

原子力災害環境影響評価 論 | — 環境中移行・評価手法 —

浅沼 順

asanuma@ied.tsukuba.ac.jp

地表面に沈着したセシウム134、137濃度

(Bq/m³、2011/7)

-文部科学省による航空機モニタリングによる-



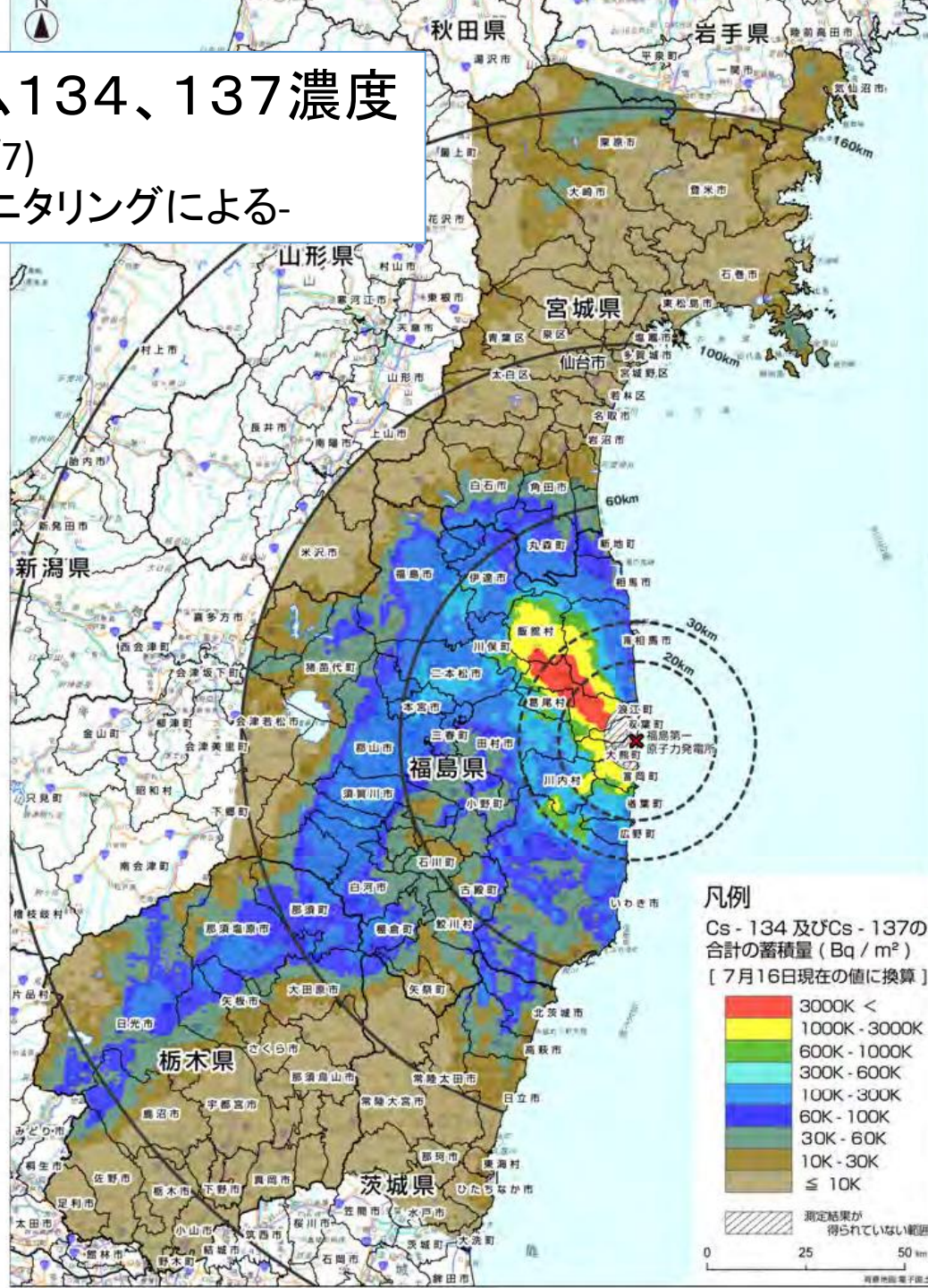
原発からの放出



大気中の輸送



地上への沈着



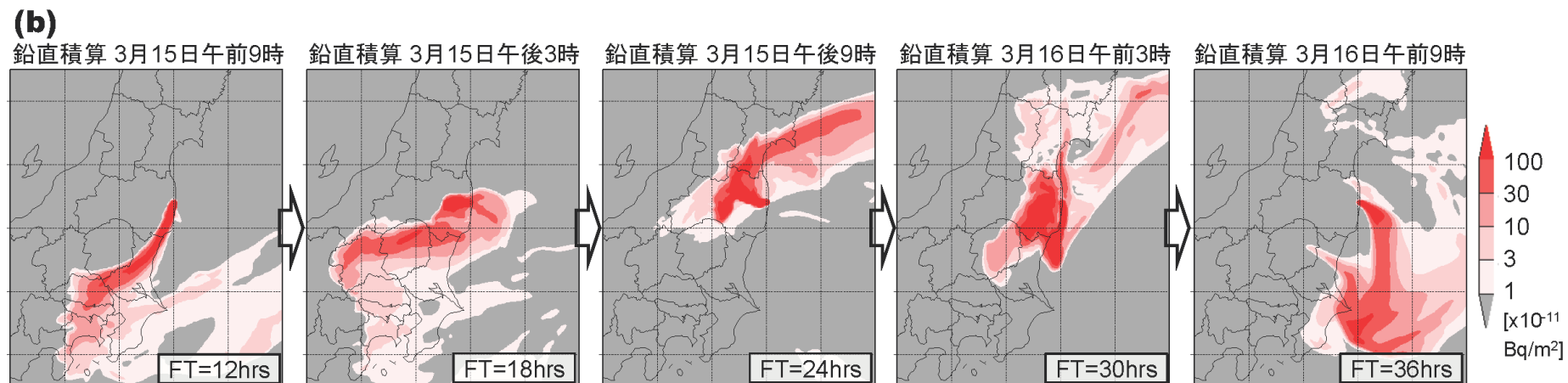
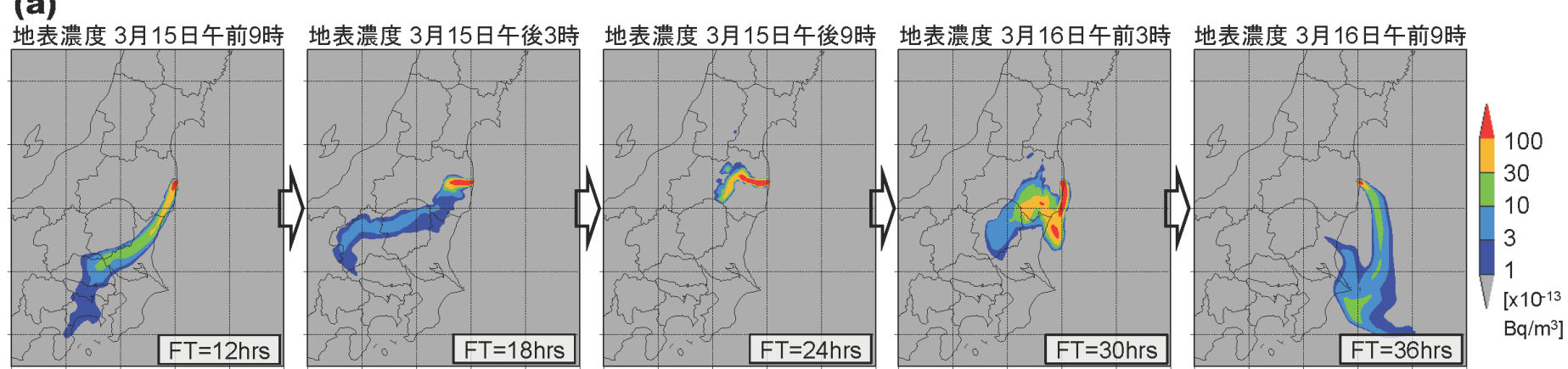
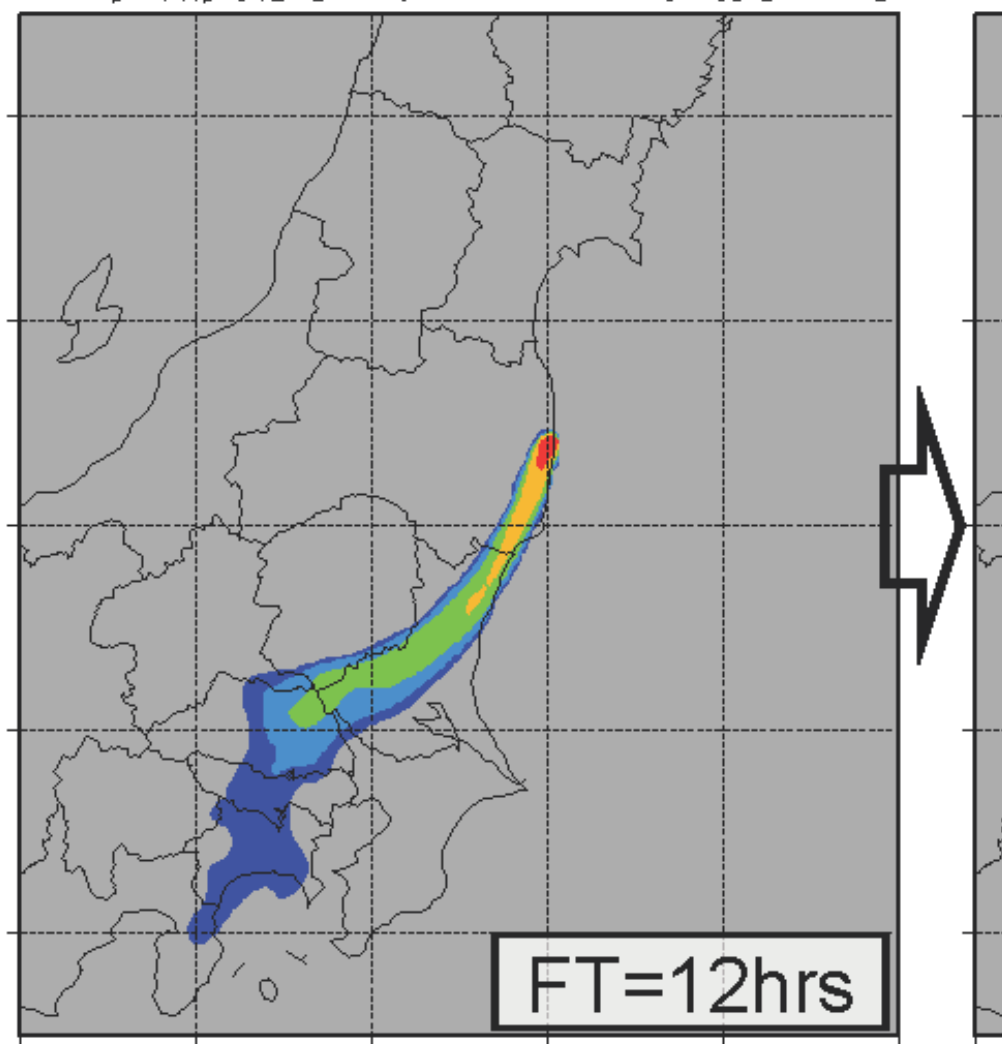


