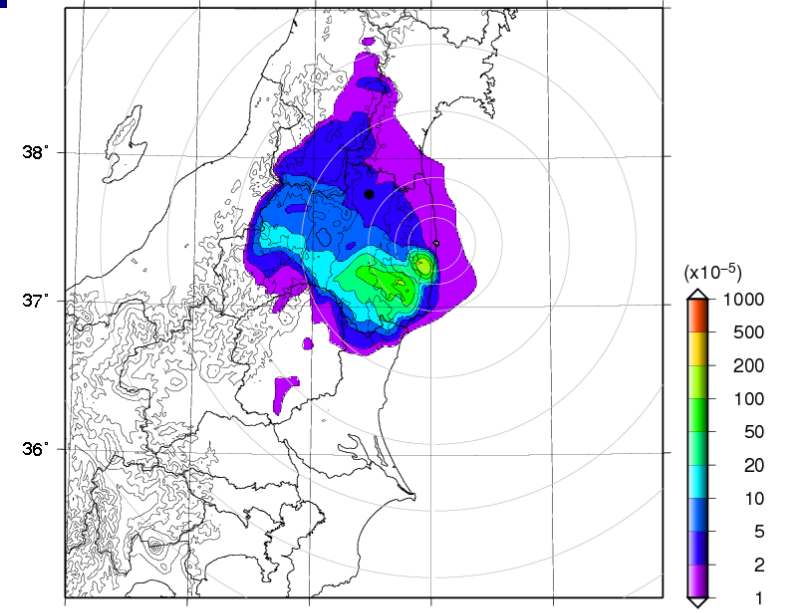
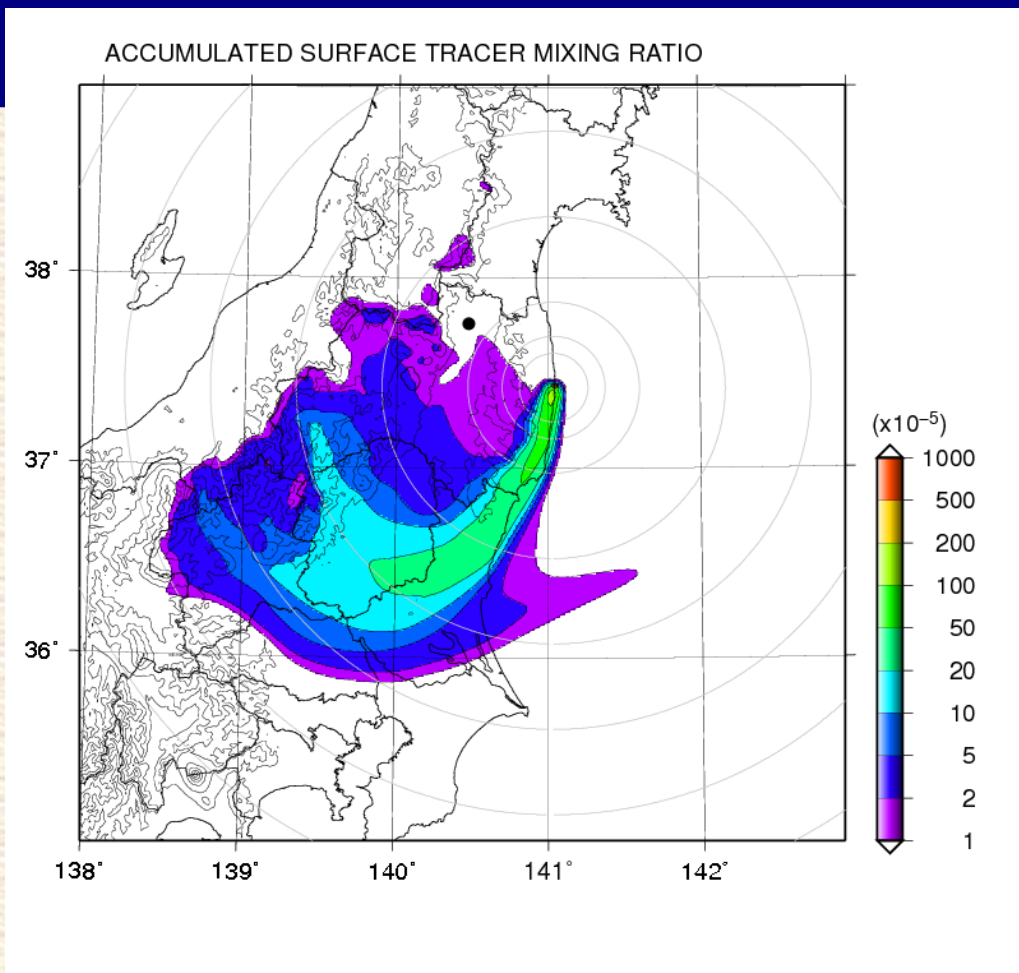
ACCUMULATED SURFACE TRACER MIXING RATIO



※ 3月15日6時を初期値とした結果

加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

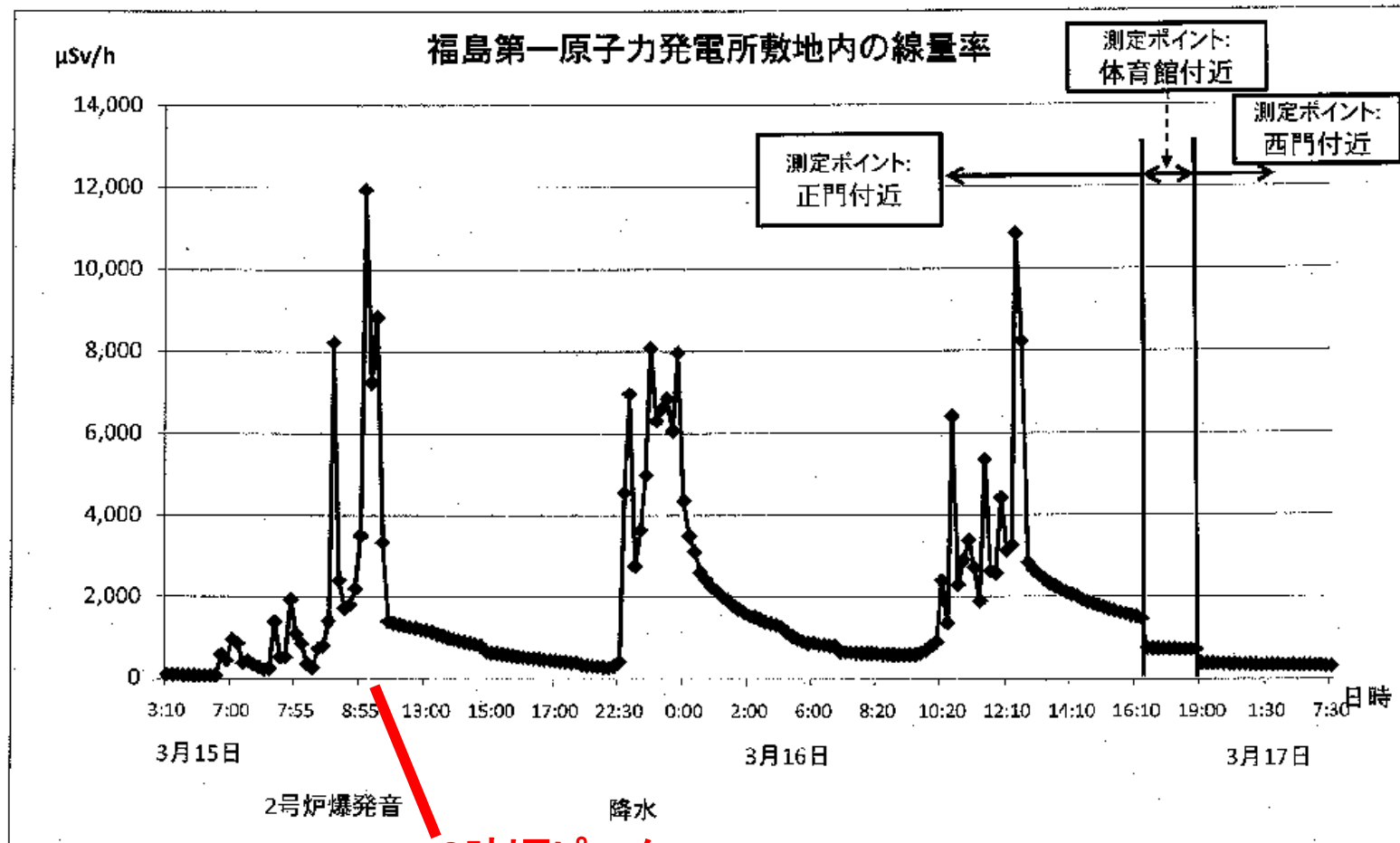
放出時刻が異なる場合の地表における積算量



左: 3月15日6時に瞬間的に放出した場合
右上: 3月15日9時に瞬間的に放出した場合
右下: 3月15日12時に瞬間的に放出した場合

加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

福島第一原子力発電所敷地内の線量率(観測値)



(経済産業省 Web サイトより入手)

