

リバースシミュレーションによる拡散源特定に関する研究

はじめに

大気中に危険性の物質が拡散した場合、その拡散源を特定し即座に対応する必要がある。過去には拡散源が分からずに、被害が拡大した事例が多く存在する
(例:チェルノブイリ原発事故、地下鉄サリン事件)



拡散源特定手法の開発は、とても重要であり、社会的要請が強い

既往の研究

1. 逆流跡線解析手法

- ・最も多く使われている拡散源特定手法の一つ
- ・粒子の動きを流線に沿って逆方向に解析する手法の一つ
- ・計算コストが低く、迅速に解を出すことができる
- ・原理的に乱流拡散を考慮することができず、そのために誤差が大きい
(1992 Bagtsoglou et al.)

2. 解析的な手法

- ・Islamらによって開発された、ガウスのプルームモデルを用いた手法
- ・シンプルな流れ場のみにはしか適用できず、複雑な形状を持つ流れに適用が難しい

3. Quasi-reversibility method

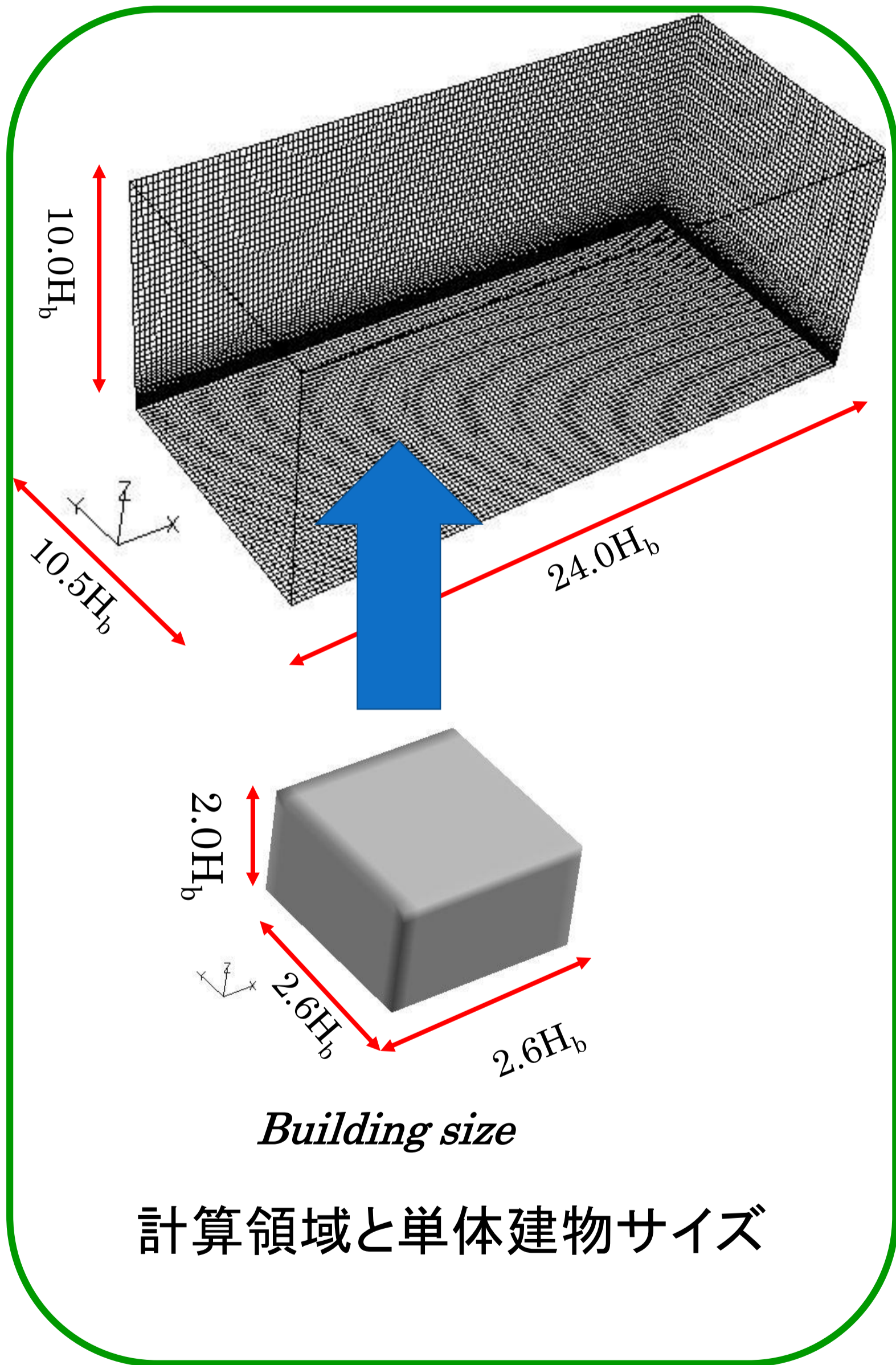
- ・CFD解析により拡散源を特定する手法
- ・負の拡散による数値不安定性を除去するために、拡散物質の拡散項の二次微分を四次微分(hyper diffusivity)に変更し、それを改善することを試みた
- ・拡散項が卓越するような室内のような流れ場では、拡散源特定の精度に欠ける。

