



大気環境アセスメントにおけるCFD
シミュレーション手法適用
- OpenFOAMの適用性 -

堀内健司(JIST)

背景

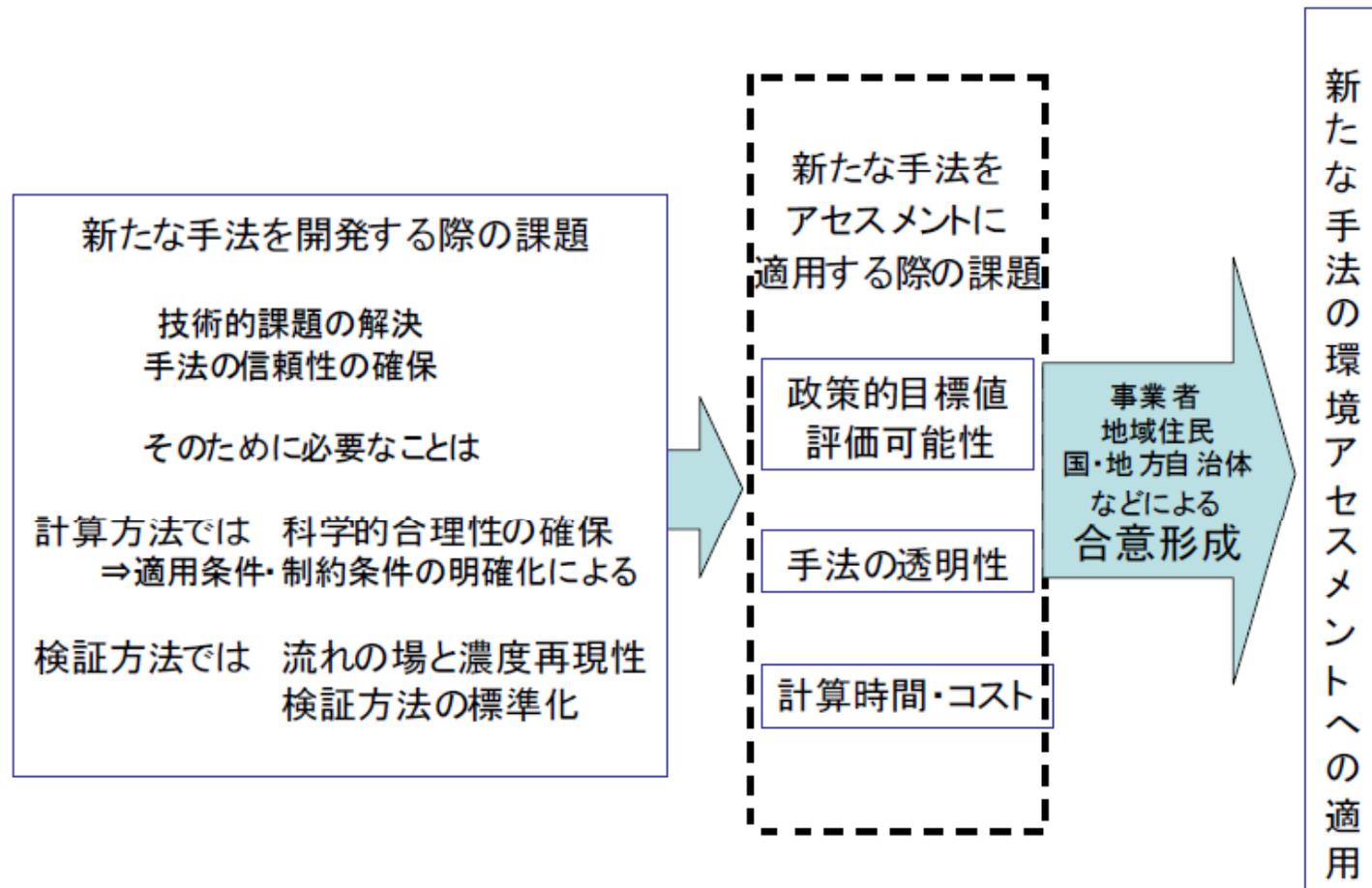
- 我が国の大気環境アセスメントにおける拡散予測モデルとしては、プルーム・パフモデルが実用的なモデルとして採用されている。1980年代初頭
- プルーム・パフモデルは平坦地形上でのモデルであるが、基本形を保ちつつ拡散幅や風速パラメータを地域特性や気象特性を考慮して設定することにより広範な条件における大気拡散予測モデルとして適用されてきている。
- 環境影響評価法の施行(1997年)によりアセスメントの周知方法が確立すると、環境アセスメントの技術的内容や知識の普及とともに、地域住民からの意見がアセスメントの実施に大きな役割を担うように変わってきている。
- 事業の推進には、開発時点からきめ細かな環境対応が必要となってきた。従来のプルーム・パフモデルでは扱えなかった発生源近傍の建屋や複雑地形上の濃度予測の必要性が高まってきた。
- このような状況のなかで、計算流体力学を応用した新たな拡散シミュレーションモデルの適用性を検討することとしている。