SPEEDI の結果との比較

外部被ばくによる実効線量

日時 = 2011/03/15 09:00 - 2011/03/16 09:00 の積算値

気象データ = GPV+観測値 (2011/03/16 06:00) まで

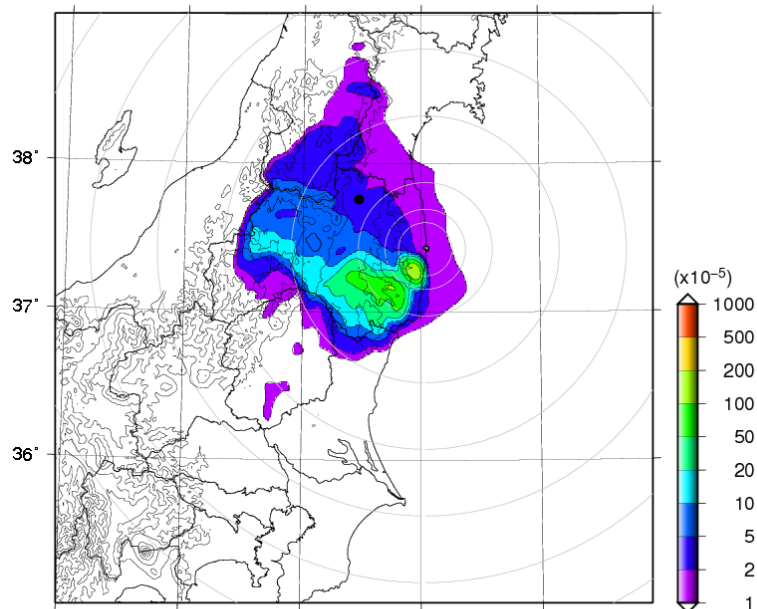
福島第1 2号炉 広域図

核種名 = 全核種

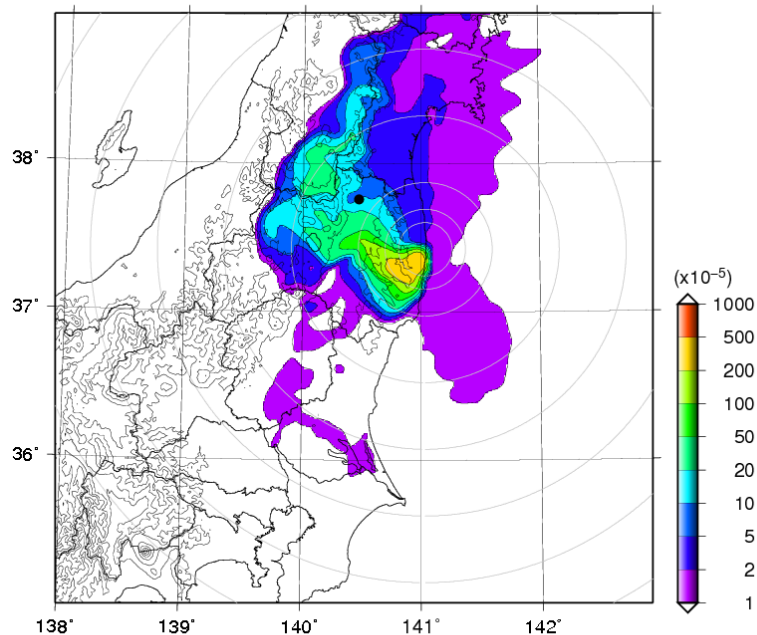
対象年齢 = 成人



ACCUMULATED SURFACE TRACER MIXING RATIO



ACCUMULATED SURFACE TRACER MIXING RATIO

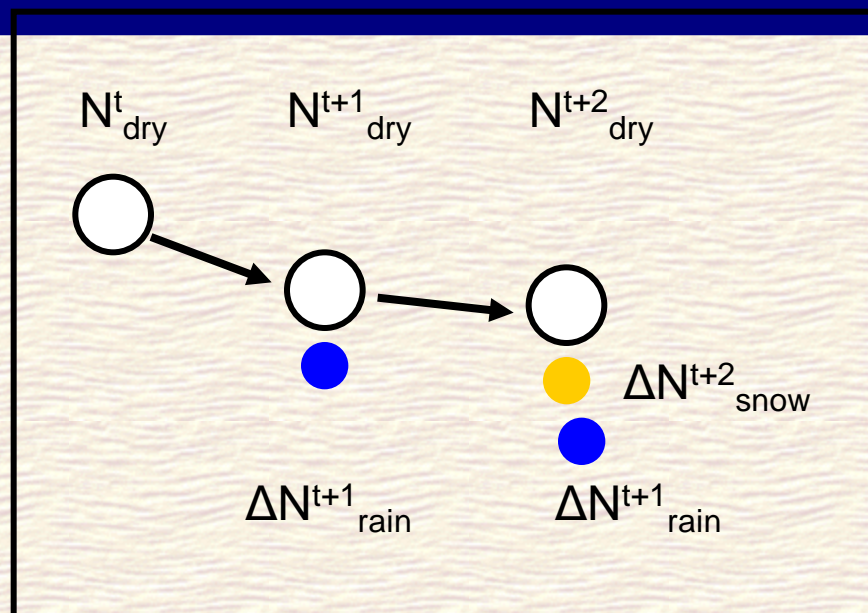


加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

簡易的に湿性沈着を考慮したトラジェクトリー解析

$$\Delta N_x = \pi \overline{r_x^2} \overline{v_x} N_x N_{dry} E$$

N_x 降水物質の数濃度
 r_x 降水物質の半径
 v_x 降水物質の落下速度
 N_{dry} 粒子数
 E 衝突割合



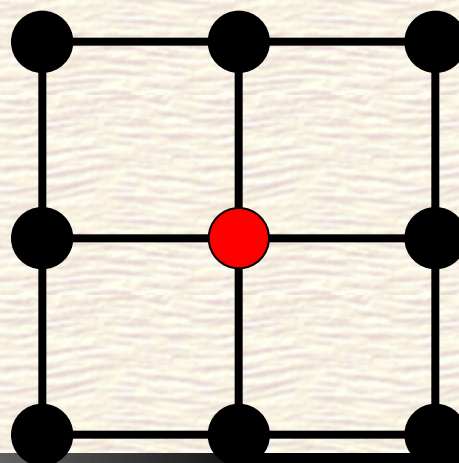
設定:

福島第一原発を中心に東西・南北
1.5km 毎に全9点、高度方向に 100m
から 1000m まで 100m 毎に全10点の
合計90点それぞれに粒子を10000個
与える

入力変数: $u, v, w, P, \theta, q_r, q_s, q_g, N_{cs}, N_{cg}$

入力時間間隔: 10分

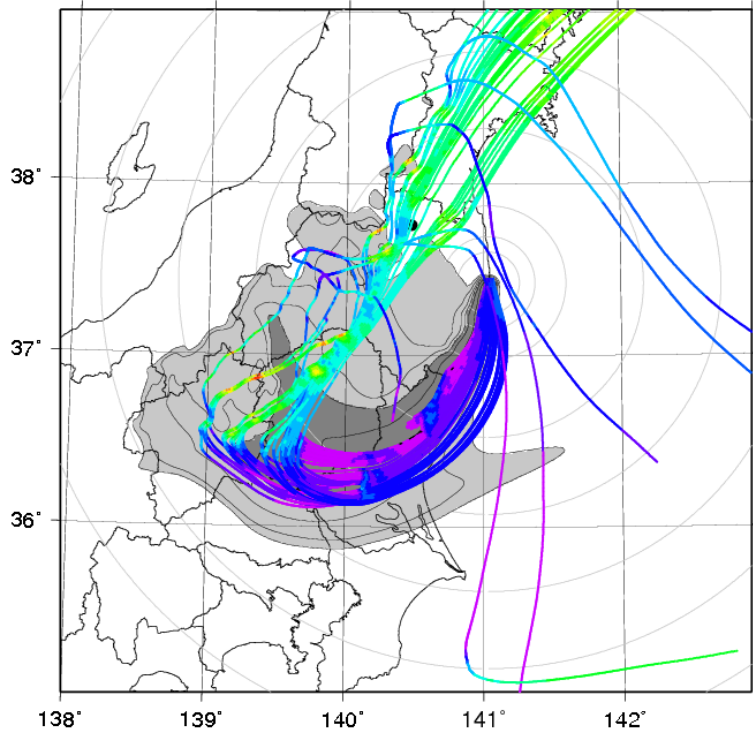
加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012