研究目的

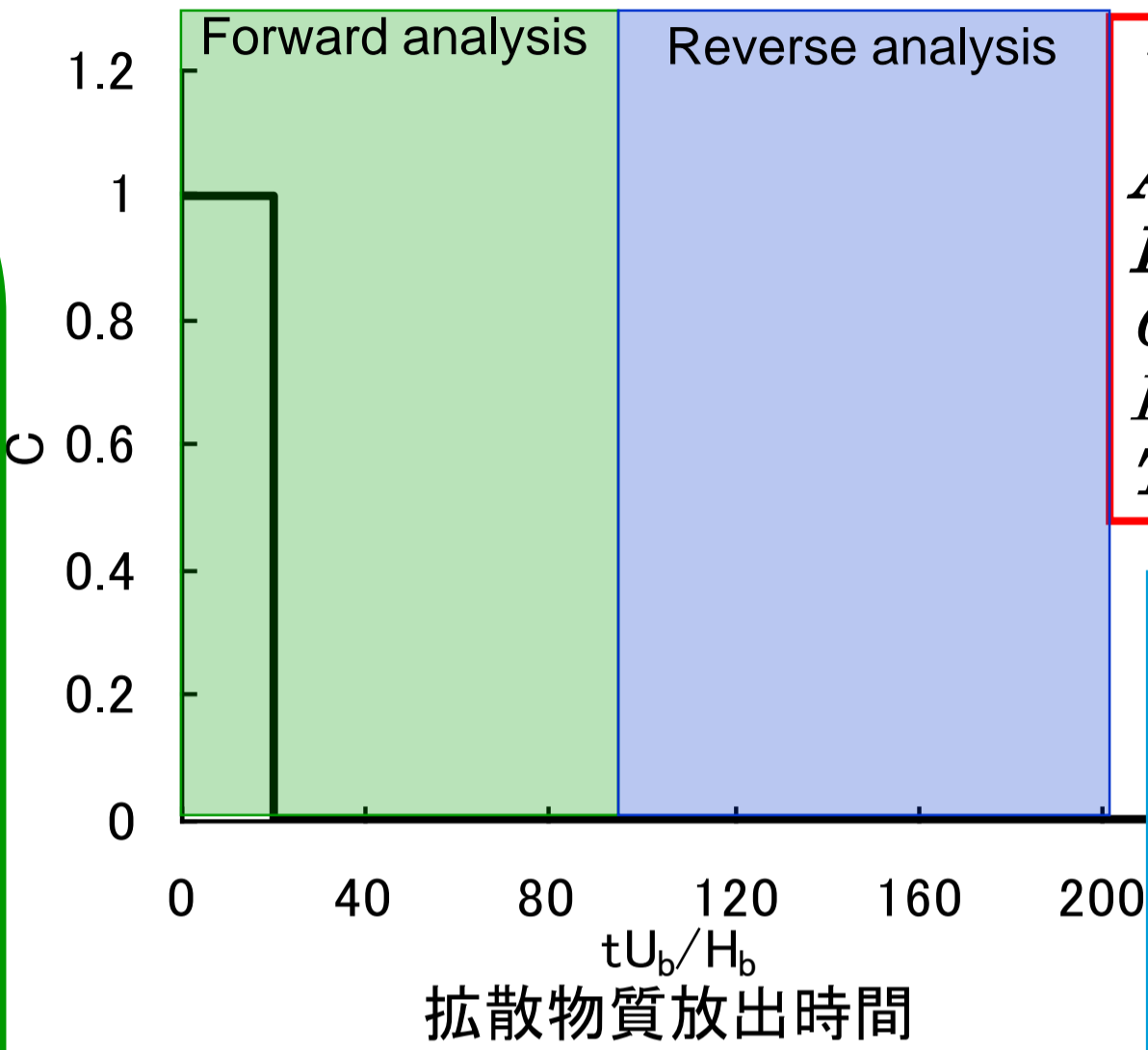
本研究の最終目標は、リバースシミュレーションによる拡散源特定を目指す。
その最初のステップとして、リバースシミュレーションにおける第一かつ最大の問題点である、負の拡散による「数値不安定性」を除去することを主な目的とする

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{\sigma_3} \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) \xrightarrow{\text{change}} \frac{\partial C}{\partial t} + U_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \left(\varepsilon \frac{\partial^2 C}{\partial x_i^2} \right)$$

解析モデル



- 解析ケース
- ① 平面上での流れ
 - ② 単体建物周りでの流れ



Velocity
 Algorithm : ABMAC type
 Differenrial Scheme
 Convective term : Second order CD scheme
 Difusion term : Second order CD scheme
 Time advance scheme : Adams-Bashforth method

Concentration
 Differenrial Scheme
 Convective term : Second order CD scheme
 Difusion term : Second order CD scheme
 Time advance scheme : Adams-Bashforth method
 and
 When concentration is below 0, it is replaced with 0.
 (Clipping method)

境界条件

	Velocity	Pressure	Concentration	Turbulent Kinetic energy	Dissipation
Inflow	$U = U_b(z/H_b)^{0.25}$	$\frac{\partial P}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial C}{\partial x} = 0$	$x_3/H_b \leq 1.0 \quad k(x_3) = 0.018 \left(\frac{x_3}{H_b}\right)^{1/2} + 0.015$ $x_3/H_b \geq 1.0 \quad k(x_3) = -0.013 \left(\frac{x_3}{H_b}\right) + 0.046$	$\varepsilon(x_3) = C_\mu k(x_3)^{3/2} / \ell(x_3)$ $\ell(x_3) = 4[C_\mu \cdot k(x_3)]^{1/2} \frac{H_b^{1/4}}{U_b} x_3^{3/4}$
Outflow	$\frac{\partial u_i}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial P}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial C}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$
Top	$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$	$\frac{\partial P}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial C}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0$
Bottom	generalized log low	$\frac{\partial P}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial C}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial z} = 0$	Wall function
Span	Periodic	Periodic	$\frac{\partial C}{\partial y} = 0$	Periodic	Periodic

$x(x_1)$: stream $y(x_2)$: span $z(x_3)$: vertical
 H_b : Standard Height (Source Height)
 U_b : Standard Velocity (Velocity of H_b)

※Boundary condition of Filter Operation is **free-slip**.