DiMCFD : Diffusion Model with Computational Fluid Dynamics

大気環境学会関東支部予測計画評価部会
CFDモデル環境アセスメント適用性研究会

解決すべき主な課題

- 環境アセスメントへ新たな手法を適用するまでに解決すべき主な課題



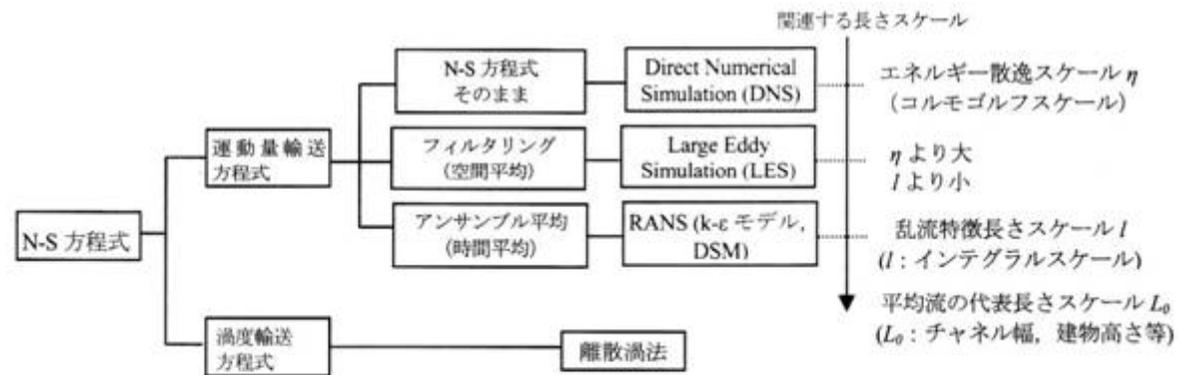
適用モデルの考え方

(1) DiMCFD モデルが計算対象とする事案を示し、それに対応する基本問題を設定し、その模範解を公表する必要がある。

(2) RANS に基づくモデルについてその限界を示し、適用してはいけない例と適切な例を挙げておく必要がある。

(3) モデルの誤差が大きい場合でもその誤差の傾向や安全率に関する情報を与えて条件付で使用できる場合についても示す必要がある。

乱流モデルと精度、コスト

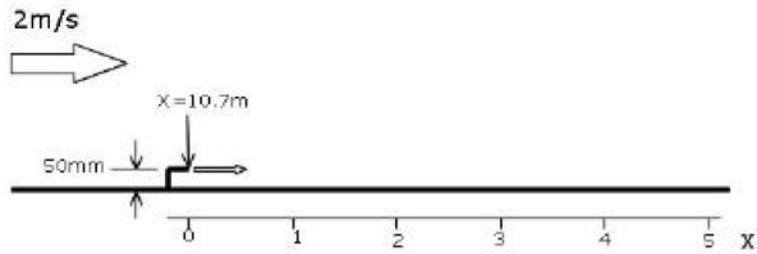


乱流モデルの区分の例

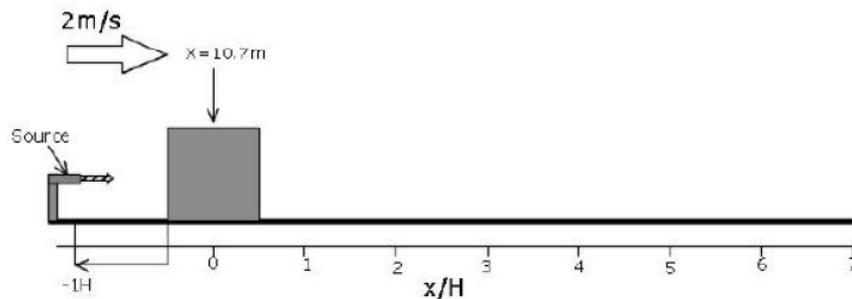
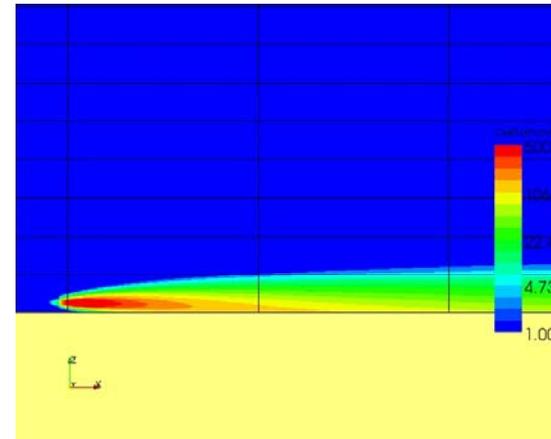
DiMCFDを用いる場合の精度、コストの目安