2011年3月15日6時を初期値とした計算結果 (CReSS) トラジェクトリー解析の結果

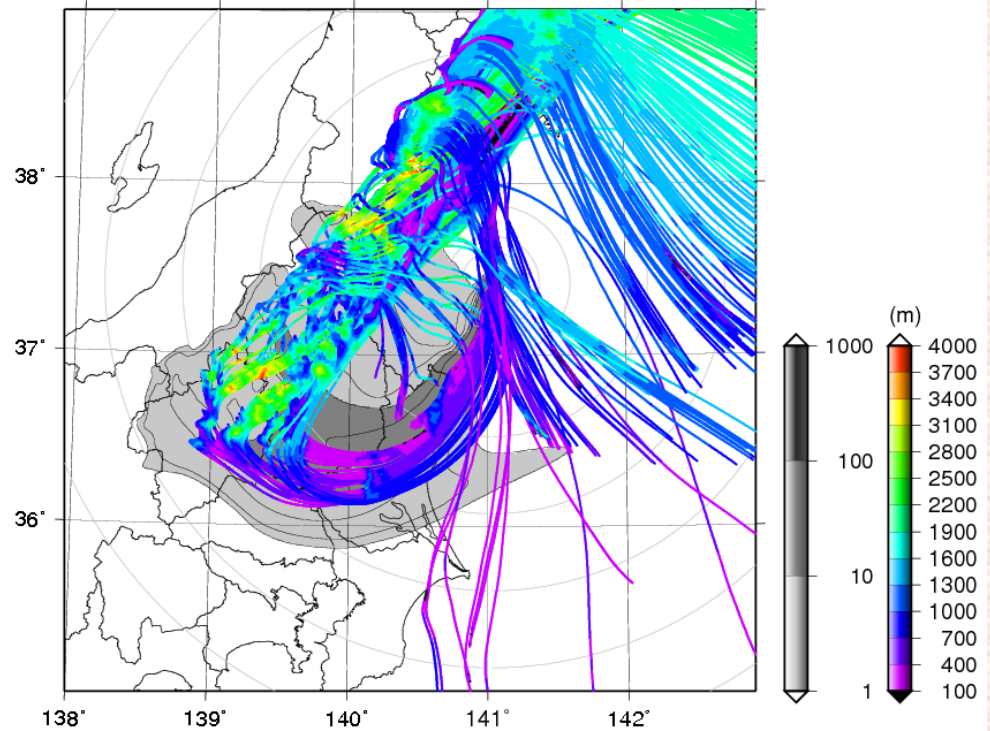
湿性沈着考慮なし

ACCUMULATED SURFACE TRACER MIXING RATIO
TRAJECTORY (NO DEPOSITION)



湿性沈着考慮あり

ACCUMULATED SURFACE TRACER MIXING RATIO
TRAJECTORY (INCLUDING RAIN/SNOW/GRAUPEL DEPOSITION)

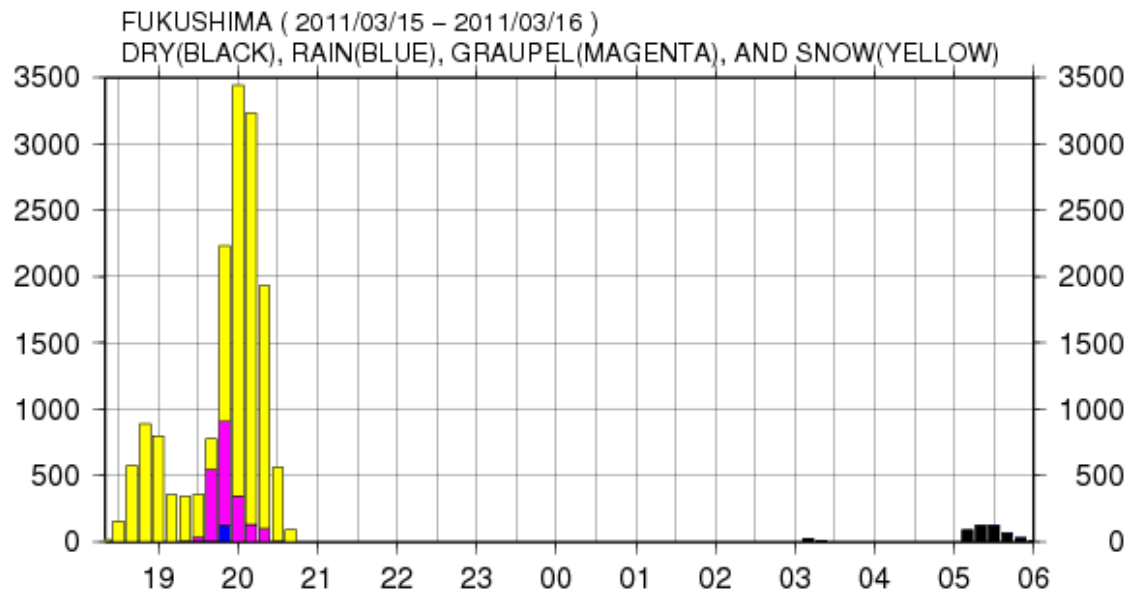


※ 3月15日6時を初期値とした結果

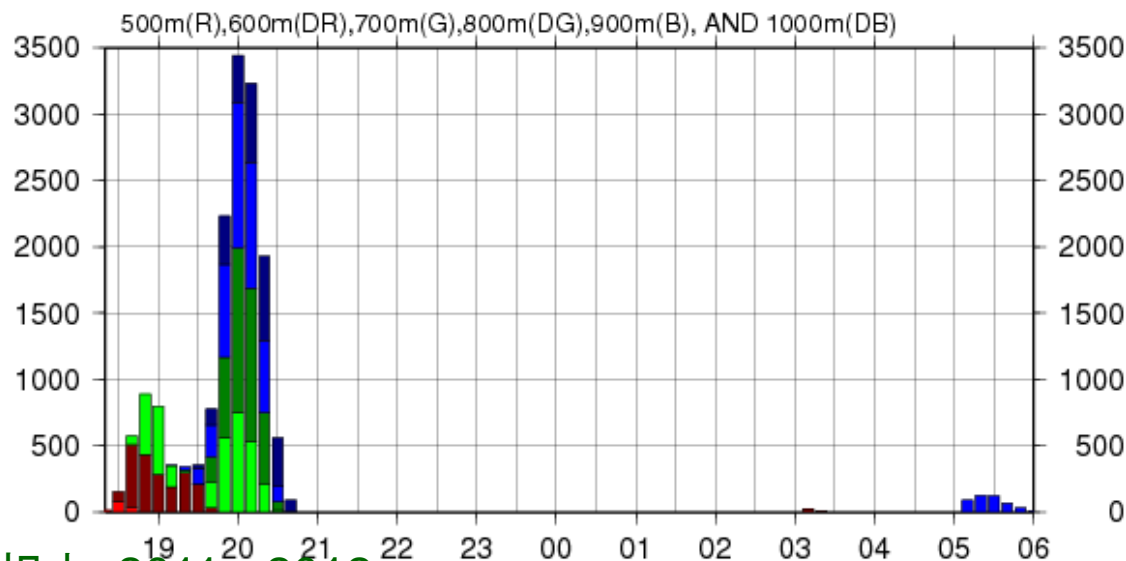
加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