リバースシミュレーション解析手法

$$-\frac{\partial C}{\partial t} + U_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_3} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \longrightarrow \frac{\partial C}{\partial t} - U_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_3} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right)$$

リバースシミュレーションは輸送方程式を負の方向に時間発展させることである。これは、負の移流、負の拡散を伴い正の方向に時間発展させることと同じである。

Filter Operation (Low-pass Filter)

$$\bar{F}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(r) F(x-r) dr \quad G(r) = \sqrt{\frac{6}{\pi \Delta^2}} \exp\left(-\frac{6r^2}{\Delta^2}\right) \quad \text{ガウシアンフィルター}$$

テイラー展開

$$\bar{F}(x) = F(x) + \frac{F''(x)}{2} \int_{-\infty}^{\infty} r^2 G(r) dr + \frac{F^{(4)}(x)}{24} \int_{-\infty}^{\infty} r^4 G(r) dr + \dots$$

離散化

$$\bar{F}_i = F_i + \frac{\Delta^2}{288} \frac{-F_{i-2} + 16F_{i-1} - 30F_i + 16F_{i+1} - F_{i+2}}{\Delta x^2} + \frac{\Delta^4}{1152} \frac{F_{i-2} - 4F_{i+1} + 6F_i - 4F_{i+1} + F_{i+2}}{\Delta x^4}$$

In this study...

$$F_i = C_i : \text{Concentration Field}$$

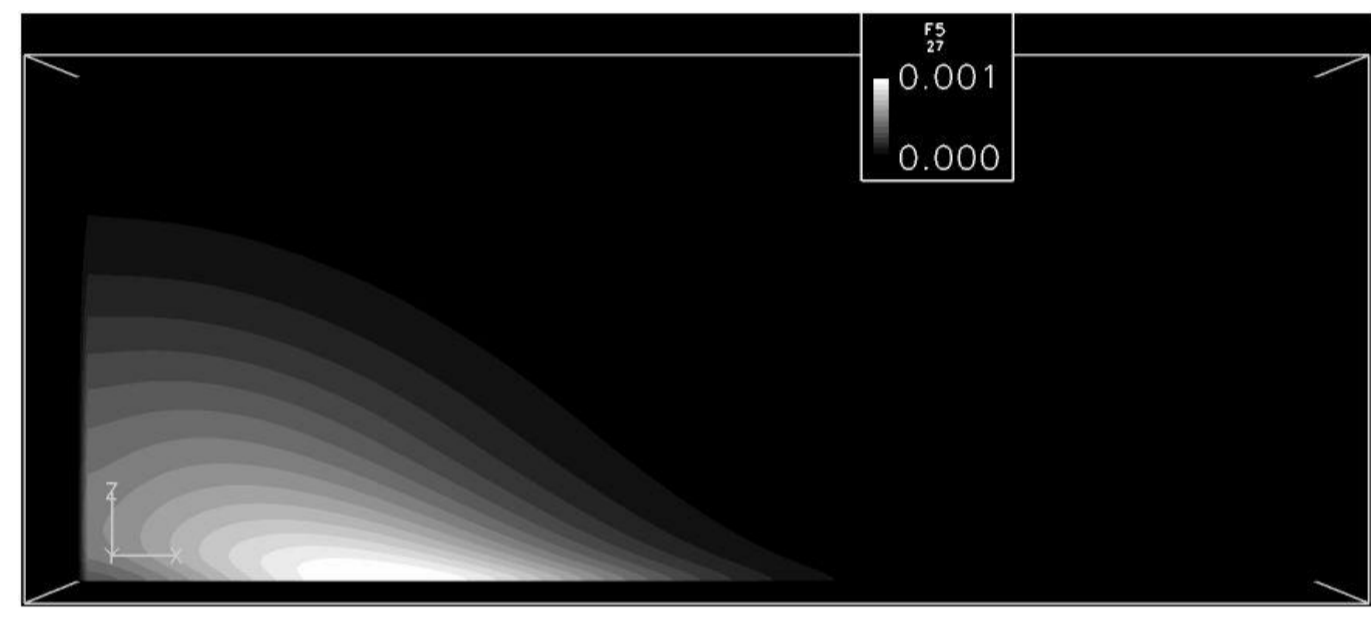
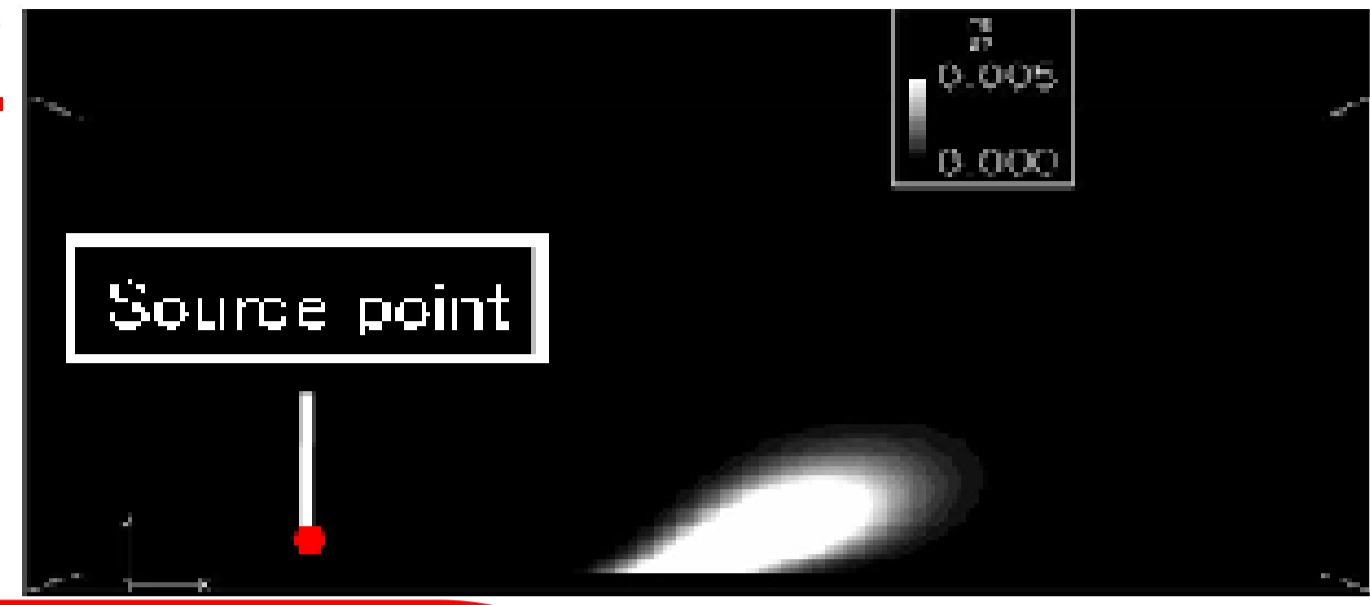
or