- 最大濃度とその発生位置の推定
- 影響評価に対応した数十ケースの計算が最大1ヶ月程度で終了する必要がある、1ケースの計算に最大1日程度。

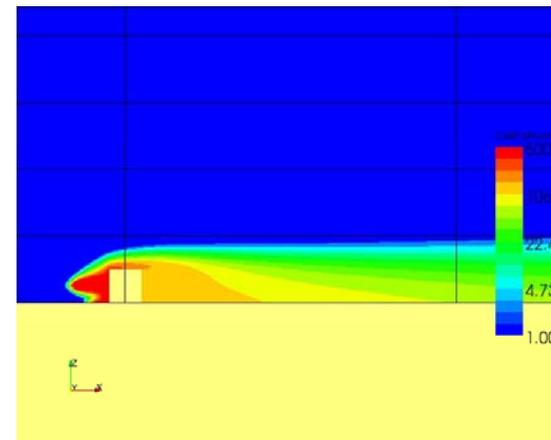
解析事例



比較対象風洞実験1：平板上実験



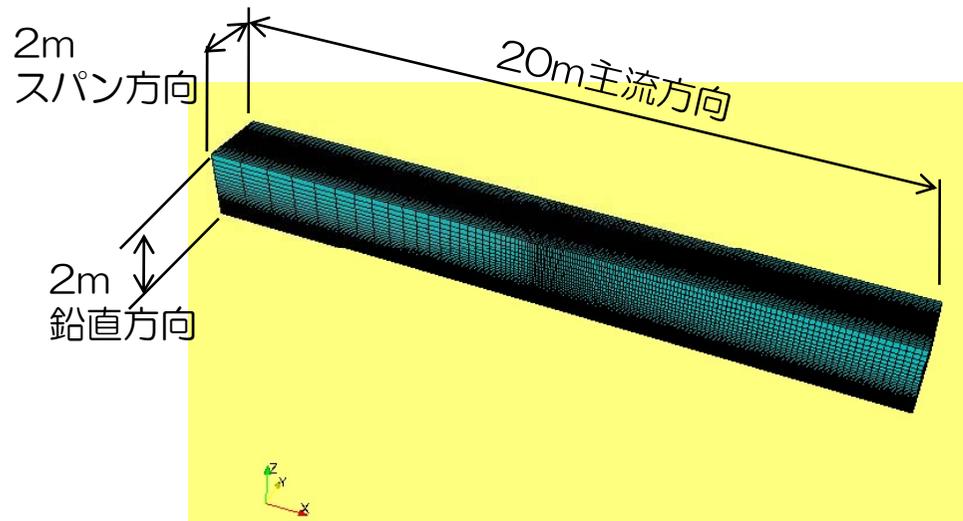
比較対象風洞実験2：立方体模型周りの実験



設定条件の概要(その1:平板時)

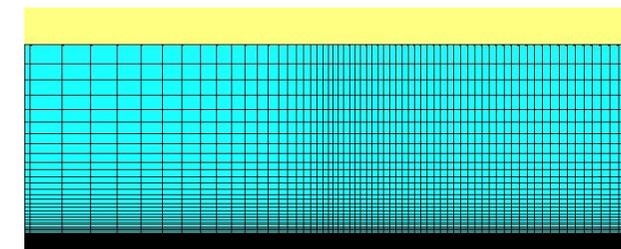
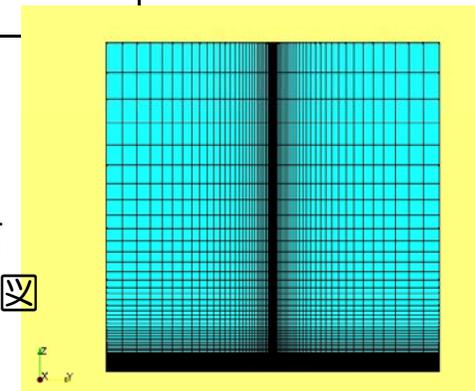
メッシュ条件