福島市上空に落下した粒子の内訳

降水物質別
頻度分布



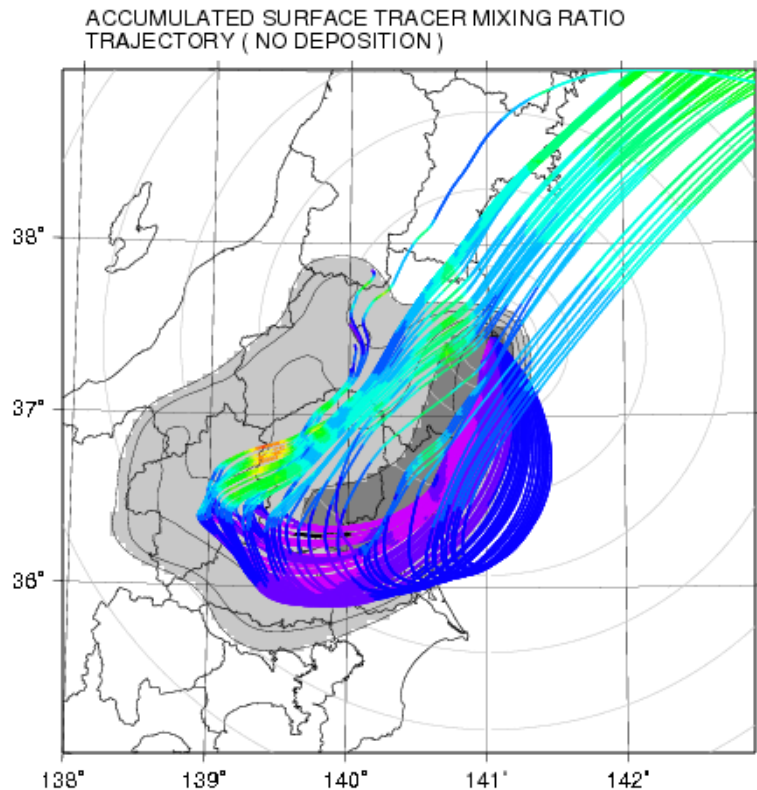
初期高度別
頻度分布



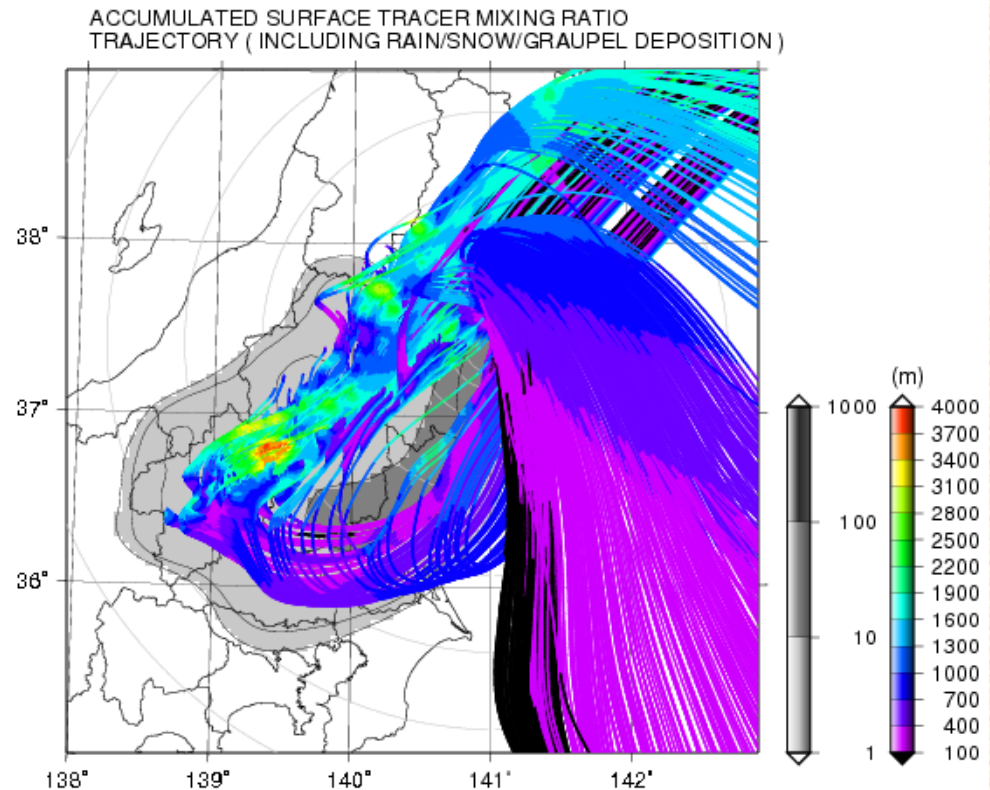
加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

2011年3月15日6時を初期値とした計算結果 (CReSS) トラジェクトリー解析の結果 (水平解像度5km)

湿性沈着考慮なし



湿性沈着考慮あり

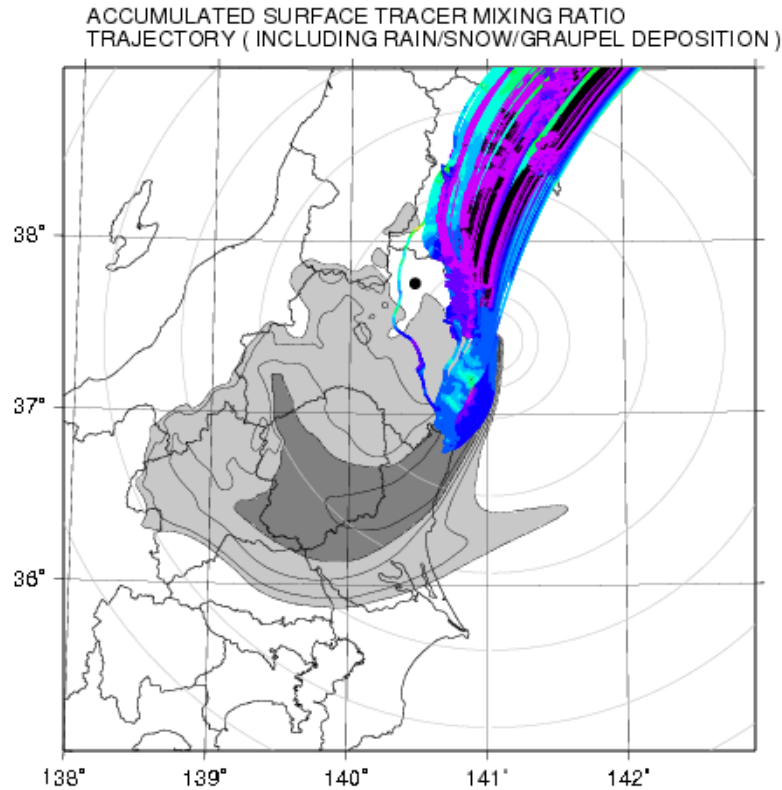


※ 3月15日6時を初期値とした結果

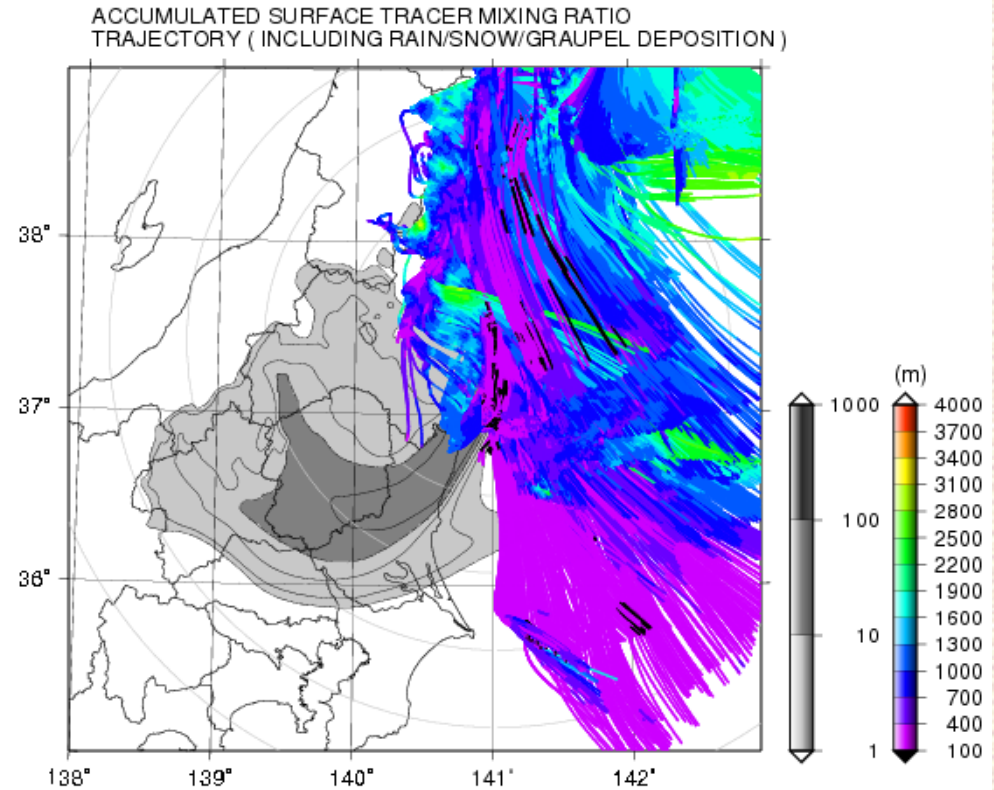
加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

2011年3月15日9時を初期値とした計算結果 (CReSS) 地表補足率を考慮した結果

沈着あり、地表補足率 100%



沈着あり、地表補足率 10%



※ 3月15日9時を初期値とした結果

加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

オフラインのトラジェクトリー計算において、入力するモデル出力の適切な時間間隔を調べたい。そこで、今回は水平解像度 5km の結果を用い、福島第一原発上空の10点 (100m~1000mまで100m毎) の距離誤差を調べた。ここで**真値はモデルタイムステップ 10秒でトラジェクトリー計算を行ったもの**とする。

モデルの出力間隔は基本的に1時間の約数となるように、以下とした。

10, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 180, 240, 300, 360,
600, 720, 900, 1200, 1800, 3600 (秒)

一般的にトラジェクトリーの計算は短いタイムステップを刻み、前後の時刻のデータより内挿して計算を行う。その内挿方法は

1. 出力間隔と同じ(短いタイムステップを設けない)
2. 10秒
3. 60秒 (ただし 120秒以上)

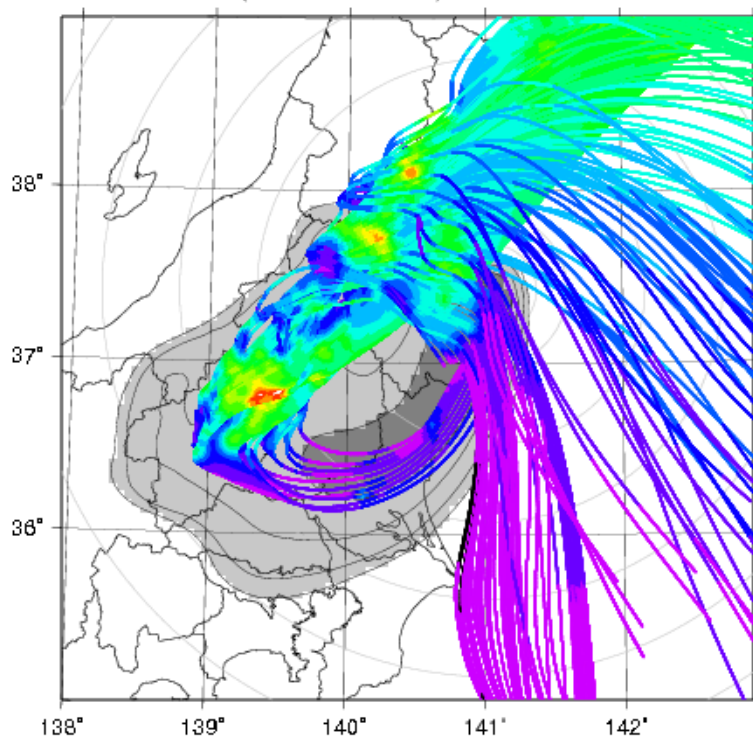
とした。以上、真値も含めて45通りのトラジェクトリー計算を行い、その距離誤差を調べた。