$$F_i = -\langle u_i c \rangle = v_t \frac{\partial C}{\partial x_i} : \text{Concentration Flux}$$

解析結果①

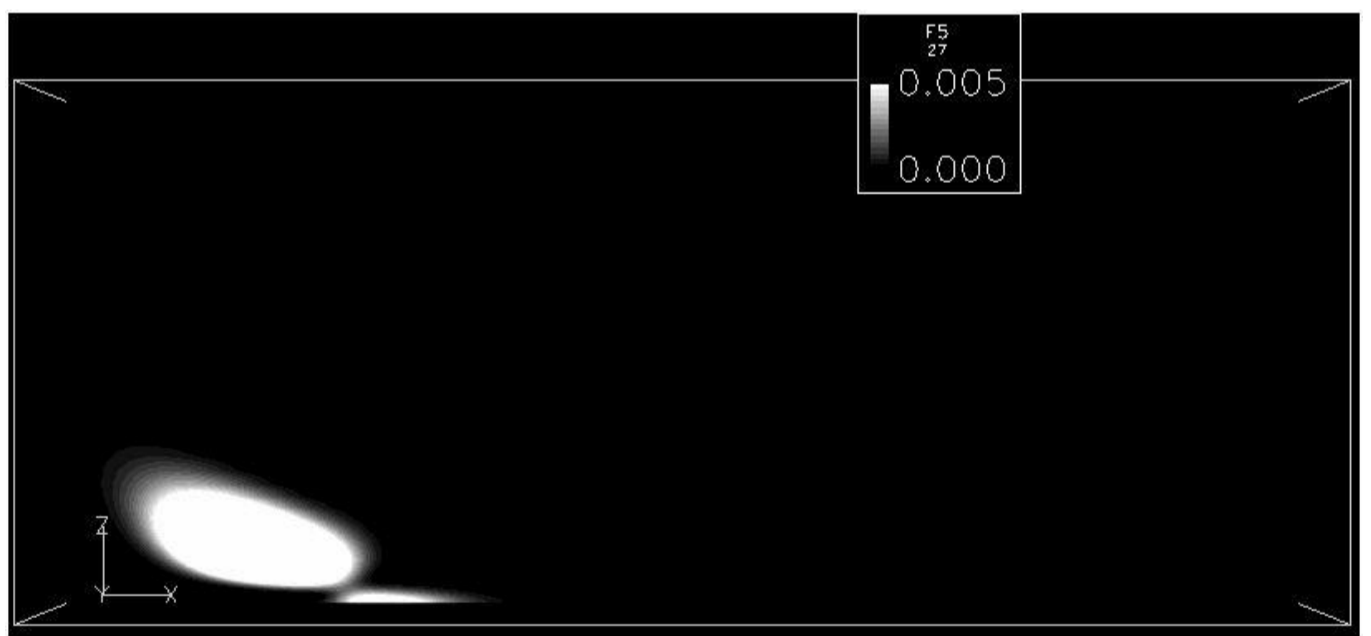
リバースシミュレーションの入力条件(順方向の解析結果)