計算領域	20m (主流方向) × 2m (鉛直方向) × 2m (スパン方向) : 3D計算	
メッシュ	主流方向(x)	-10~0m、公比0.9091、32層、0~10m、公比1.013、99層
	スパン方向(y)	0~2m、公比0.908の中央折り返し、67層
	鉛直方向(z)	第1層~第26層 : 0.004m、第27層~第66層、公比1.102、66層
	合計	約58万メッシュ



(a) 計算メッシュ全体図

(b) y-z断面
メッシュ状況図



(c) x-z断面メッシュ状況図
発生源(x=0m)付近

設定条件の概要(境界条件)

境界	条件	設定値	
上流側	流入	風速	高度0.5mで2.138m/s べき数 $\alpha=1/7$
		乱流条件	風洞実験による k , 建築学会式 ε
下流側	流出	-	
上空	滑り壁	-	
地表面	壁面	粗度長	0.0001m
スパン 方向境界	対称	-	

【 k, ε の流入条件】建築学会式

・ u の鉛直分布

$$u(z) = u_s \left(\frac{z}{z_s} \right)^\alpha$$

u_s : 基準高さ z_s における風速

α : べき指数

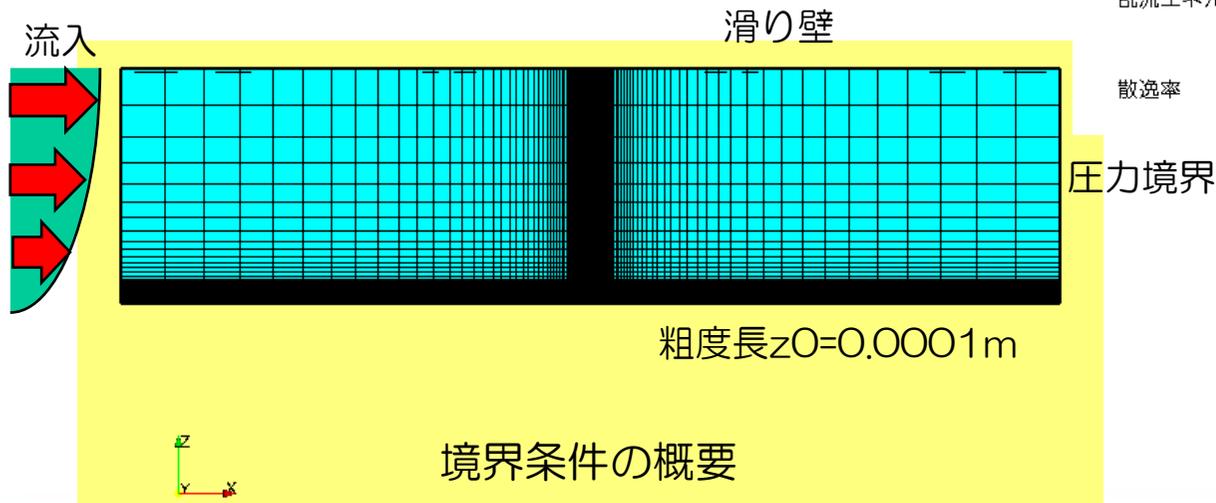
・ k, ε

乱れの強さ $l(z) = \frac{\sigma_u(z)}{u(z)} = 0.1 \left(\frac{z}{z_G} \right)^{(-\alpha-0.05)}$

z_G : 上空風高度、 σ : 風速変動の標準偏差

乱流エネルギー $k(z) = \frac{\sigma_u^2(z) + \sigma_v^2(z) + \sigma_w^2(z)}{2} \cong \sigma_u^2(z) = (l(z) \cdot u(z))^2$

散逸率 $\varepsilon(z) = C_\mu^{1/2} k(z) \frac{u_s}{z_s} \alpha \left(\frac{z}{z_s} \right)^{(\alpha-1)}$



境界条件の概要

設定条件の概要(発生源条件)

1. 3 発生源・拡散条件

風洞実験のガス放出高さ 50mm から以下のメッシュに発生源を設定した。

	x(m)	y(m)	z(m)
① 発生源メッシュ	10~10.05	-0.002~0.002	0.048~0.052
② 排出量	116cc/min		

拡散条件として、シュミット数(Sc)を発生源からの風下距離(x)を基に、以下の近似式にて変化させるものとした。なお、シュミット数の上限値は 8.5、下限値は 0.7 とした。