トラジェクトリー計算における出力間隔依存性

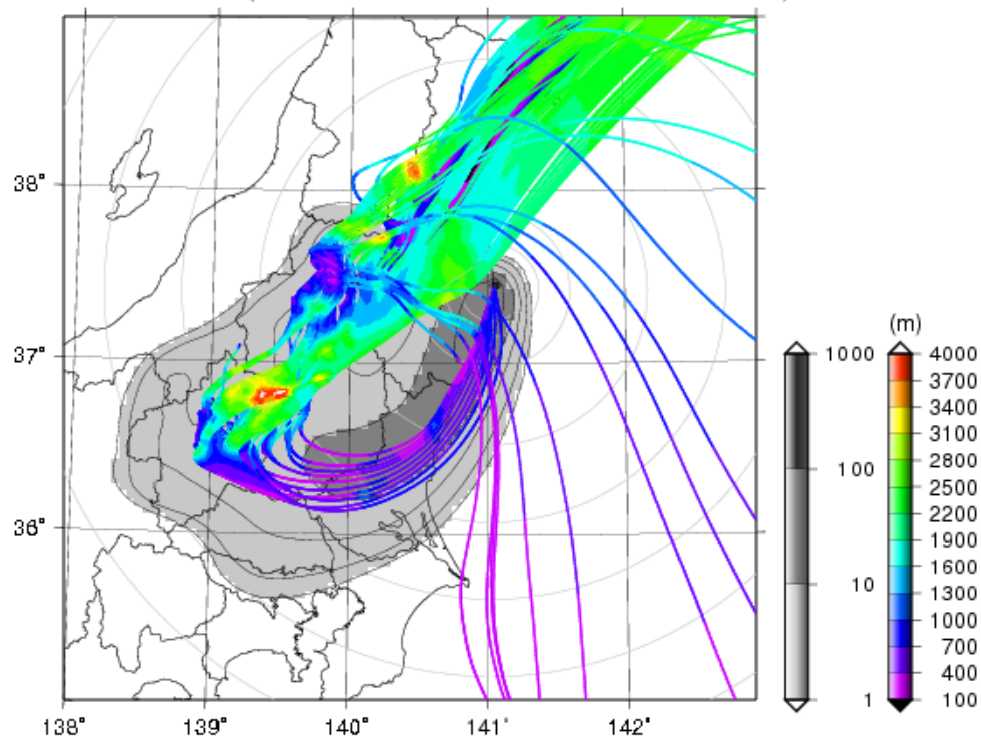
出力間隔10秒
計算間隔10秒

出力間隔60秒
計算間隔60秒

ACCUMULATED SURFACE TRACER MIXING RATIO
TRAJECTORY (NO DEPOSITION)



ACCUMULATED SURFACE TRACER MIXING RATIO
TRAJECTORY (INCLUDING RAIN/SNOW/GRAUPEL DEPOSITION)



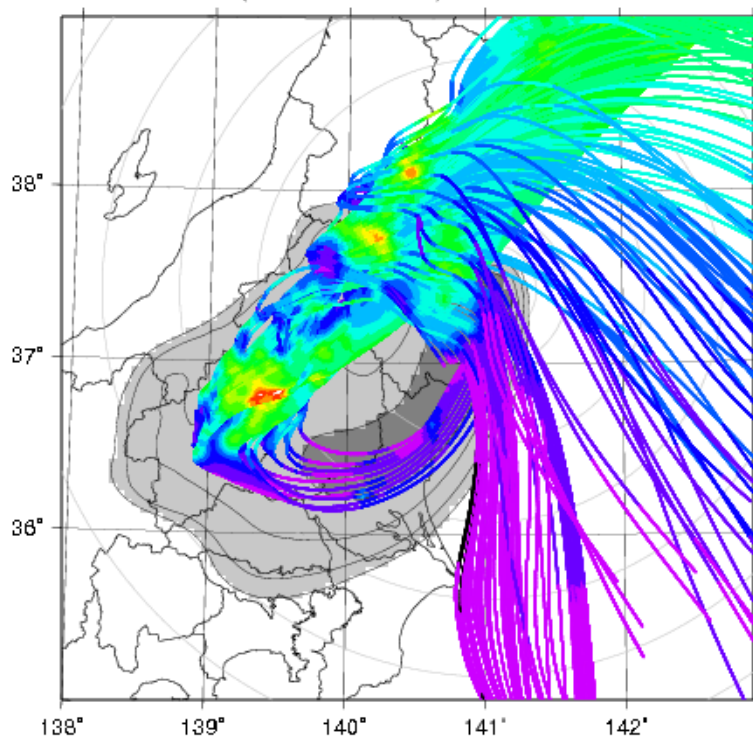
加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

トラジェクトリー計算における出力間隔依存性

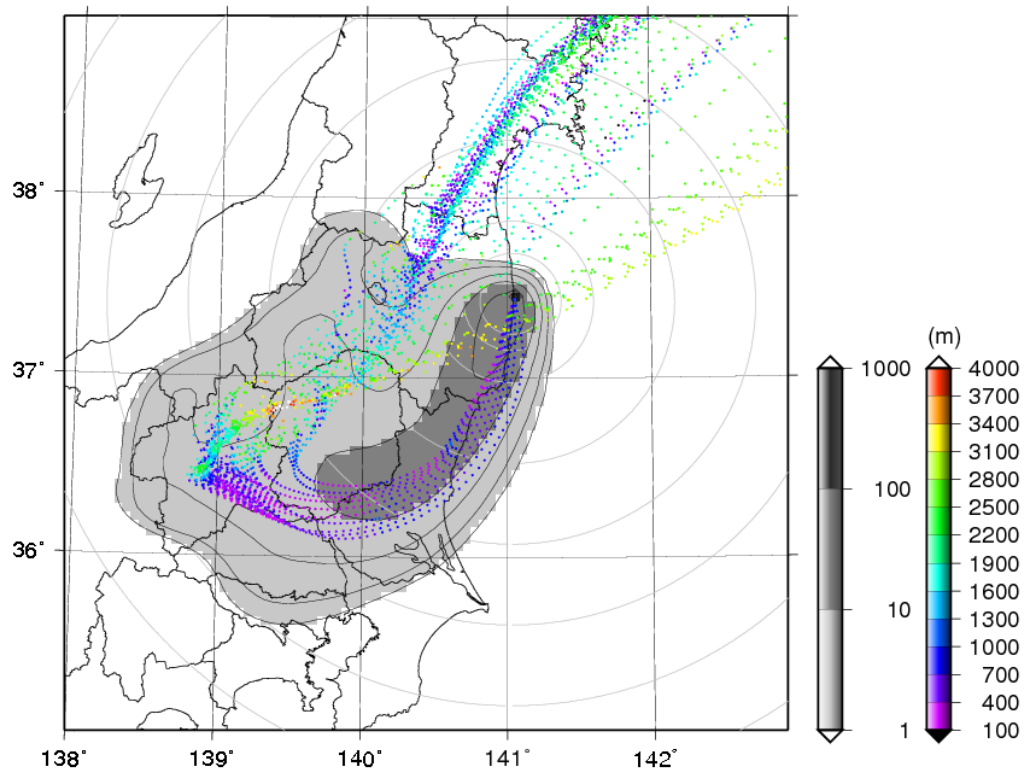
出力間隔10秒
計算間隔10秒

出力間隔600秒
計算間隔600秒

ACCUMULATED SURFACE TRACER MIXING RATIO
TRAJECTORY (NO DEPOSITION)



ACCUMULATED SURFACE TRACER MIXING RATIO
TRAJECTORY (INCLUDING RAIN/SNOW/GRAUPEL DEPOSITION)



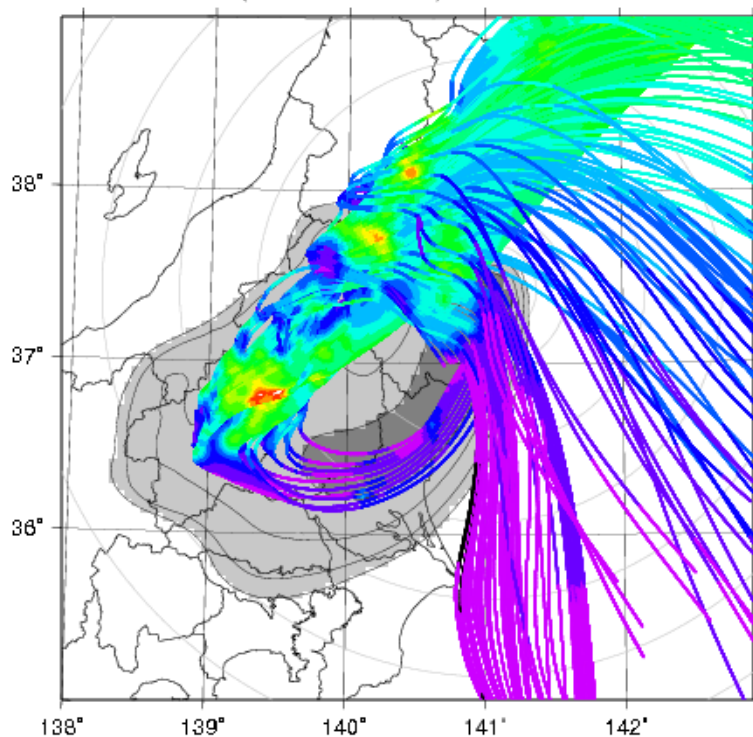
加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