パフの中心部に高濃度が集中し、パフの形状がよく再現できている



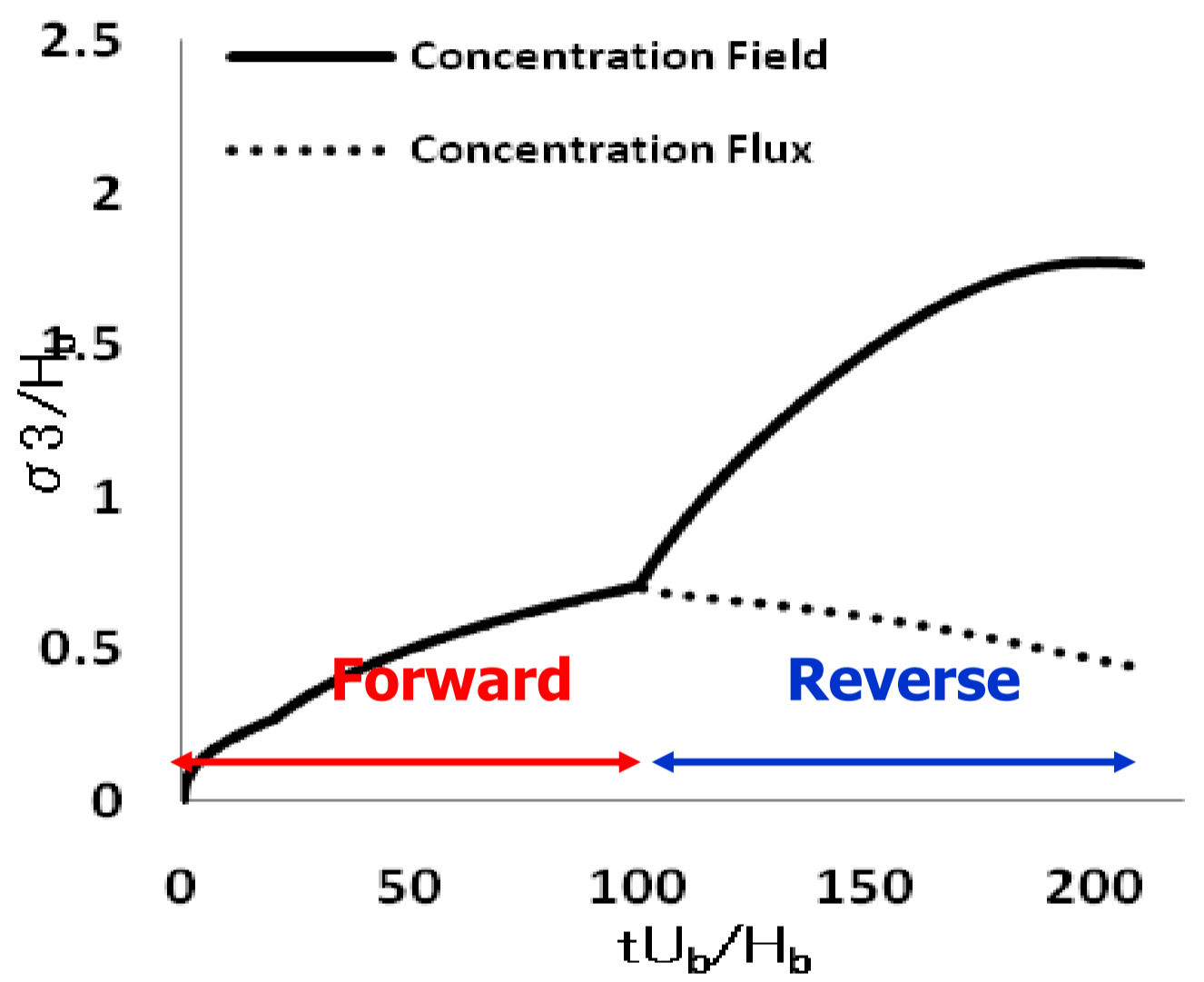
濃度場自身(Concentration Field)にフィルター操作を施した結果

フィルター操作の影響により第一の問題点である「数値不安定性」は除去することができているが、フィルター操作の影響により拡散幅が大きく広がっている。



濃度フラックス(Concentration Flux)にフィルター操作を施した結果

フィルター操作の影響により第一の問題点である「数値不安定性」は除去することができている。さらに、濃度場自身にフィルター操作を加えた結果と比較すると、拡散幅の拡大は抑えることができる。