図1. 2011年3月15日午前9時から16日午前9時にかけての (a) モデル最下層における放射性物質の相対濃度, (b) 放射性物質の大気上端から地表面までの鉛直積算量相対値. どちらも3月14日午後9時を初期値としたモデル予測値である. 福島第一原子力発電所からの放射性物質放出量は常に一定値とし(1 Bq/hour), 等値線はその相対値として描画している.

(a)

地表濃度 3月15日午前9時



原発由来放射性物質の問題 ＝汚染物質の拡散問題

- 汚染物質の拡散問題： 環境問題の始まり
 - 「公害」
 - 足尾鉬毒事件(1890年ごろ)
 - イタイイタイ病(1910年ごろ)
 - 安中公害訴訟
 - 水俣病
 - 新潟水俣病
 - 四日市ぜんそく
 -

汚染物質の拡散問題(1)

- 汚染源(ソース)の形態: 2種類

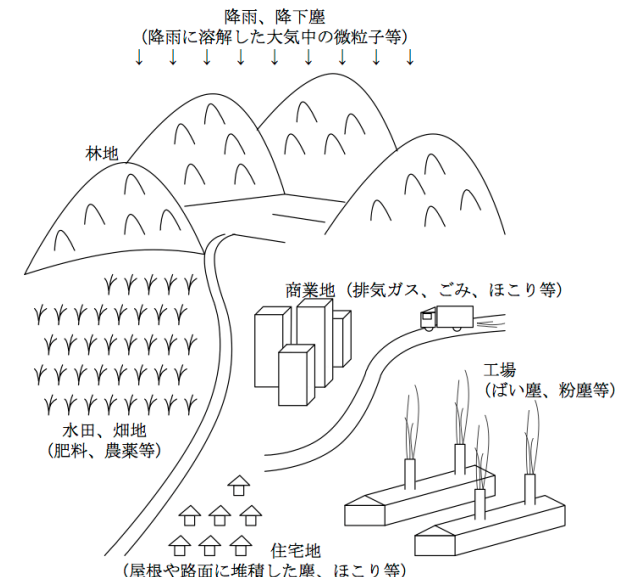
- ポイントソース(点源):

- 排出拠点が特定できるもの
 - 例: 家庭排水、工場排水、下水処理水など
 - 原発由来放射線性物質



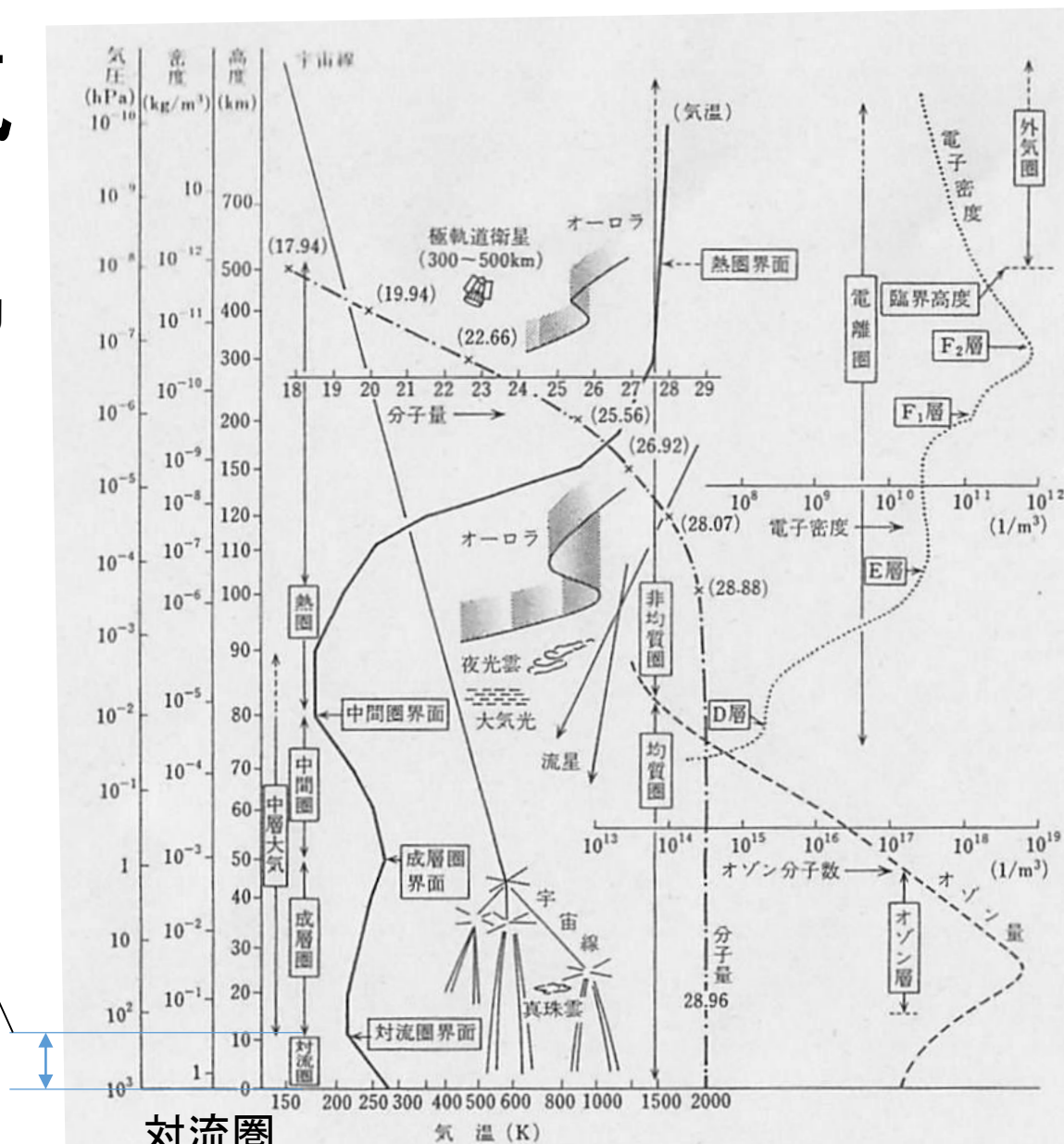
- ノン・ポイントソース(面源、非特定点)

- 排出拠点が特定できないもの
 - 例: 栄養塩、農業肥料由来の汚染物質



地球の大気

対流圏：我々の身の回りの物質(水など)は、主に対流圏に



対流圏

図 1.2 大気鉛直構造 (和達清夫監修, 最新気象の事典, 東京堂出版, 1993)

気象学の基礎

- 主なパラメータ

- 座標: x, y, z : z は鉛直軸

- 状態量:

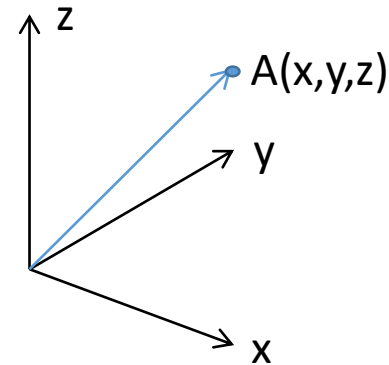
- 気温: $T(x, y, z)$
- 物質濃度: $C(x, y, z)$
- $>$ 位置に依存

- 移動速度

- 風速: $u, v, w \Rightarrow u(x, y, z), v(x, y, z), w(x, y, z)$:
 - u : x 方向、、、、
 - ベクトル $\mathbf{V}(x, y, z)$

- もちろん、時間に沿って変化する.