トラジェクトリー計算における出力間隔依存性

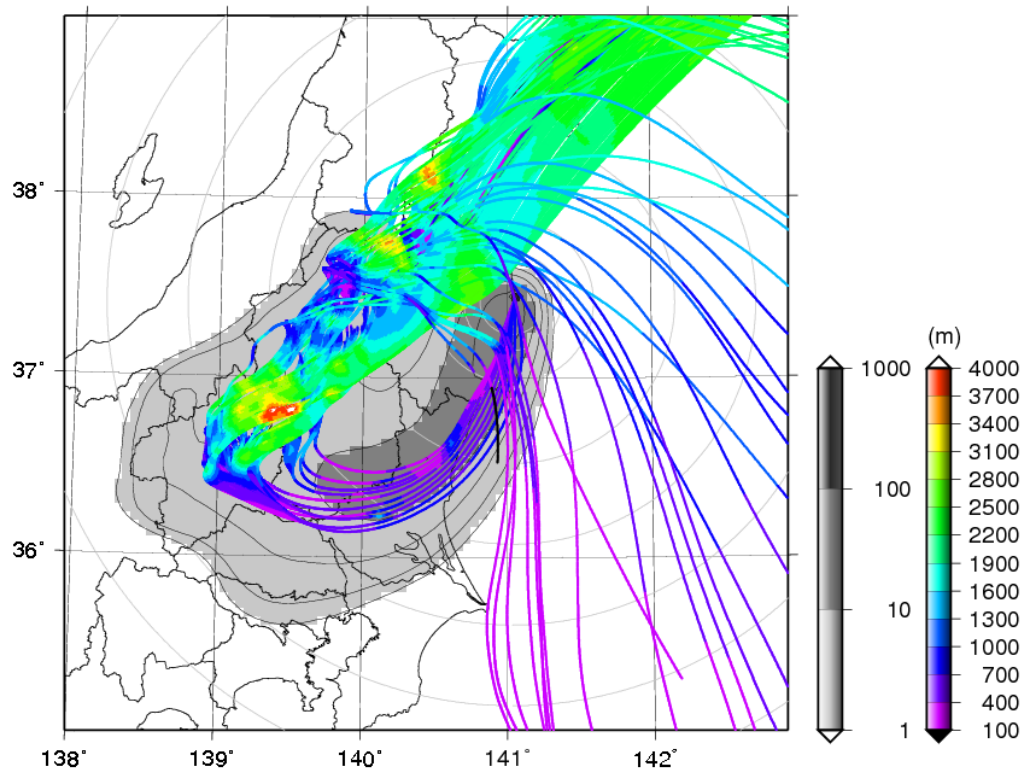
出力間隔10秒
計算間隔10秒

出力間隔600秒
計算間隔60秒

ACCUMULATED SURFACE TRACER MIXING RATIO
TRAJECTORY (NO DEPOSITION)



ACCUMULATED SURFACE TRACER MIXING RATIO
TRAJECTORY (INCLUDING RAIN/SNOW/GRAUPEL DEPOSITION)



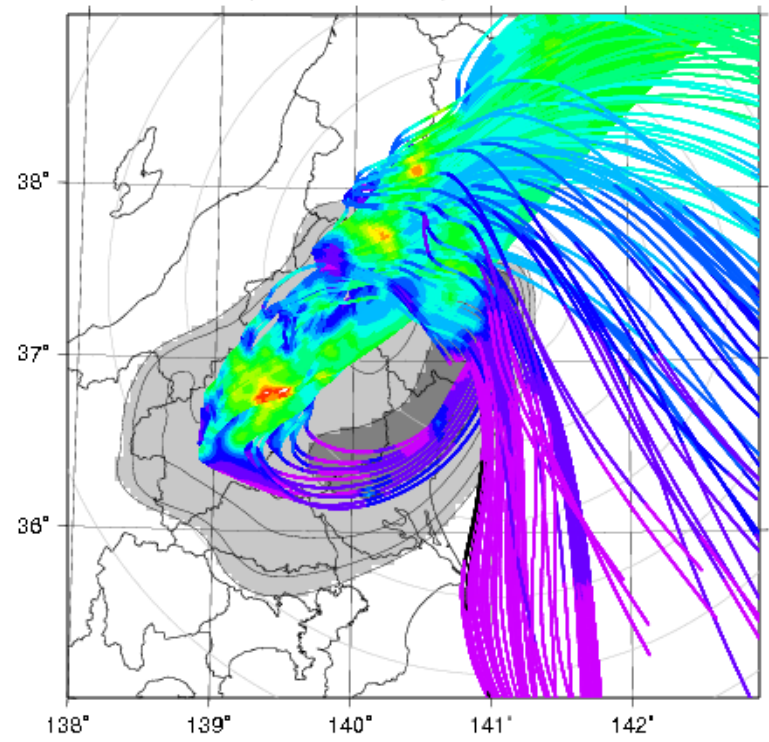
加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

トラジェクトリー計算における出力間隔依存性

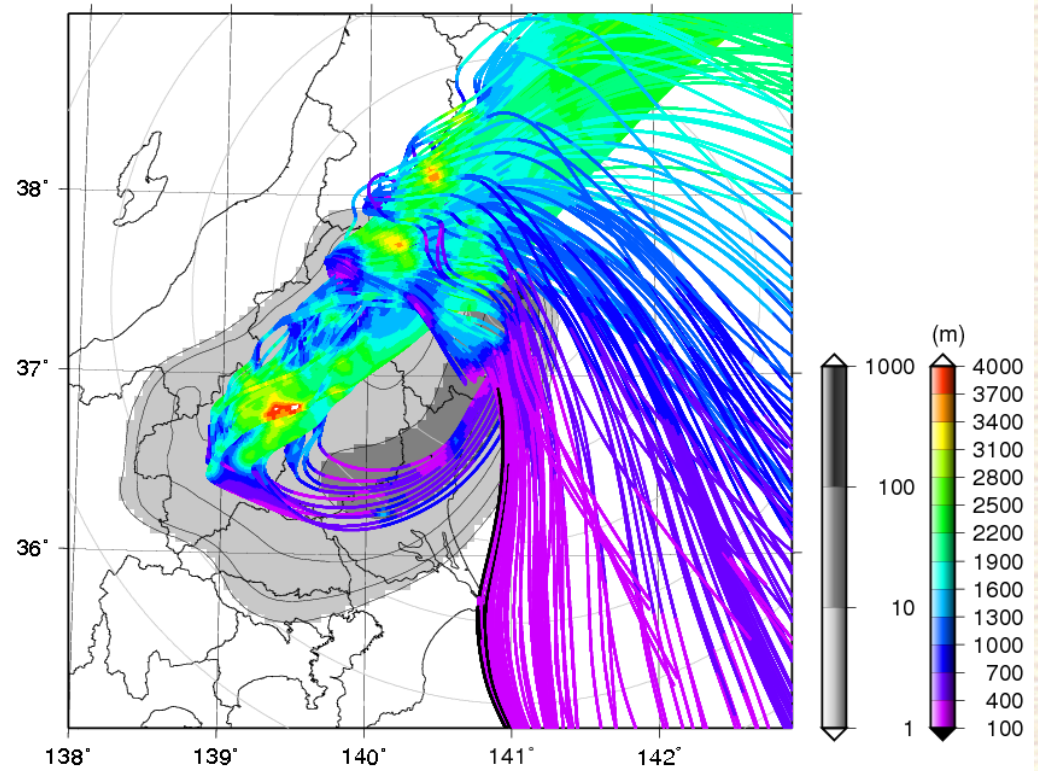
出力間隔10秒
計算間隔10秒

出力間隔600秒
計算間隔10秒

ACCUMULATED SURFACE TRACER MIXING RATIO
TRAJECTORY (NO DEPOSITION)



ACCUMULATED SURFACE TRACER MIXING RATIO
TRAJECTORY (INCLUDING RAIN/SNOW/GRAUPEL DEPOSITION)



加藤・篠田・坪木・相木, 2011, 2012

名大グループ(CReSS)まとめ

2011年3月11日に発生した東日本大震災に伴い、福島第一原子力発電所が深刻な被害を受けたことを受けて、CReSSを用いた移流・拡散シミュレーションを行った。

- 日々のシミュレーション実験より、移流・拡散が比較的精度よく再現
- 2号炉爆発時は風向の時間変動が激しかったため、移流・拡散の初期値依存がかなり大きい
- 高解像度化に伴い、局所的な分布が再現
- 2号炉爆発時を想定したハインドキャスト結果で、福島市での放射線量の急激な上昇は湿性沈着によるものであることが示唆
- オフラインのトラジェクトリー解析により湿性沈着過程の考慮がある程度出来た
- トラジェクトリー解析を最適に行うための誤差評価が出来た

加藤雅也・篠田太郎・坪木和久・相木秀則, 2011:
CReSSを用いた移流拡散シミュレーション.