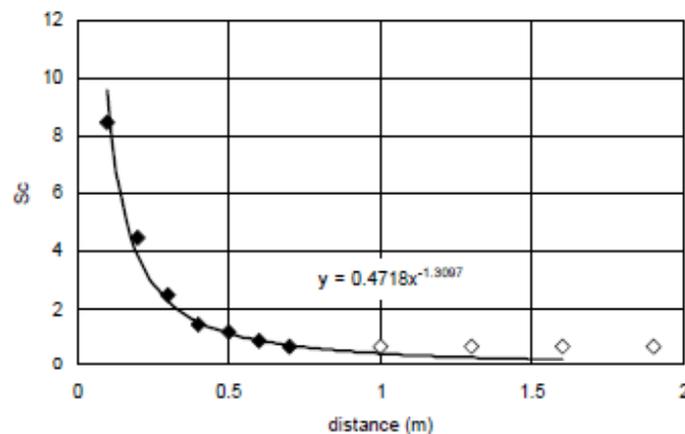


図1 風下距離とシュミット数の設定

流れ場解析の比較例

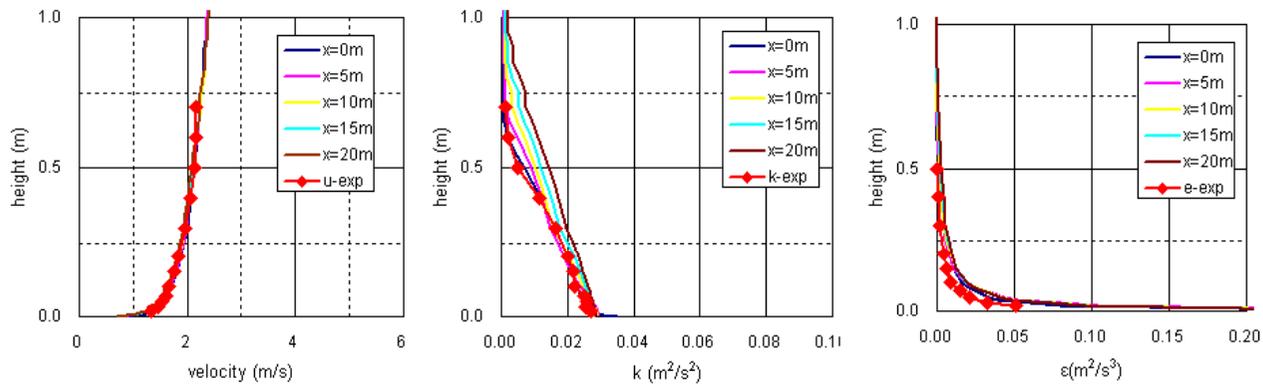


図2 流れ場再現結果の例(市販ソフト)