- $T(x, y, z, t), C(x, y, z, t), \mathbf{V}(x, y, z, t)$



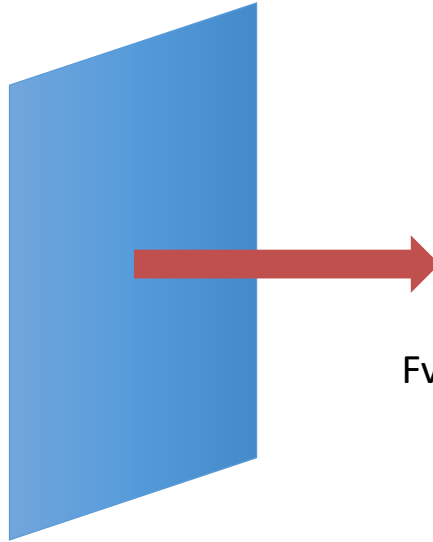
物質濃度

- 単位体積あたりの物質（放射性物質）の濃度
 - 物質の密度（質量／体積）： $\rho_c = M_c / V$
 - 物質の濃度（密度／大気密度）： $C = \rho_c / \rho$

輸送量フラックス

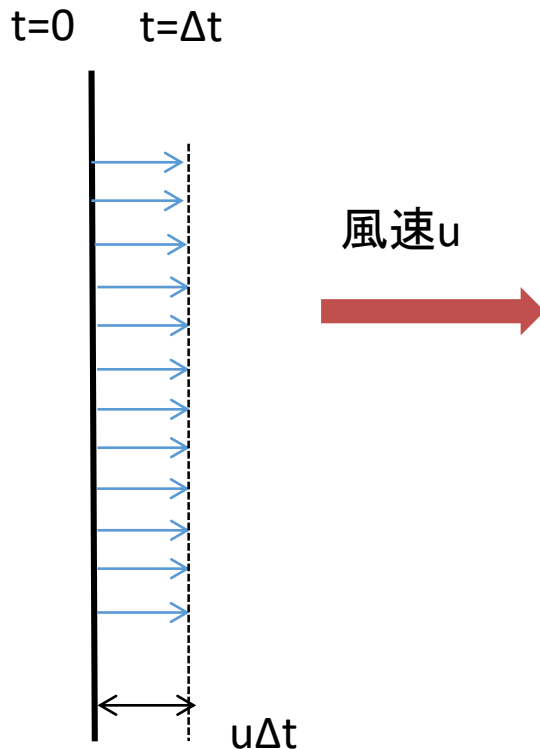
- フラックス(=輸送量)

面A(面積がA)



Fv: 通過する物質質量
=物質フラックス(輸送量)

単位時間あたりのフラックス



- 時間 Δt の間に面積 A を通過する空気の体積

$$V = u\Delta t A$$

- ...する空気の質量

$$M = \rho u\Delta t A$$

- ...する物質の質量

$$M_c = \rho_c u\Delta t A = \rho_c u\Delta t A$$

- 単位面積・単位時間あたりの水蒸気通過量

$$F_c = M_c / (\Delta t A) = \rho_c u \quad (\text{x方向})$$

フラックスは方向を持つ(ベクトル量)

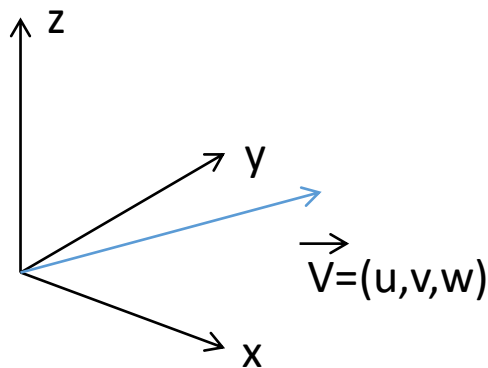
- $\vec{F}_v$ はベクトル量

$$F_c = \rho c \mathbf{V} = \rho c(u, v, w)$$

$$\text{x成分: } F_{vx} = \rho c u$$

$$\text{y成分: } F_{vy} = \rho c v$$

$$\text{z成分: } F_{vz} = \rho c w$$



大気中の物質の輸送形態

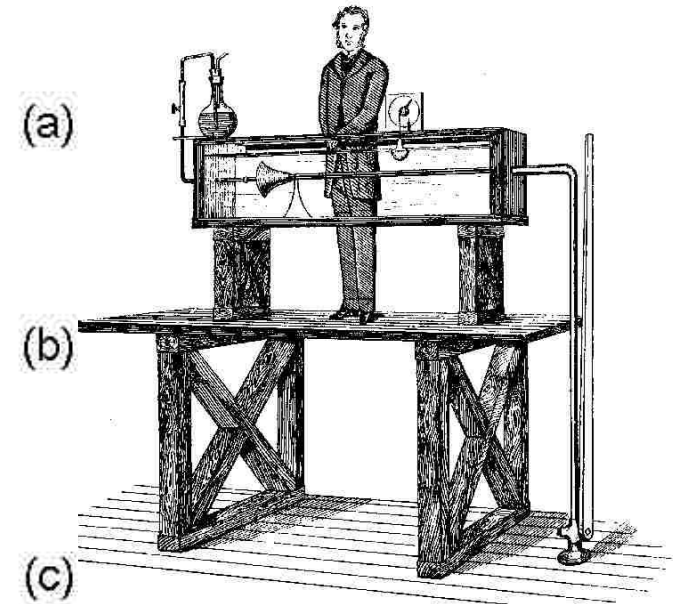
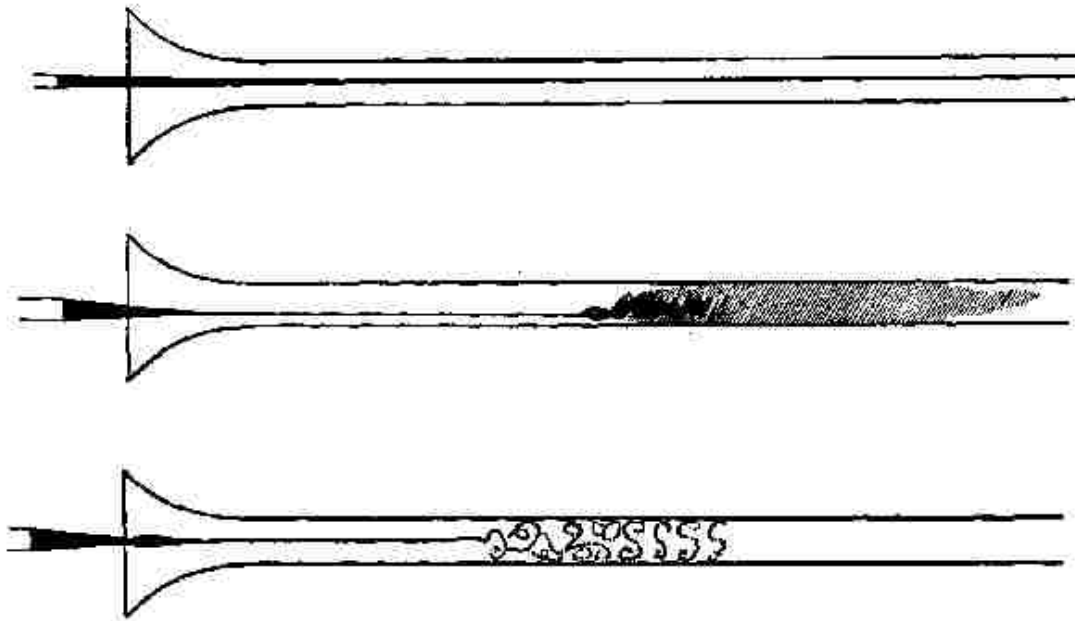
- 乱流

- 層流

2.3 大気境界層・乱流・安定度

— 乱流 —

レイノルズの実験(1883): 乱流の“発見”



“流れの速度が増すと、突然流れが乱れるようになる”