鉛直方向拡散幅の時間変化

Peak concentration

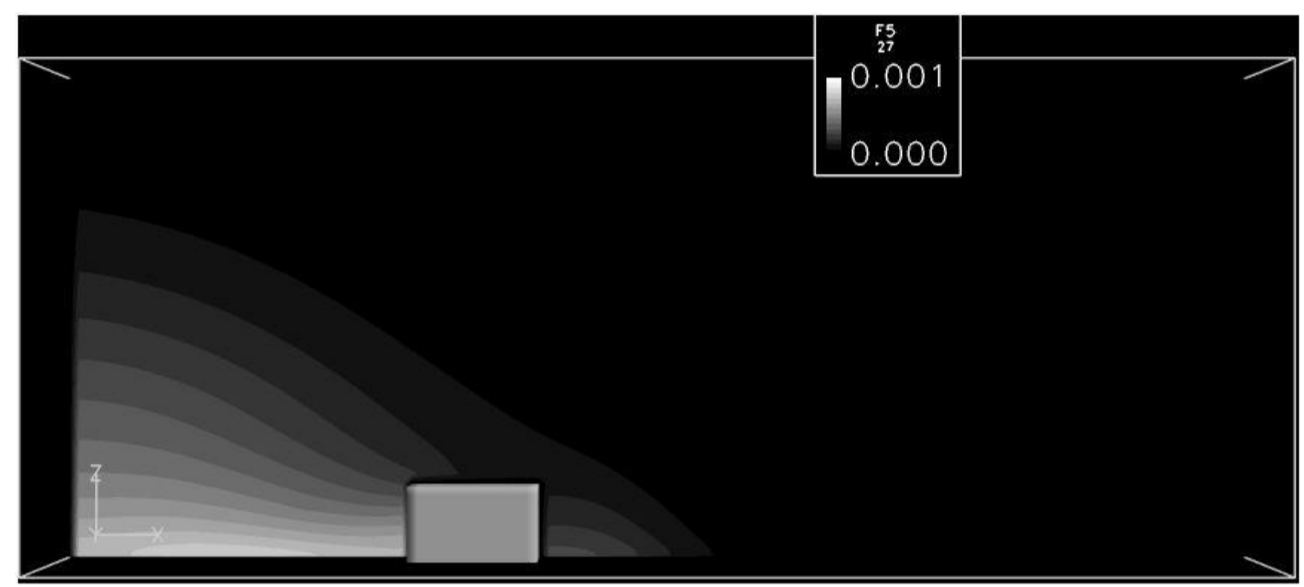
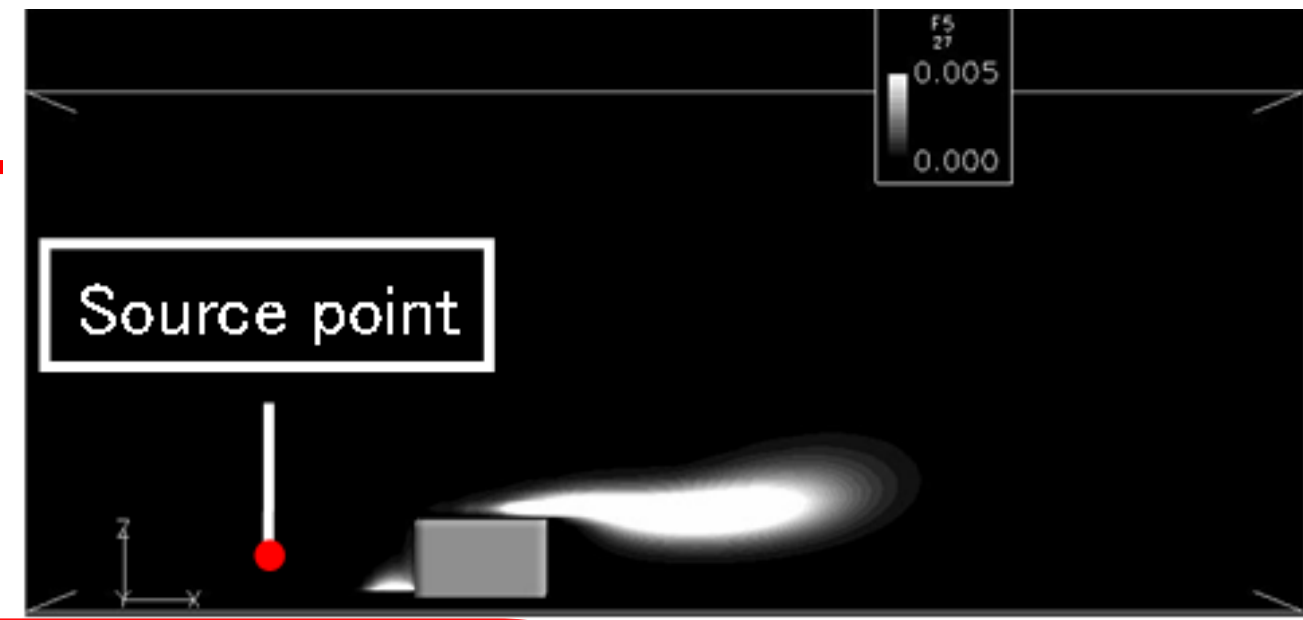


濃度フラックス(Concentration Flux)にフィルター操作を施した結果からピーク濃度をピックアップ

入力条件の拡散源と比較すると、ほぼ同様の位置にピーク濃度が存在する。

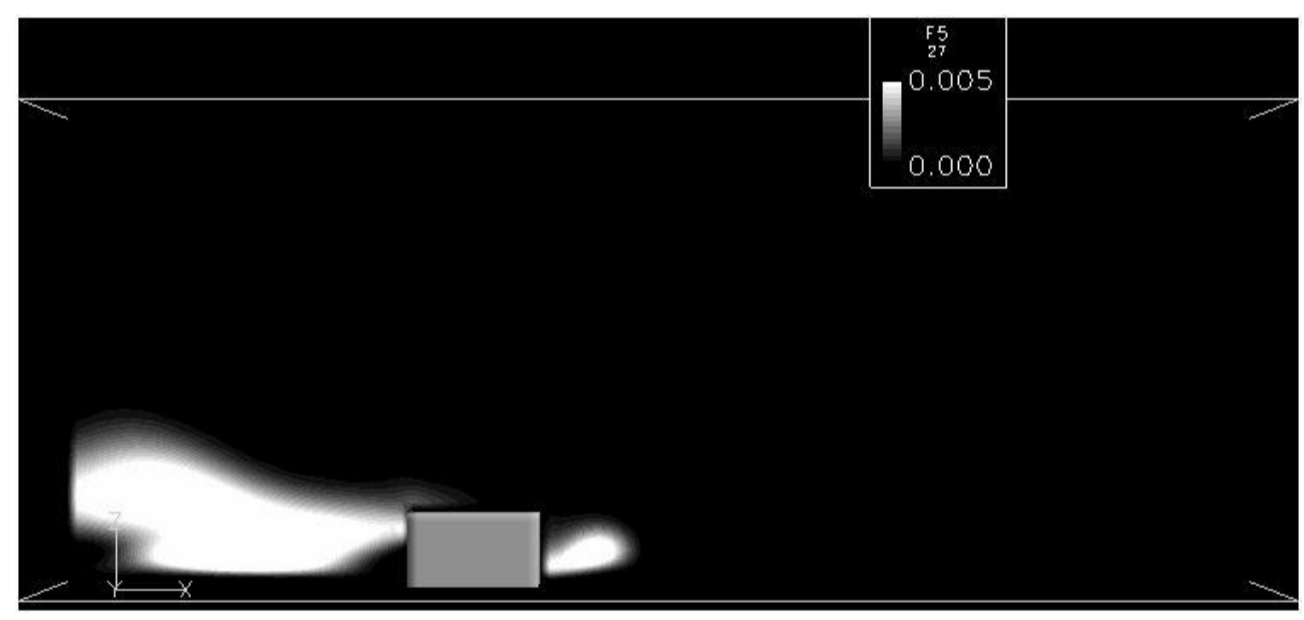
解析結果②

リバースシミュレーションの入力条件(順方向の解析結果)