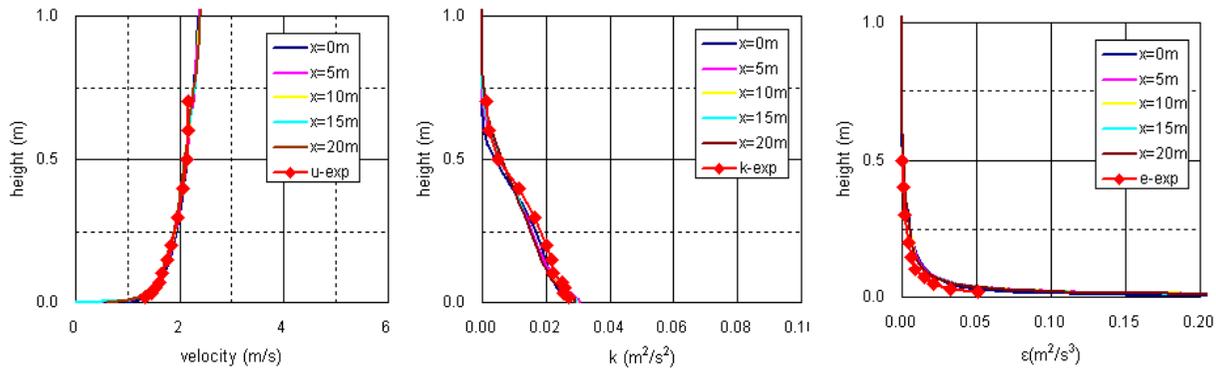
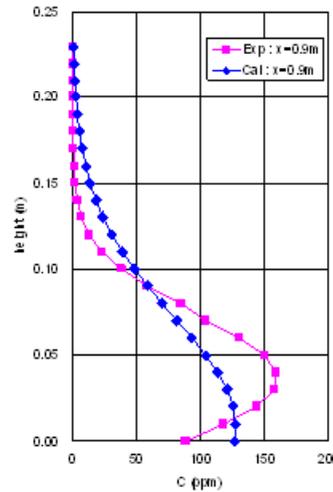
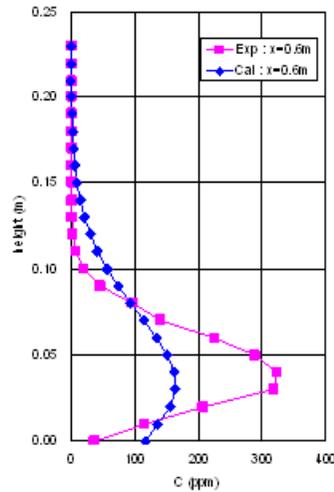
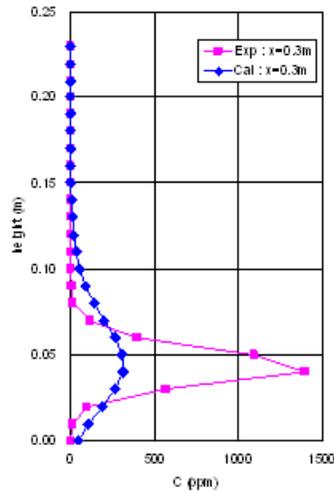
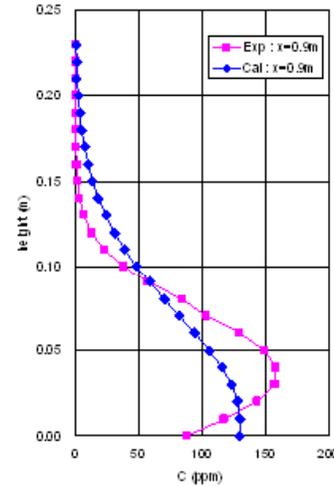
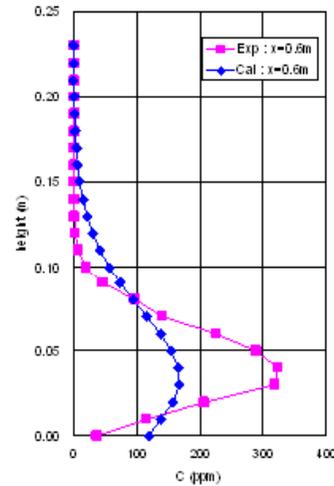
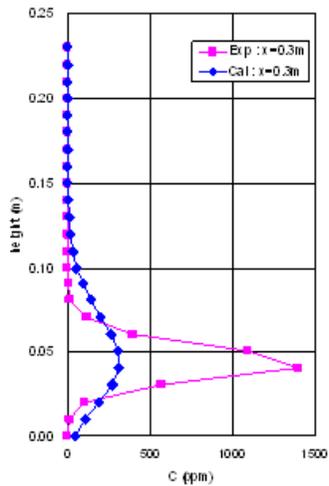


図3 流れ場再現結果の例(OpenFOAM)

拡散場解析結果の例(鉛直分布、 Sc 一定)



市販ソフト



OpenFOAM

拡散場解析結果の例(鉛直分布)