2.3 大気境界層・乱流・安定度

— 乱流と層流 —

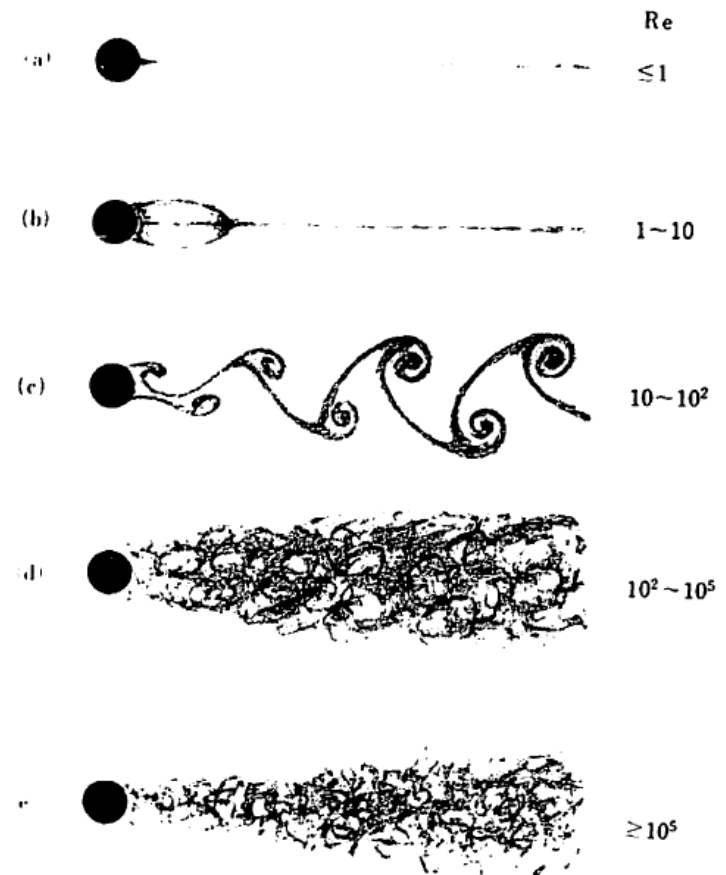
- 2種類の流れ
 - 乱流： ランダムな流れ
 - 層流： 整然とした流れ
- 乱流：
 - 分子粘性よりも運動による慣性力が大きい流れ。乱れが大きく、予測が“不可能(?)”な流れ。
 - 流速(風速): U , パイプの径: D ; $U \rightarrow$ 大, $D \rightarrow$ 大で乱流になる傾向
 - $Re = UD/\nu$: レイノルズ数(無次元)
 - ν : 動粘性係数

2.3 大気境界層・乱流・安定度 — レイノルズ数 —

- Re がある値 (限界レイノルズ数 $=Re_{cr} \doteq 2000$)
以上になると乱流

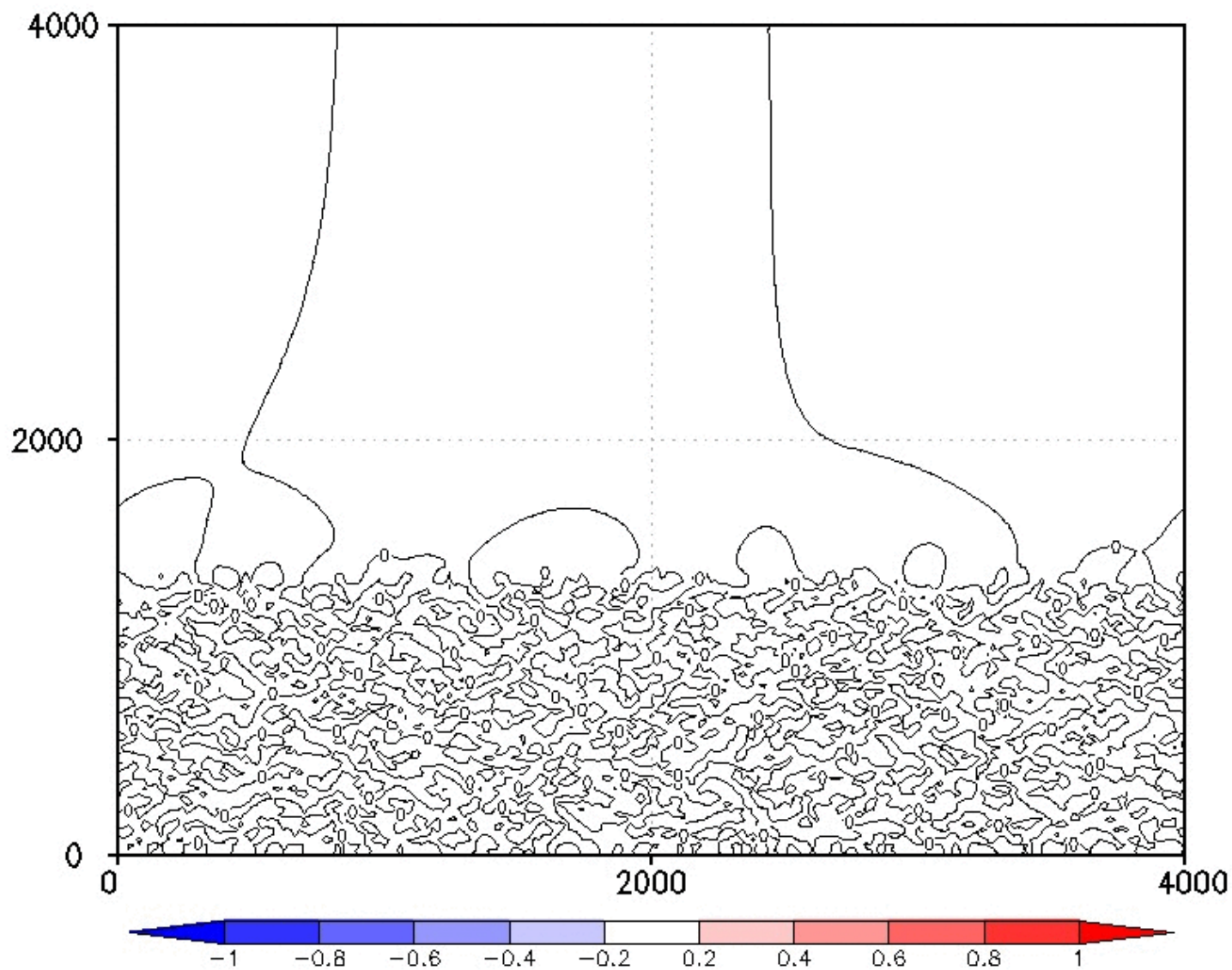
- $Re > Re_{cr} \rightarrow$ 乱流
- U 大, D 大 $\rightarrow$ 乱流

- 流体の粘性に比べて,
運動の慣性が大きくなると乱流.



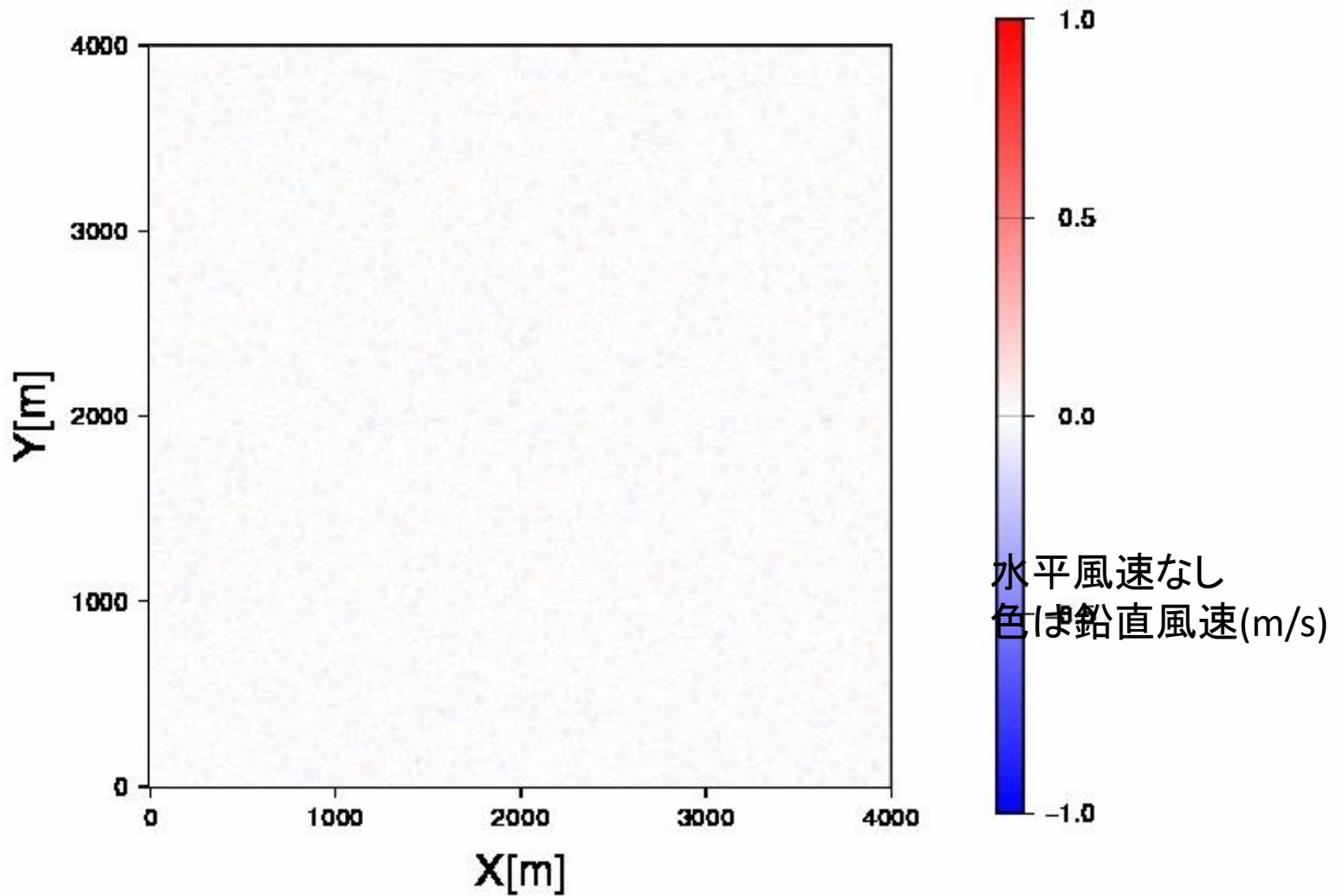
流れの模様のレイノルズ数による変化 (概念図)