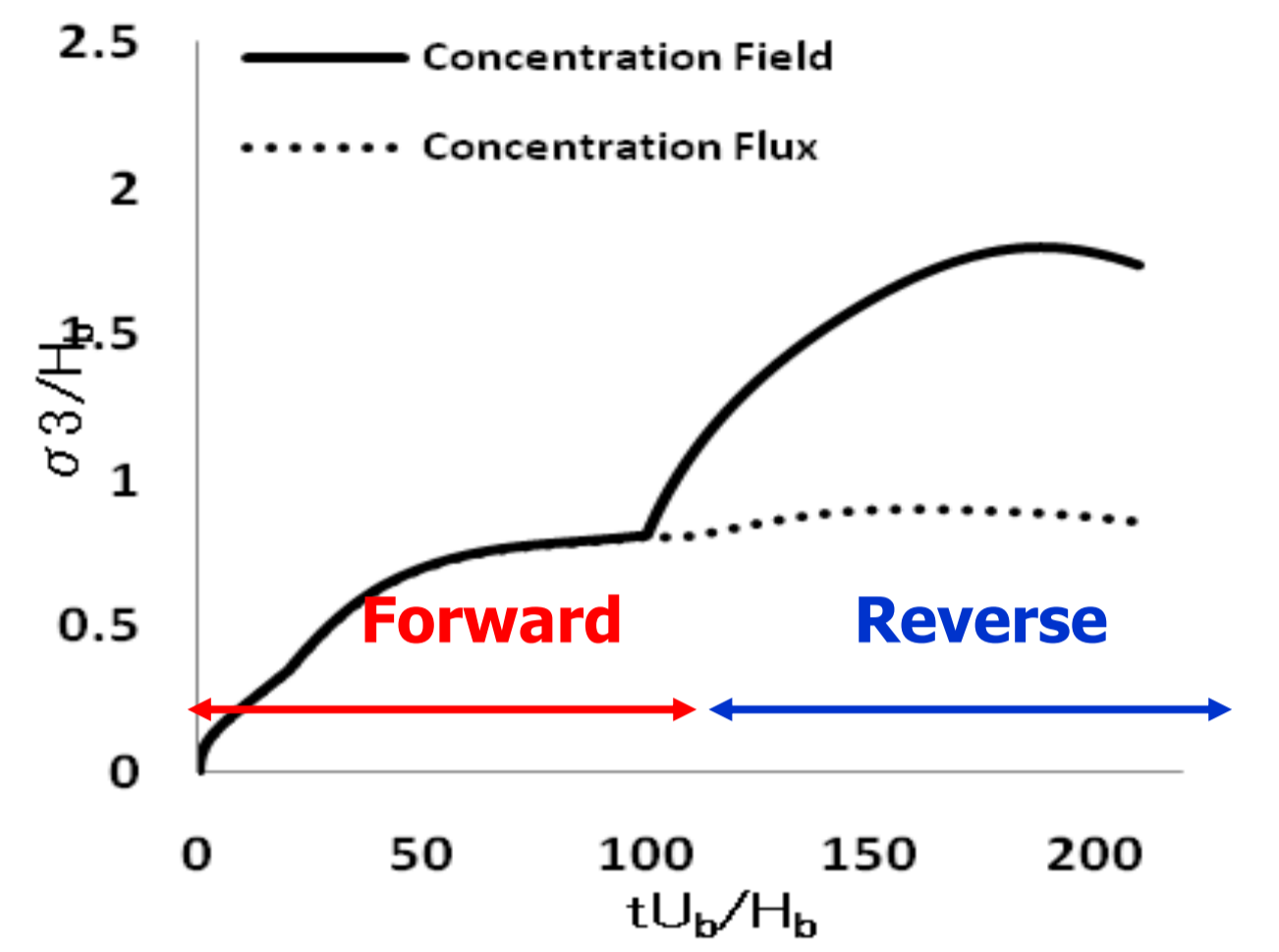
濃度場自身(Concentration Field)にフィルター操作を施した結果

平面上での流れ場での解析と同様に、フィルター操作の影響により第一の問題点である「数値不安定性」は除去することができているが、フィルター操作の影響により拡散幅が大きく広がっている。