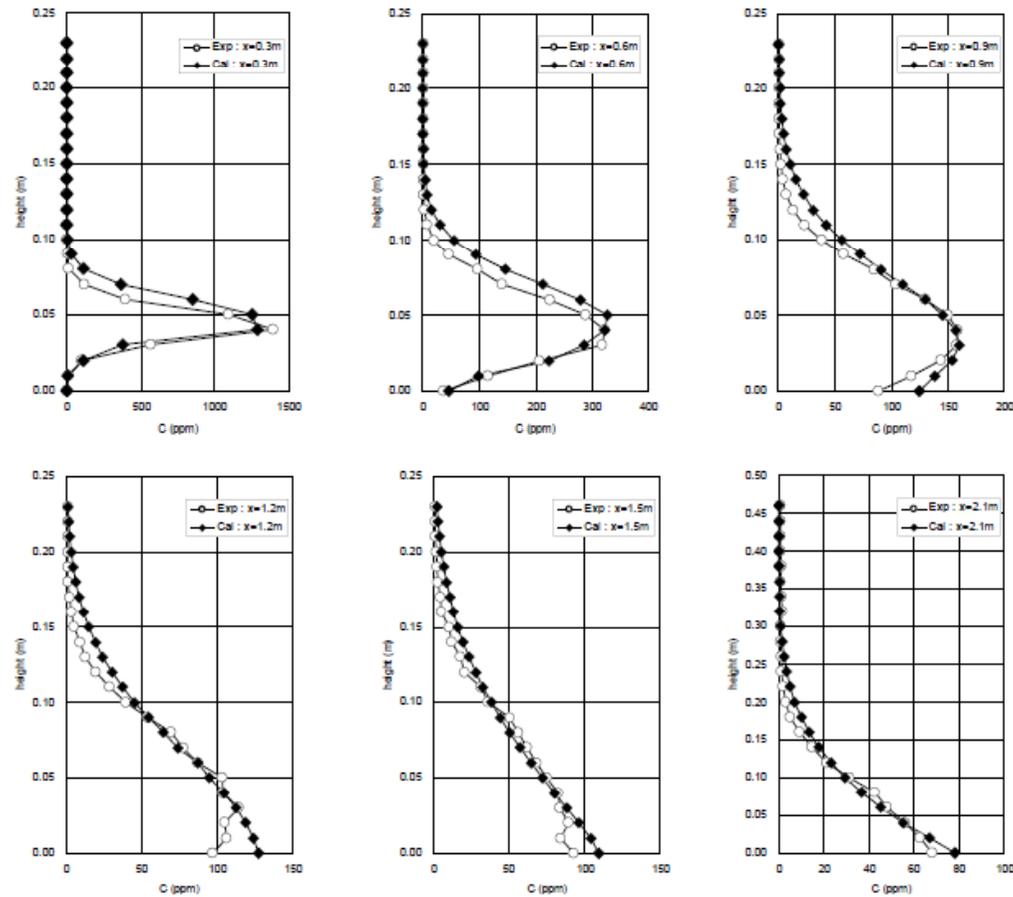


図4 拡散場再現結果の例(OpenFOAM、鉛直濃度分布、Sc補正)

拡散場解析結果の例(水平分布)

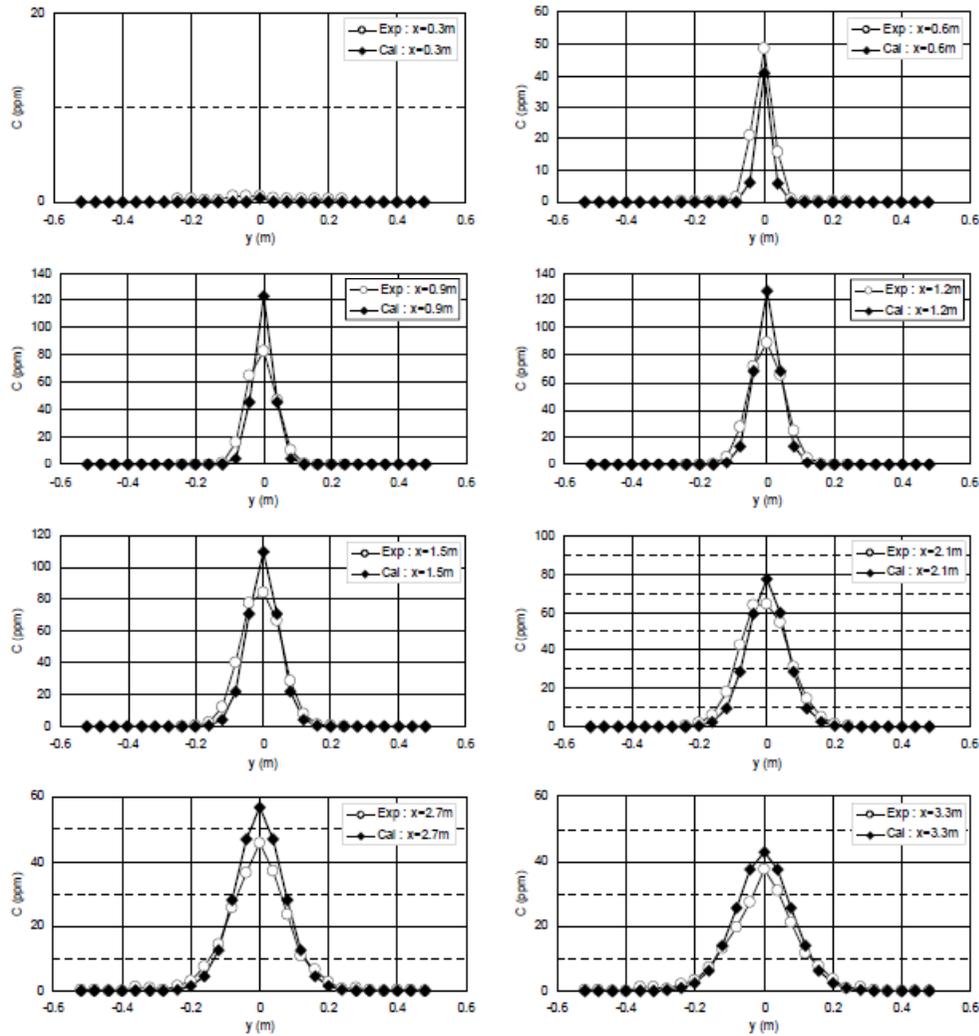
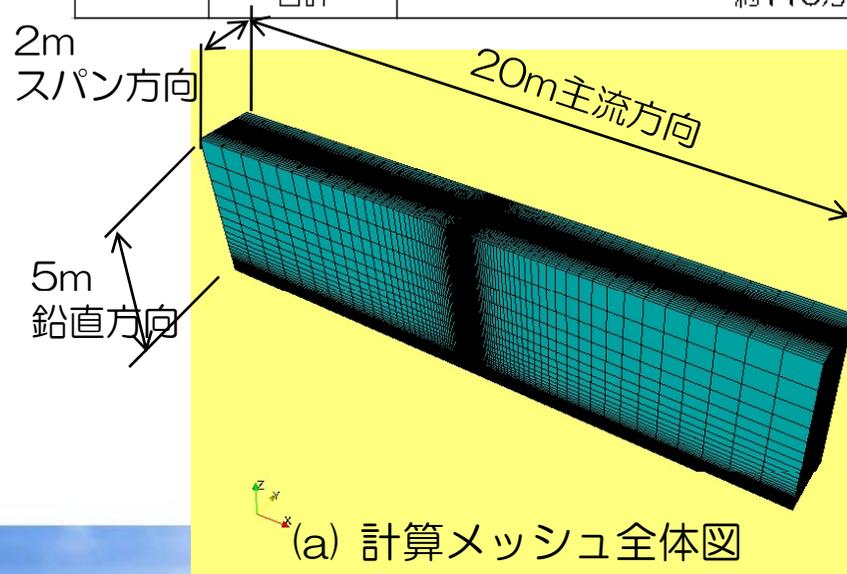