x-z平面
横から

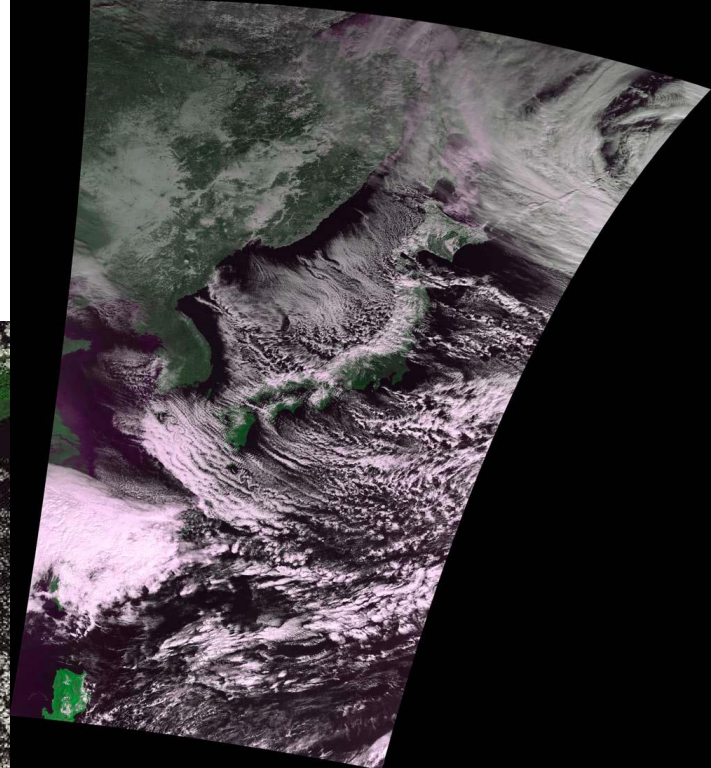
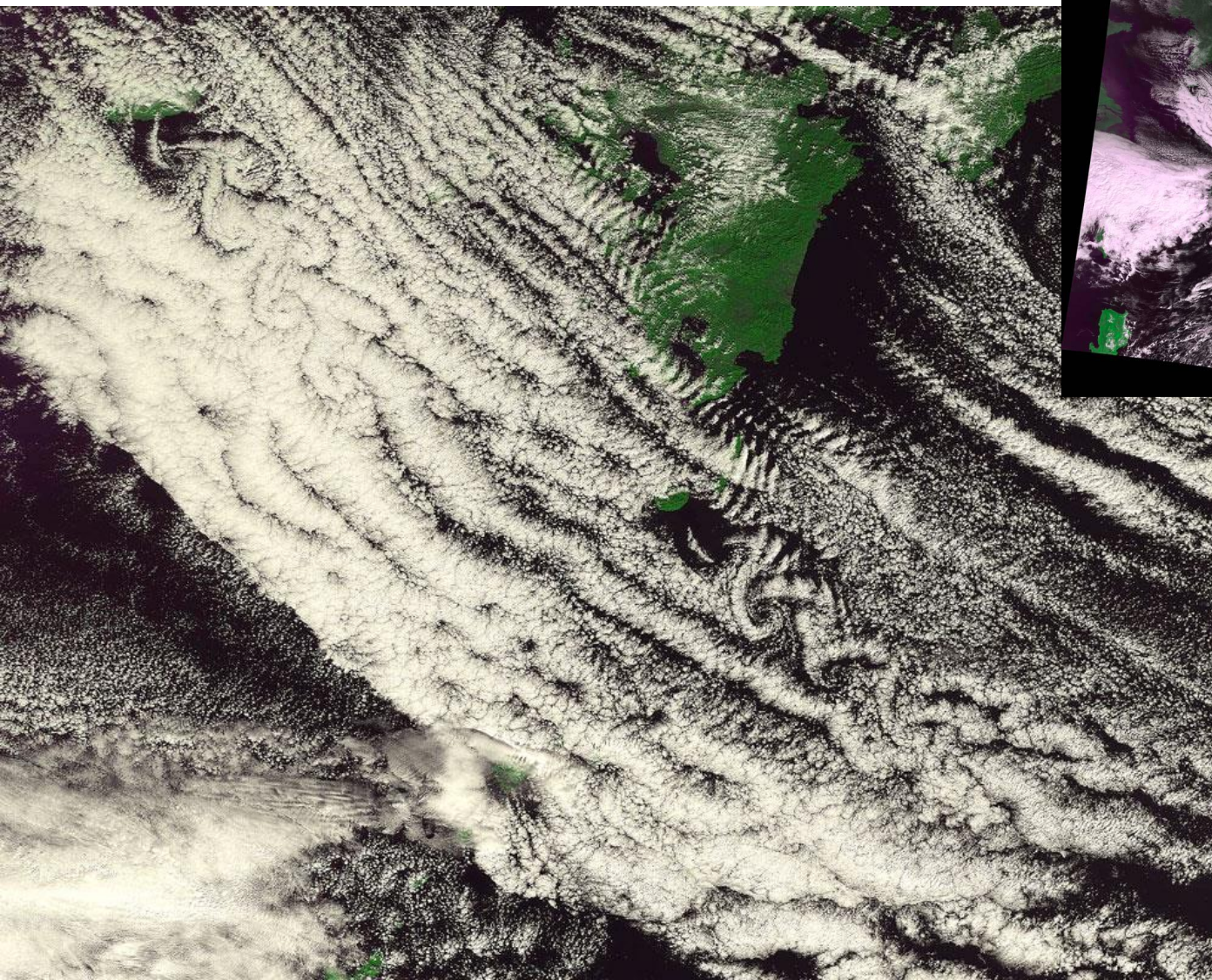


対流により生成 された乱流の例

x-y平面
上から



済州島と屋久島の風
下に見えるカルマン渦



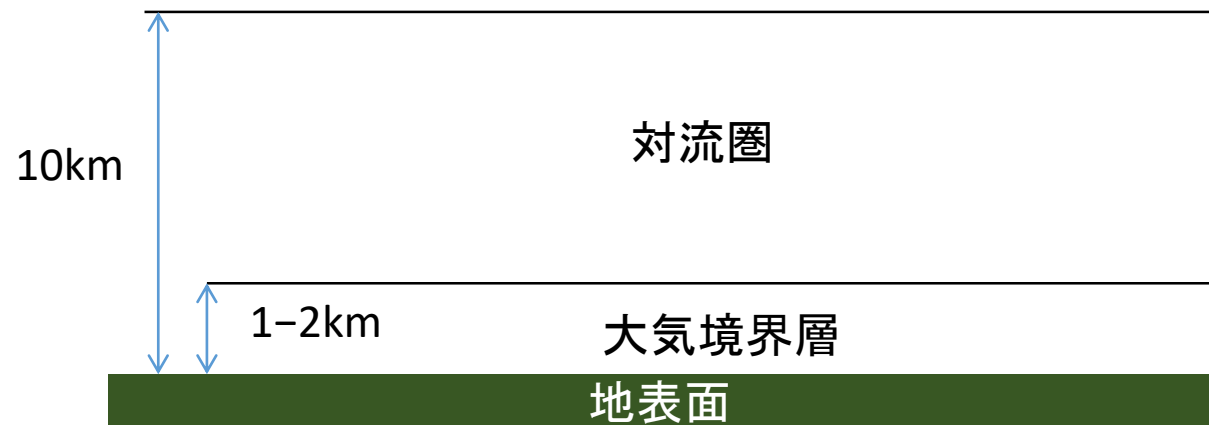
2005年2月3日10時51分
JAXAホームページより
MODIS(NASA)による画
像

[http://www.eorc.jaxa.jp
/imgdata/topics/2005/t
p050210.html](http://www.eorc.jaxa.jp/imgdata/topics/2005/tp050210.html)

2.3 大気境界層・乱流・安定度

— 大気境界層 —

- 大気境界層：
 - 地表面に近い大気の層. 地表面の影響(植生, 土地被覆, 海陸分布 etc.)の影響を受ける層. 大気の状態は乱流.
 - 地表面からの蒸発散も乱流によって, 水蒸気が移動.