2011年気象学会秋季大会講演予稿集 A210, p.78

SPEEDI評価：正反対

- **国会事故調査委員会調査報告書(2012年7月5日)**

SPEEDIを初動の避難指示に活用することは困難

- **政府事故調査・検証委員会の最終報告書(2012年7月23日)**

2011年3月15日に2号機から放射性物質が大量放出し、北西方向の福島県飯舘村方面に広がった件について、SPEEDIの予測結果が出たのと同時に公表されていれば、住民は北西方向に逃げずに済んだ

天気予報vs放射性物質拡散予測

■ シミュレーションモデルの開発は？

- SPEEDIが用いる境界層乱流拡散の技術は気象学の技術であり天気予報モデルと変わらない
(同じレベルにあると想像する)
- 放射性汚染物質の輸送に特化したモデルのソフトウェアとしてはもっとも精力的に開発されたモデルである
- 難を言えば
 - ◆ SPEEDIは、研究コミュニティに対して、直接関与する人たち以外を除いては、公開されているわけではない
(たぶん)
 - ◆ 気象庁の天気予報モデルは研究コミュニティに公開されており(共同研究が可能であり)様々な立場から実験が可能
- 先に見たように同種モデルである程度の検証は可能
→当然(?)そこそこもっともらしい計算結果

天気予報vs放射性物質拡散予測

■ しかし、観測による検証は？

- 天気予報：膨大な観測網による不断の検証
- SPEEDI：
観測網がない時代の台風予測のようなもの
放射線量計測によってはじめて確認

日常的に境界層の諸観測と付き合わせていなければならないはずだ

大気境界層内部の流れの構造・乱流構造は古くて新しい今日的な問題（計算機の進歩と観測の進歩が状況を大きく変えつつある）なので、学会研究レベルでの議論が不可欠

天気予報vs放射性物質拡散予測

- 人々に予報を伝える手順、特に、重大事象においての手順
 - 天気予報：気象業務法
 - ◆ 警報の one voice の担保と手順の確立
研究コミュニティの者といえども勝手に予報計算してはいけない
 - ◆ 膨大な経験(悪天は時々ある、人々も信頼している)
 - 放射性物質拡散：
 - ◆ SPEEDIの情報提供手順が確立していたようには思えない
なので恣意的な(あるいは混乱した)政治判断が入る？
 - ◆ 日本ならびに世界の気象研究コミュニティはone voice ルールに従ったので文科省・SPEEDI情報の公開にチャンネルが限られた
 - ◆ 国内では東海村臨界事故以来の経験
何がどれくらい正しいか専門が近い人たちでもわからない状況

目次

0. 此処は何処で私は誰
1. はじめに
2. 大気中の物質拡散にまつわる流体力学
煙を例にして
3. 大気中の物質拡散を計算するための
基礎知識
4. SPEEDIについて
5. 観測と予測：気象の場合と放射線の場合
6. おわりに

SPEEDIによる予測は結局どうなのか？

- 人々が言うほど信頼できないわけじゃない
 - 計算はそこそこうまくいった
 - 大気境界層が安定かつ風の流れも比較的緩やかで予測しやすかった
 - ◆ 夏場だとだいぶ違うかも
- 人々が言うほど信頼していいものでもない
 - 低気圧通過時のうず運動(360度どちらでも移流しうる)
物質の移流位置と雨の降るタイミングでどこでも汚染されうる
次々と爆発が起こっている時にある方向が安全ということはいえない(次の爆発時刻と風向きによっては...)
 - 気象学的予測のカオスの性質について物理学の専門家でもよくわかっていない人が多かった
 - 普通の天気予報と同じで、観測で常にチェックしてなければならぬし、予測精度に関しての専門家の助言がなければダメ(開発・技術チームと分離されているとすれば、これはなめ過ぎ！)

SPEEDIによる予測は結局どうなのか？

SPEEDIはどう使っても避難当事者には役に立たなかったらう

- SPEEDIだけでは不確実な情報に過ぎない
 - ◆ 観測(放射能モニタリング)と結合して初めて意味がある
 - ◆ 専門家の判断とセットでなければ提供しても意味がない
- 3/15の予測はまず困難→同心円状に遠くに逃げるのが正解
 - ◆ 風が巻いていて時々刻々方向が変わる
 - ◆ 実際放射性物質はぐるっと回って福島へ
 - ◆ 降水タイミングによっては如何ようんでも
 - ◆ 方向が問題なのではなくて避難勧告距離が全然短いのが問題
- 原発震災(ありえない事象である大規模複合災害)での当局の対応が訓練がなされていないので提供しえない
- 同様に防災訓練されていない(適当に訓練された消防団員等が期待できない)、10万、100万、1000万の単位の人々に、不確実な情報が提供されたら？

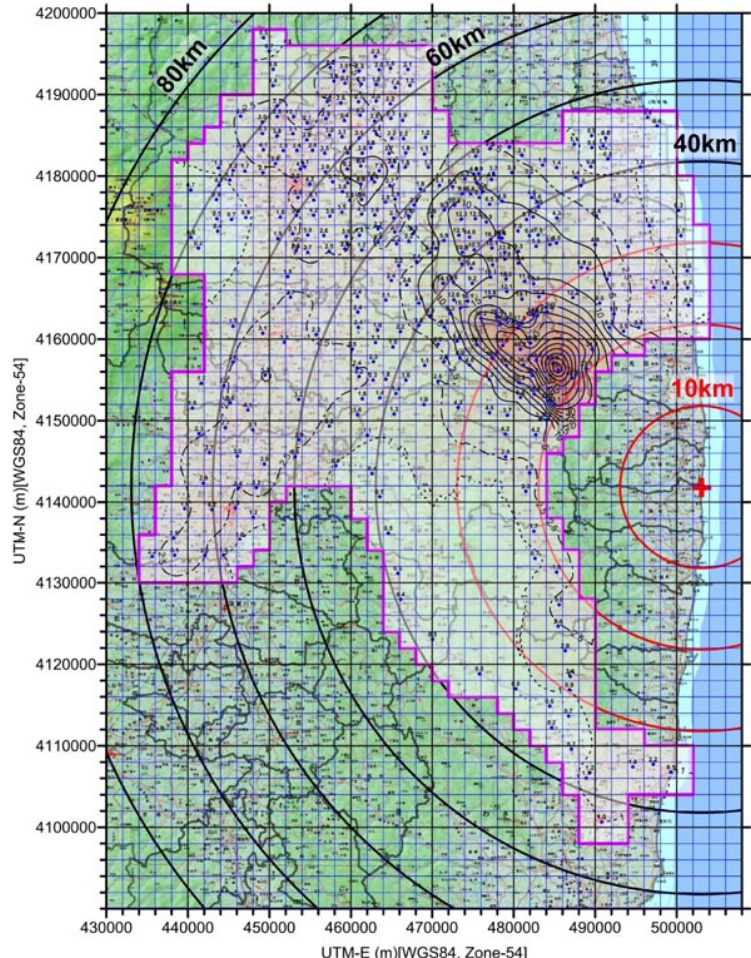
SPEEDI情報のリアルタイムでの公開は周囲の人たち(特にネット上)の気持ちを落ち着かせるには役に立ったかもしれないが、より広域(東京を含む3000万人の世界)での避難活動を誘発したかもしれない



内部被ばく臓器等価線量
 日時 = 2011/03/12 06:00 -
 2011/03/24 00:00 の積算値

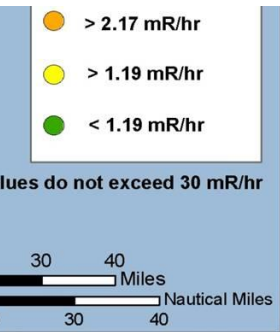
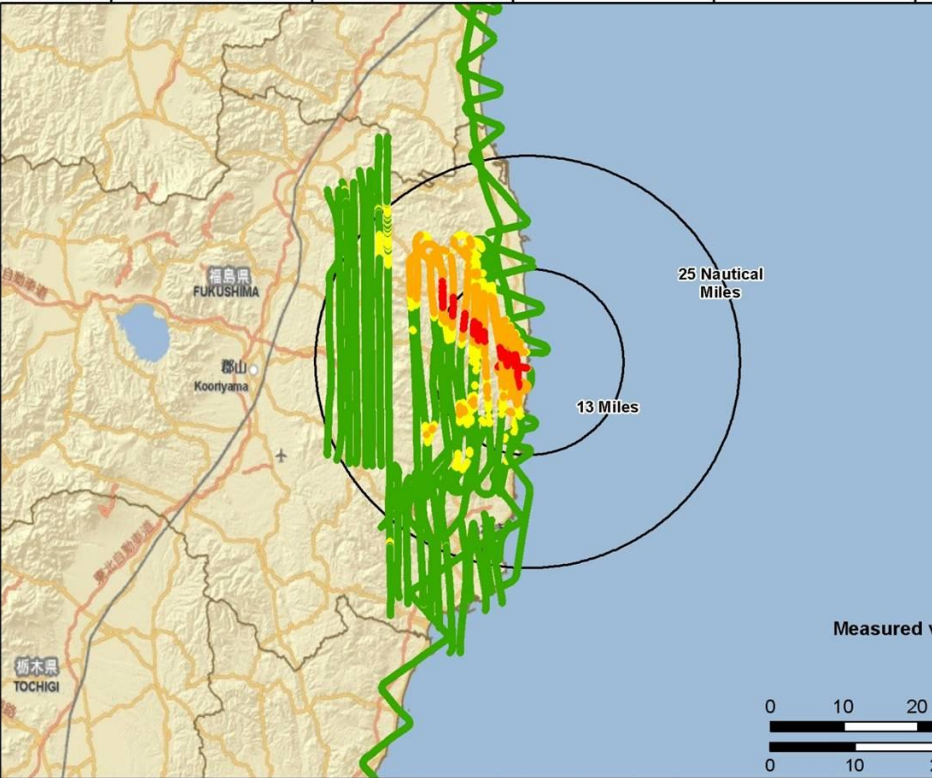
領域 : 92km X 92km
 核種名 = ヨウ素合計
 対象年齢 = 1歳児
 臓器名 = 甲状腺