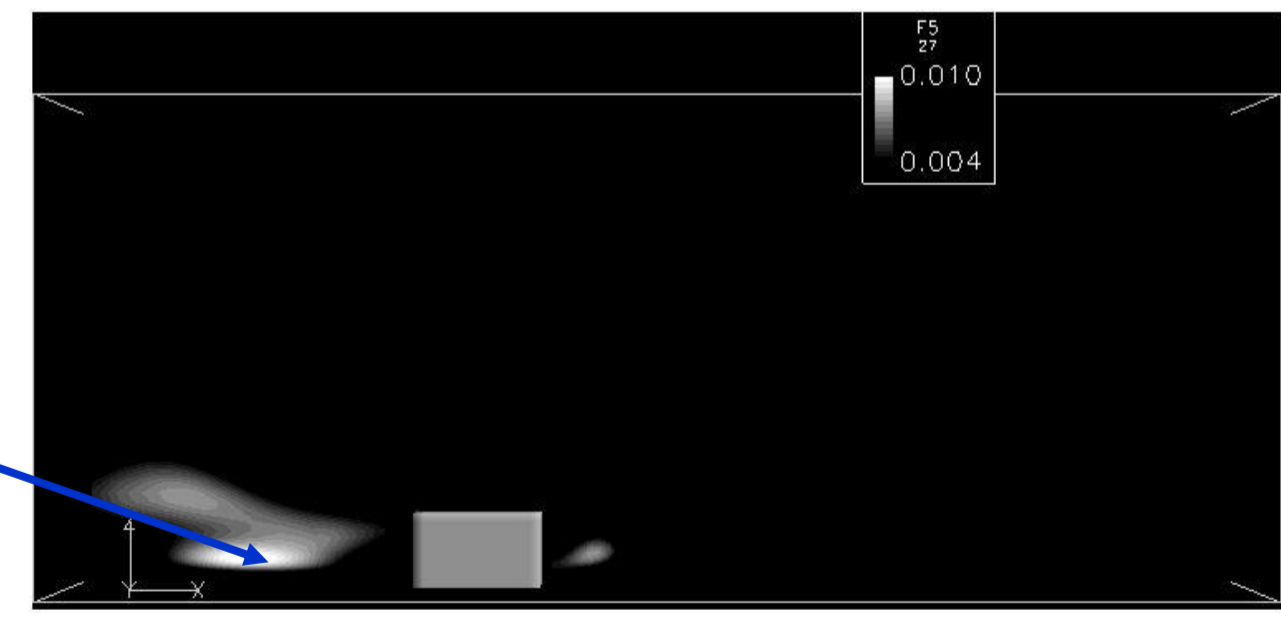
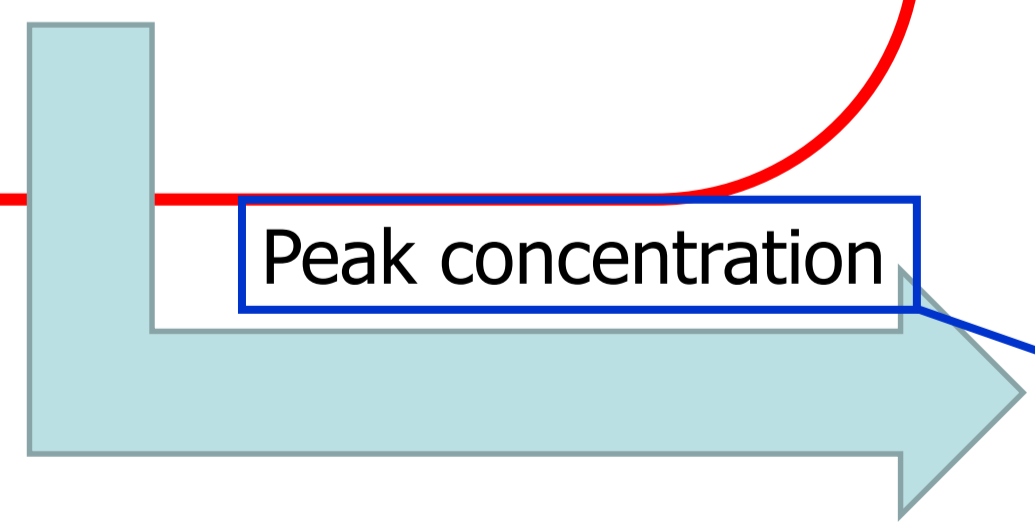


濃度フラックス(Concentration Flux)にフィルター操作を施した結果

フィルター操作の影響により第一の問題点である「数値不安定性」は除去することができている。さらに、濃度場自身にフィルター操作を加えた結果と比較すると、拡散幅の拡大は抑えることができる



鉛直方向拡散幅の時間変化



濃度フラックス(Concentration Flux)にフィルター操作を施した結果からピーク濃度をピックアップ

入力条件の拡散源と比較すると、ほぼ同様の位置にピーク濃度が存在する。しかし、平面上での解析と比較すると、**流れの性状が複雑なために上方に拡散物質の一部が移動している様子も見られる**

まとめ

RANS解析による拡散源特定を目指し、第一かつ最大の問題である「数値不安定性」の除去を試みた。
以下に結果の概要を示す。

濃度場自身にフィルター操作を施したケースと濃度フラックスにフィルター操作を施したケースを比較した。
その結果
どちらのケースも大きな問題点である「数値不安定性」に関して、大きな改善がみられた。

濃度場はフィルターの効果により拡散幅が大きく広がったのに対し、
フラックスにフィルター効果をほどこしたケがースはそれが抑えられ、ピーク濃度を用いた拡散源の特定に結び付けることができること確認された。

解析対象①である最もシンプルな平面上での流れ場では、フラックスにフィルター操作した場合は鉛直方向の拡散幅に収縮がみられ、可視化でも一点に高濃度が集中していることが確認された。
それに対し、
解析対象②である単体建物周りでの流れ場では、フィルター操作の対象を濃度場かフラックスに移行させたことによる改善はみられたが、流れ場が複雑になったために平面上のような強い拡散場の収縮の様子は見られず、可視化の図からも一部の高濃度が上方は移動している様子も確認された。

次の段階は確率的な拡散源特定手法の開発を行うことが目的である。