2.3 大気境界層・乱流・安定度 乱流

- レイノルズ数:

- 運動に対する慣性と粘性の影響の比率
(流体の運動方程式: ナビエ=ストークス方程式)

$$Re = (\text{慣性}) / (\text{粘性})$$

- 慣性に対して粘性が弱ければ(Re大), 乱れが強い流れ > 乱流
- 慣性に対して粘性が強ければ(Re小), 整然とした流れ > 層流
- おおよそ, $Re > Re_{cr} \doteq 2000$ ならば乱流 (Re_{cr} : 限界レイノルズ数)

2.3 大気境界層・乱流・安定度 乱流

- 地表面に近い大気

$U=10 \text{ m/s}$, $D=10 \text{ m}$, $\nu=1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ $\rightarrow$ $Re=6.0 \times 10^6$

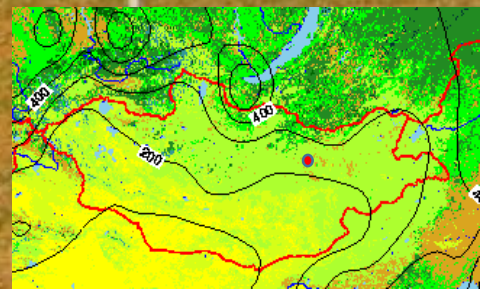
> 高レイノルズ数乱流(乱れの特に強い乱流)

“大気境界層は、乱流運動が支配する大気的最下層”

モンゴルの草原サイト

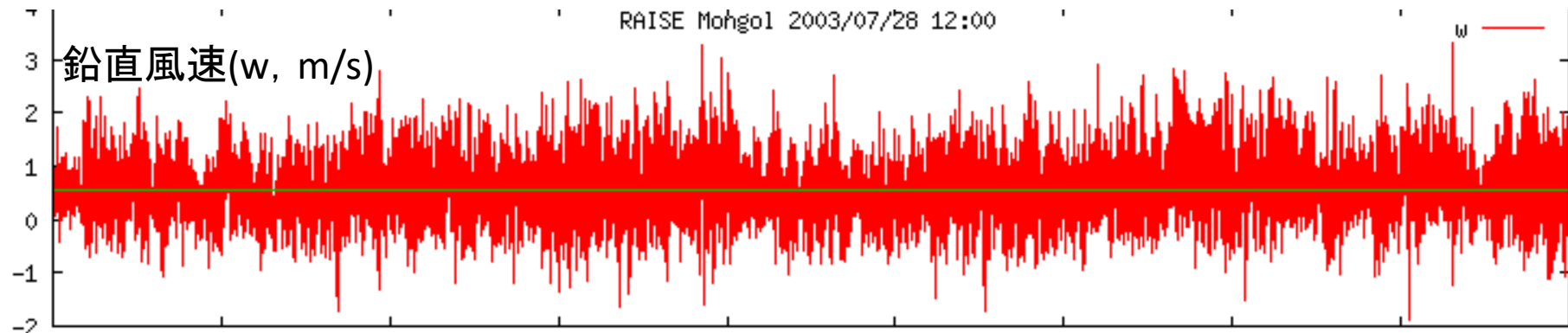


sparse grassland

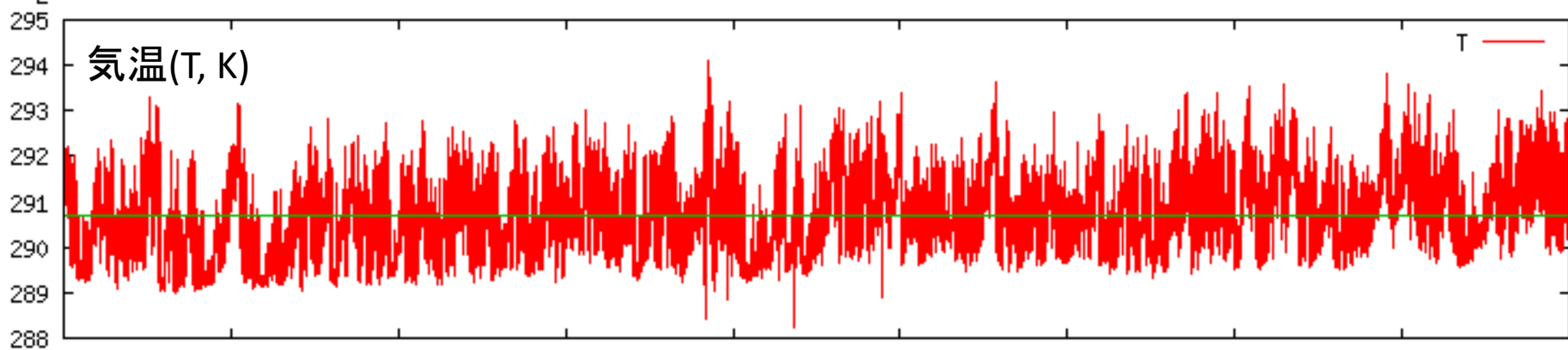


RAISE Mongol 2003/07/28 12:00

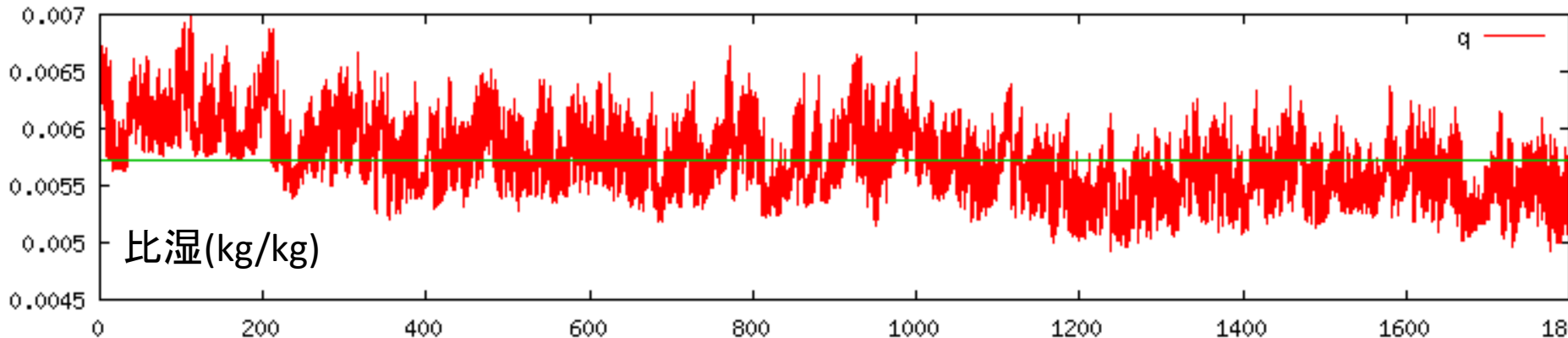
鉛直風速(w , m/s)



気温(T , K)