【凡例】
 線量等値線 (mSv)
 1= 10000
 2= 5000
 3= 1000
 4= 500
 5= 100



NNSA
 National Nuclear Security Administration

Aerial Monitoring Results - C-12
 Survey Date - 17, 18, 19 March 2011



Measured values do not exceed 30 mR/hr

Map created on 03232011 0210 JST

Nuclear Incident Team DOE NIT

Name: NIT_C-12 23Mar2011 v4

SPEED
 (原子力)



おわりに

- 起こってはならないと想定している事象への対応は不可能
 - 極めて深刻な事態であることは知っている人は知っていた
 - ◆ チェルノブイリの経験をもつ欧州各国は直ちに日本からの退去を自国民に勧告した
20kmがどうの方向がどうの場合ではなかった
 - ◆ 問題をSPEEDIのデータ公開の有無に矮小化するのは本末転倒
 - 「原発推進者」には、重大事象が起こっていないことにしよう(あるいは、起こっているとは認めたくない)という誘惑が働かなかっただろうか？
 - 秩序維持のため、あるいは、単に人々に不安を与えまいとして、大規模な混乱をもたらすような悲観的な予測を出したくない当局者？
 - 悲観的な予測を聞きたくない一般の人々？

おわりに

- **不確実な予測の公開**に対する責任あるいは覚悟（は困難）
 - 最悪の事態を想定する文化がない（想定しない文化がある）
 - ◆ 最悪の事態の設定が不十分（原発が作れるように設定していることは明らか）
 - ◆ 国民の覚悟が不十分
 - ◆ 制度設計が不十分
 - ◆ マスコミに対する教育が不十分（最悪の事態を想定していないと批判しないマスコミ）
 - 制度がない状況下の情報提供は、個人の責任でなさねばならないが、情報は不確実なので、腹括れない。
 - ◆ 不確実であることを知る者ほど情報提供には慎重になる
 - ◆ 悲観的な予測は出にくく楽観的な予測が出やすい
 - ◆ 楽観的な予測には皆がすぎる傾向がありすぐに広まる（私も）
 - ◆ 結果、人々には何が本当かわからない

おわりに

- 気象学の立場から原発事故と今後の原子力発電に対して
 - 徹底したデータ収集と数値シミュレーションとの結合による事象の再構成と理解
 - ◆ 各官署・自治体・企業体が持っている様々なデータをほりおこす
 - ◆ たとえば通常の大気汚染サンプル資料はとても重要(ちゃんと集まってるのかな?)
 - 各地の原発に対して、最悪の事態を想定した、様々な気象条件でのSPEEDIの実行による、最悪の汚染予測を行っておくこと
 - ◆ その場の避難には(かなり制度設計しないと)使いにくい
が、事象の統計的な予測にはかなり使えるんじゃないか

おわりのおわり(1/2)

Freeman Dyson, 1997: Imagined Worlds (Jerusalem-Harvard Lectures) Harvard University Press

フリーマン・ダイソン(林一・林大 訳)「科学の未来を語る」みすず書房1998 第一章「物語」

- 第2次大戦後、原子力イデオロギーの隆盛←広島・長崎
- イデオロギーに押し進められる技術の特徴は、失敗が許されない点にある。
 - イデオロギーによれば原子力は勝たなければならなかった。
 - 推進者たちは、原子力は安全にしてクリーンかつ安上がりで人類にとって恵みだと信じていた。
 - その反対だという証拠が上がってくると、推進者たちは証拠を無視する方法を見つけ、原子力が負けることのないようなルールを書いた。
 - ◆ コスト計算のルールは、原子力の発電コストにこの技術の開発と燃料の製造に投資された巨額の公的資金が含まれないように書かれた。
 - ◆ 原子炉の安全性の規則は、もともと潜水艦の推進力として米国海軍が開発した型の軽水炉が定義上、安全であるように書かれた。
 - ◆ 環境をきれいに保つためのルールは書かれたものの、使用済み燃料と使い古された機械の最終的処理は度外視された。
 - そのようなルールが書かれてしまうと、原子力は推進者たちの信念を固めることになった。こうしたルールによれば、核エネルギーは本当に安上がりでクリーンで安全だった。
 - ルールを書いた人々に、世間を欺くつもりはなかった。それ以前に自分自身を欺いてしまい、自分の固い信念と矛盾する証拠を握りつづす習慣が身についてしまったのだ。

おわりのおわり(2/2)

Freeman Dyson, 1997: Imagined Worlds (Jerusalem-Harvard Lectures) Harvard University Press

フリーマン・ダイソン(林一・林大 訳)「科学の未来を語る」みすず書房1998 第一章「物語」

- 最後には原子力のイデオロギーは崩壊した。
 - 原子力がほかのエネルギー源と競争し、失敗すれば降りることが許される限り、原子力は害になることはない。
 - 原子力を使って電気を作ることは何も悪くない。しかし、ゲームのルールは公平でなければならない。原子力がほかのエネルギー源と競争し、張り合うことができなければ降りることを許さなければならない。
 - 世間の人々が専門家を信頼しないのは、専門家が自分たちは過ちを犯さないと主張するからだ。人間が過ちを犯すことを世間の人々は知っている。
 - イデオロギーに目がくらんでいる人々だけが、自分は過ちを犯さないと信じるという罠に陥るのだ。

参考資料

- 地球流体電脳倶楽部 大気中物質拡散入門執筆グループ(林 祥介, 石川裕彦, 乙部直人, 酒井敏, 塩谷雅人, 竹見哲也, 坪木和久, 山田道夫, 余田成男), 2011:
大気中の物質拡散入門, 原子力発電所からの放射性物質拡散を念頭に
<http://www.gfd-dennou.org/library/kakusan/kakusan-staff@gfd-dennou.org>
- 加藤雅也・篠田太郎・坪木和久・相木秀則, 2011:
CReSS を用いた移流拡散シミュレーション. 2011年気象学会秋季大会講演予稿集 A210, p.78
- Tsuboki, K., 2008:
High-Resolution Simulations of High-Impact Weather Systems Using the Cloud-Resolving Model on the Earth Simulator. High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean, Hamilton, Kevin; Ohfuchi, Wataru (Eds.), Springer New York, 141-156.
- Tsuboki, K. and Sakakibara, A., 2002:
Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator. High Performance Computing, Springer, H. P. Zima, K. Joe, M. Sato, Y. Seo and M Shimasaki (Eds), 243--259.
- 2011年度秋季大会スペシャルセッション「放射性物質輸送モデルの現状と課題」報告
世話人: 近藤裕昭, 里村雄彦, 竹村俊彦, 山澤弘実, 渡邊明, 2011:
天気, 59, 41-52.
http://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2012/2012_04_0239.pdf

参考資料

- 室井ちあし 2011 :
将来のスーパーコンピューティング技術の取組へのコメント～防災・減災・気象予測の立場から～「これからのスーパーコンピューティング技術の展開を考える」シンポジウム, 内閣府、文部科学省、HPCIコンソーシアム, 東京大学 武田先端知ビル5階武田ホール, 2011年6月27日
http://www.mext.go.jp/component/a_menu/science/detail/_icsFiles/fieldfile/2011/08/01/1308237_37.pdf
- 日本気象学会理事長 新野宏 2012 :
「原子力関連施設の事故発生時の放射性物質拡散への対策に関する提言」を行うに当たって.
天気, 59, 469-474.
http://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2012/2012_06_0469.pdf
- 日本気象学会, 2012:
第36期評議員会議事概要.
天気, 59, 443-468.
http://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2012/2012_06_0443.pdf

参考資料

- 文部科学省、2012.07.27:
東日本大震災からの復旧・復興に関する文部科学省の取組についての検証結果の
まとめ(第二次報告書)について
http://www.mext.go.jp/a_menu/saigaijohou/syousai/1323699.htm
(SPEEDI 関係文科省まとめ)
- 文部科学省 原子力安全課 原子力防災ネットワーク 環境防災Nネット, SPEEDI
http://www.bousai.ne.jp/vis/speedi_z/
- 日本原子力研究開発機構、2012.07.11:
WSPEEDIによる計算結果について
<http://www.jaea.go.jp/02/tei120706/index.html>

- 牧野淳一郎(東工大・地惑)さんのページ
「公開用日誌」
<http://jun.artcompsci.org/journal/journal.html>
- 田崎 晴明さん(学習院大・物理)のページ
「やっかいな放射線と向き合って暮らしていくための基礎知識」
<http://www.gakushuin.ac.jp/~881791/radbookbasic/>

- Freeman Dyson, 1997: Imagined Worlds (Jerusalem-Harvard Lectures)
Harvard University Press
フリーマン・ダイソン(林一・林大 訳)「科学の未来を語る」みすず書房1998