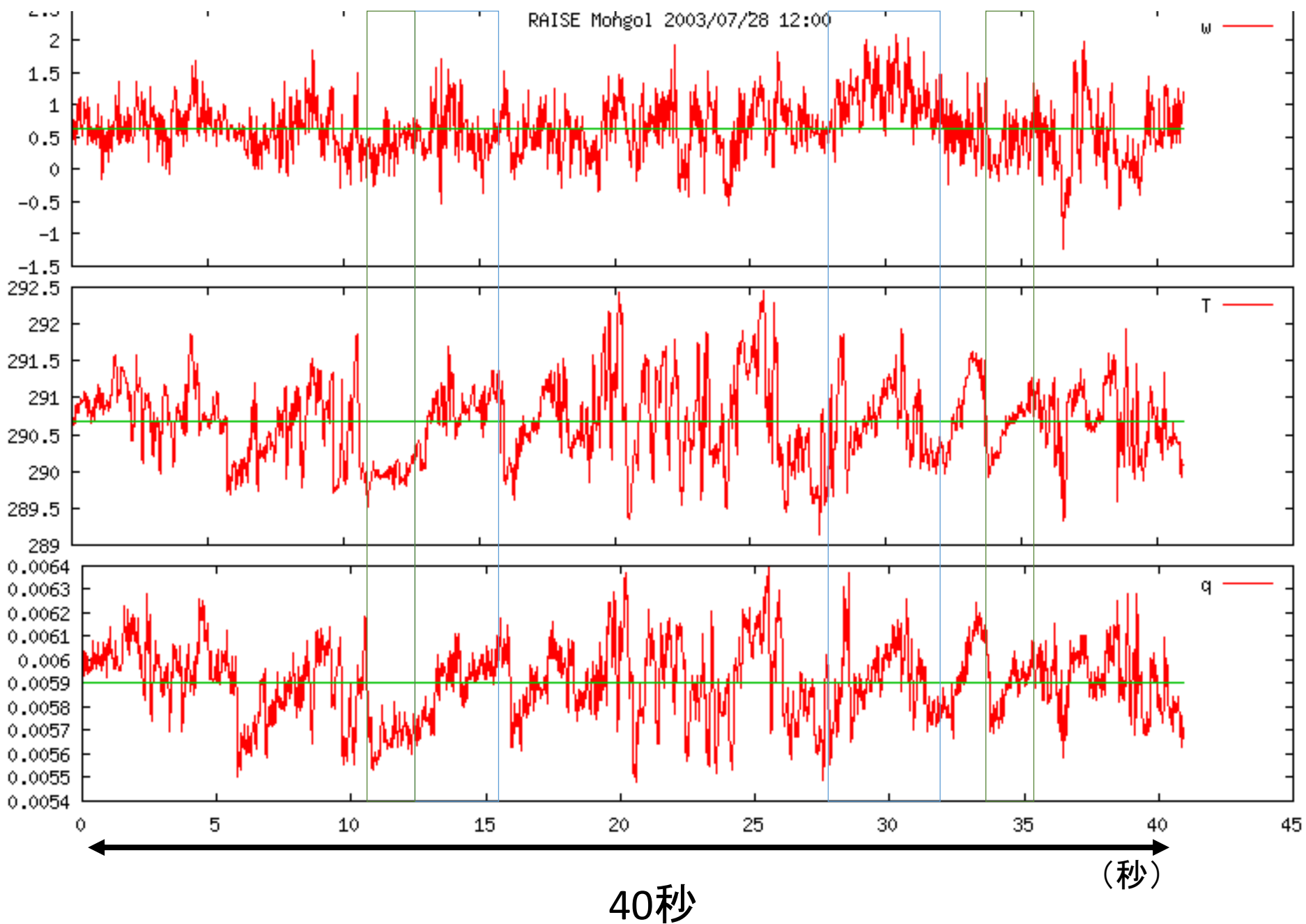


比湿(kg/kg)



30分

(秒)



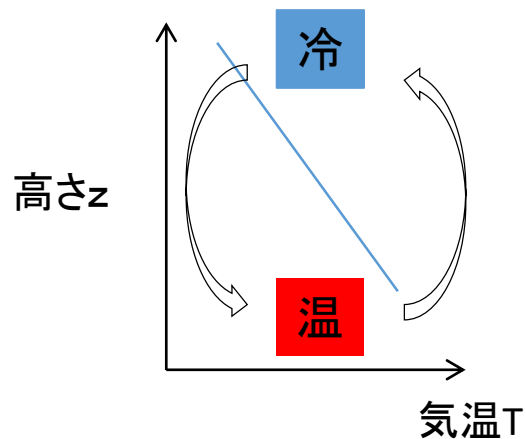
2.3 大気境界層・乱流・安定度

乱流の乱れの原因

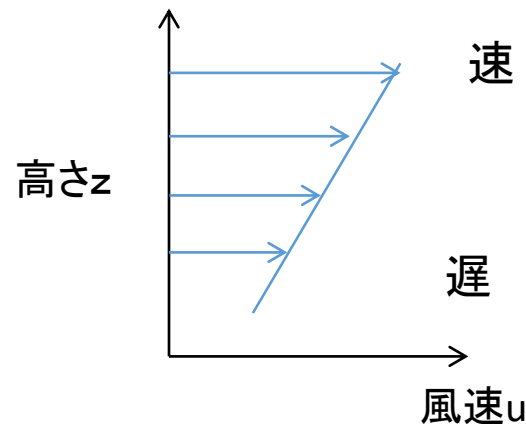
• なぜ、地表面近くの大気は乱流なのか？

• 乱れの原因

1. 対流（上下の気温差） > 対流性の乱流
2. シアー（上下の風速差） > シアー性の乱流



熱的な不安定



シアー(機械的な)不安定

Re

放射性物質の大気中の輸送

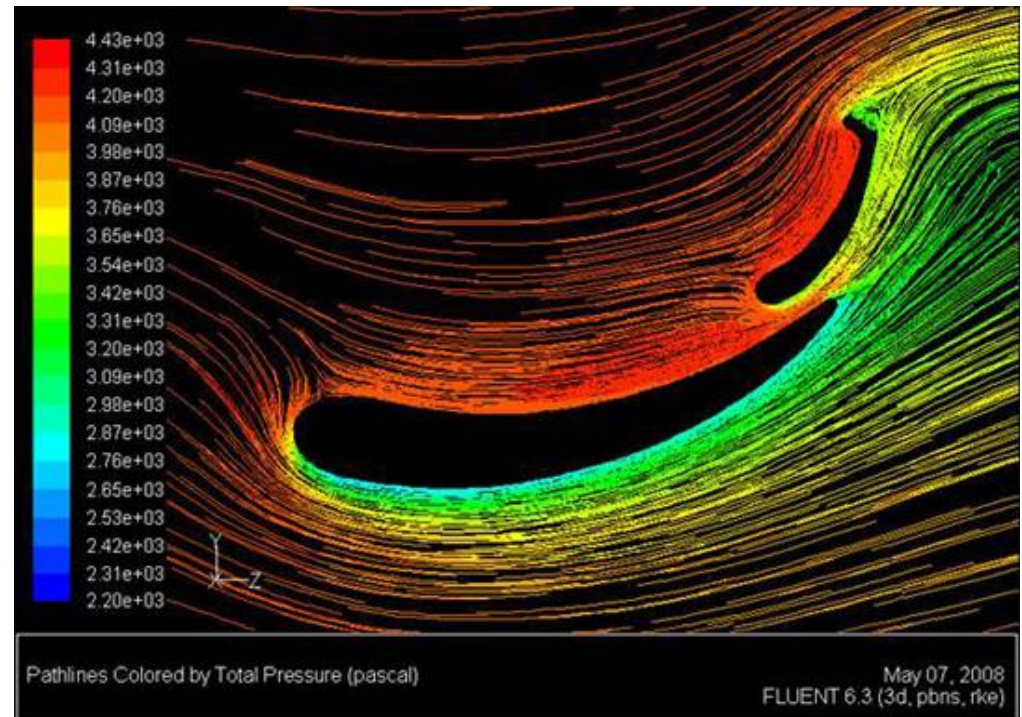
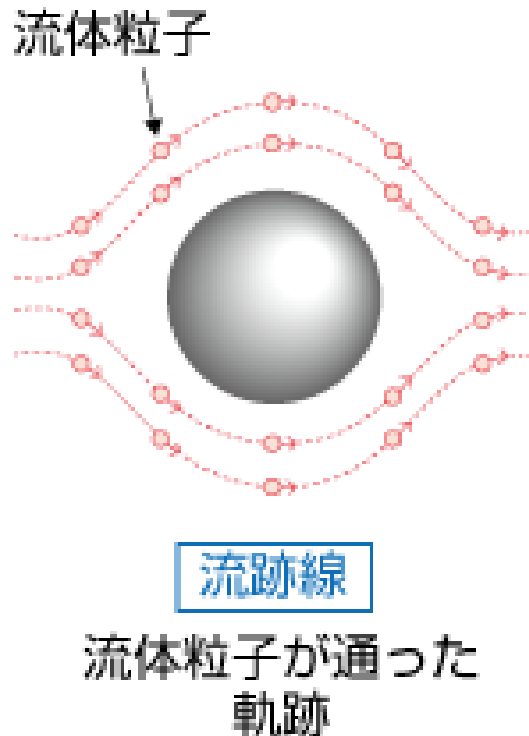
- 地表面近く(大気境界層内): 乱流
 - 地表面からの巻き上げ
 - 林内への沈着
 - モデリングに大気乱流のパラメータが必要
- 長距離輸送: (層流)
 - 平均風に沿った流れ

汚染物質の拡散問題

- 区別がはっきりしない例：
 - 排出源近く：ポイントソース
 - 他の汚染物質と混合した後：ノン・ポイントソース
例：工場排水（排出口近くではポイント、河川に流出して混合するとノンポイント）
- 不明なソースをどう見つけるか
 - 河川：川の上流へ向けて、河道を探索していく
 - 大気：風の上流に向けて、大気中を探索していく
 - 時間を遡って解析 > （バック）流跡線（トラジェクトリー）解析

トラジェクトリー（流跡線）解析

- 流跡線：
 - 流れの中を輸送される仮想的な粒子を追跡した線



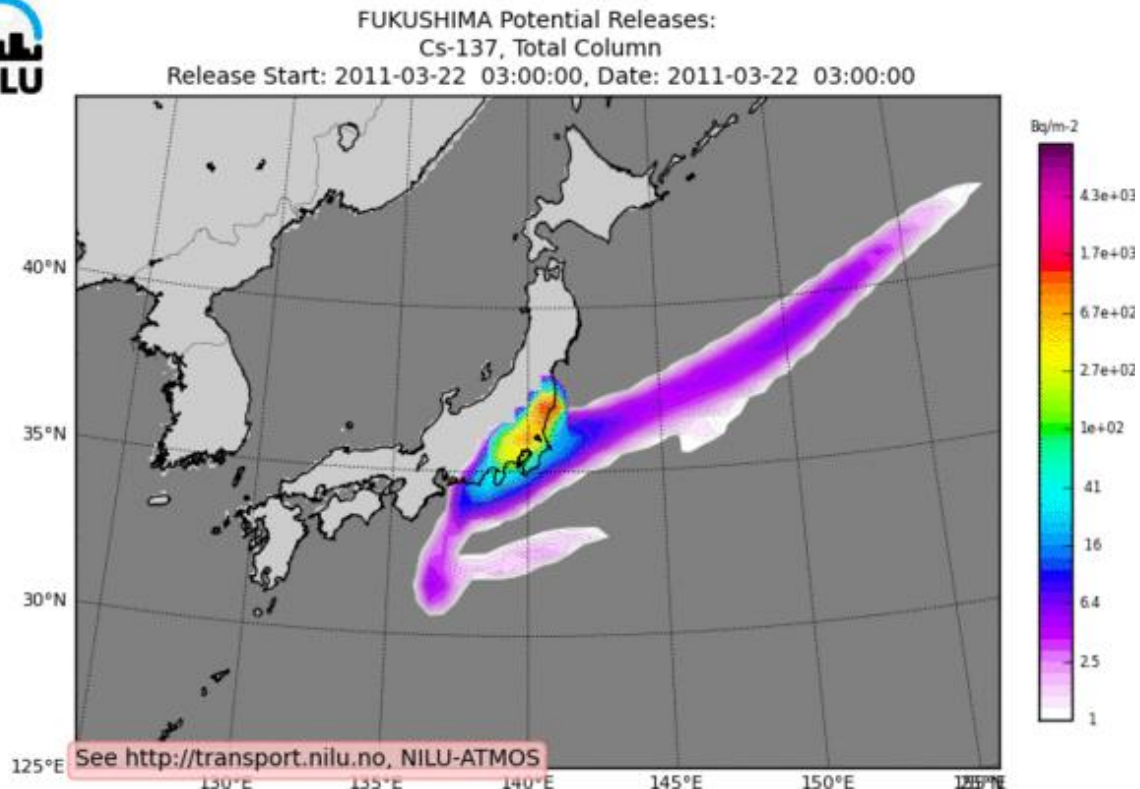
トラジェクトリー（流跡線）解析

- 流跡線解析： 流跡線を求めることによって
 - 汚染物質の起源、輸送経路、輸送プロセスなどを明らかにする.
 - 流れ（風）の場合（3次元分布＋時間変化）が必要
- 前方トラジェクトリー解析：時間の進行方向に解析
- 後方トラジェクトリー解析：時間に逆行（過去に遡って）して解析

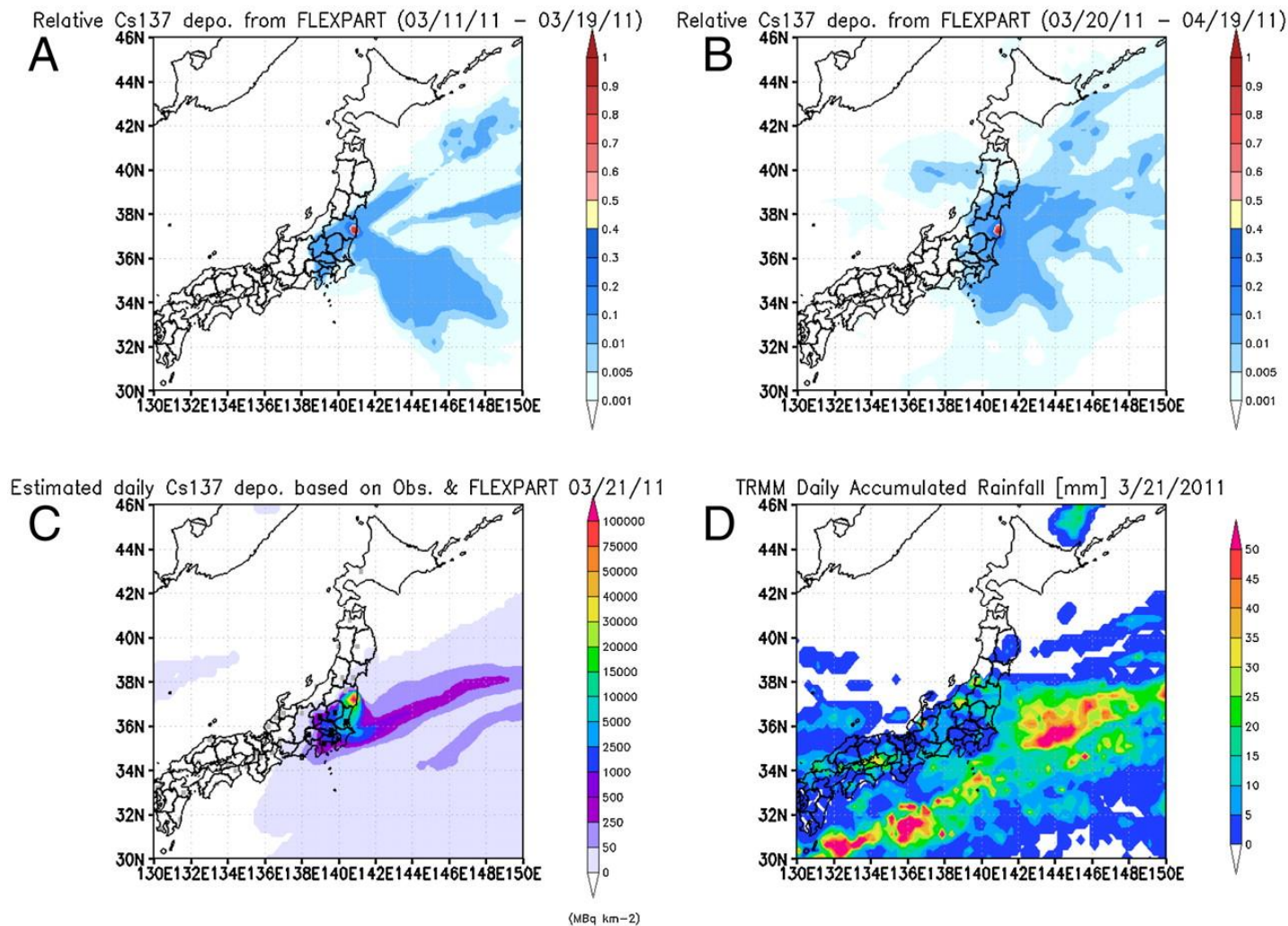
前方流跡線解析

- 時間の進行方向に追跡
 - ポイントソースの汚染物質の拡散解析
- 例) FLEXPART(流跡線解析ソフト)を用いた解析

ノルウェイ大気研究所(NILU)
によるCe-137の拡散計算



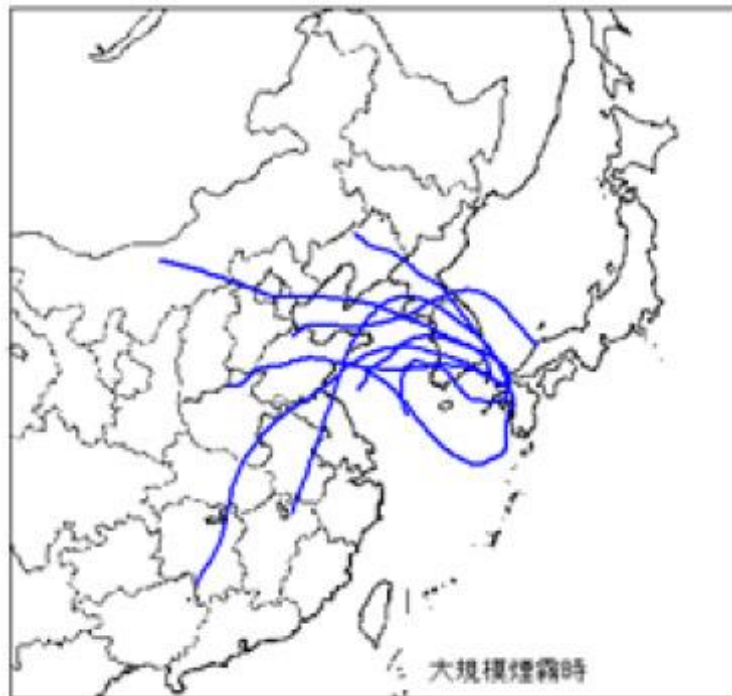
Cesium-137 deposition maps.



Teppei J. Yasunari et al. PNAS 2011;108:19530-19534

後方流跡線解析

- 時間の進行に逆行して(過去に向かって)物質を追跡
 - 物質の起源を特定する用途で使われる



黄砂の発生源の推定