図5 拡散場再現結果の例
(openFOAM、水平濃度分布、 Sc 補正)

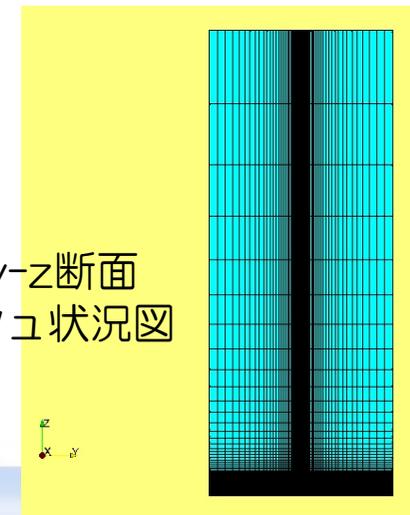
設定条件の概要(その2:立方体模型設置時)

メッシュ条件

計算領域	20m (主流方向) × 5m (鉛直方向) × 2m (スパン方向) : 3D計算								
メッシュ	x軸(主流方向)			y軸(スパン方向)			z軸(鉛直方向)		
	距離(m)	分割数	公比	距離(m)	分割数	公比	距離(m)	分割数	公比
	0.050	10	1.0	0.003	3	1.0	0.047	18	1.2, 1.2
	0.095	6	1.1	0.050	14	1.2, 1.1	0.053	6	1.0
	0.205	11	1.0	0.100	8	1.1	0.100	14	1.1
	3.000	32	1.1	1.000	22	1.1	0.198	12	1.1, 1.1
	10.000	12	1.1				0.202	1	1.0
							0.500	16	1.1
						5.000	16	1.2	
計	71	-		計	47	-	計	83	-
合計	約110万メッシュ								



(b) y-z断面
メッシュ状況図



設定条件の概要(境界条件)

境界	条件	設定値	
上流側	流入	風速	高度0.5mで2.138m/s べき数 $\alpha=1/7$
		乱流条件	風洞実験による k , 建築学会式 ε
下流側	流出	-	
上空	滑り壁	-	
地表面	壁面	粗度長	0.0001m
スパン 方向境界	対称	-	

【 k, ε の流入条件】建築学会式

・ u の鉛直分布

$$u(z) = u_s \left(\frac{z}{z_s} \right)^\alpha$$

u_s : 基準高さに z_s における風速

α : べき指数

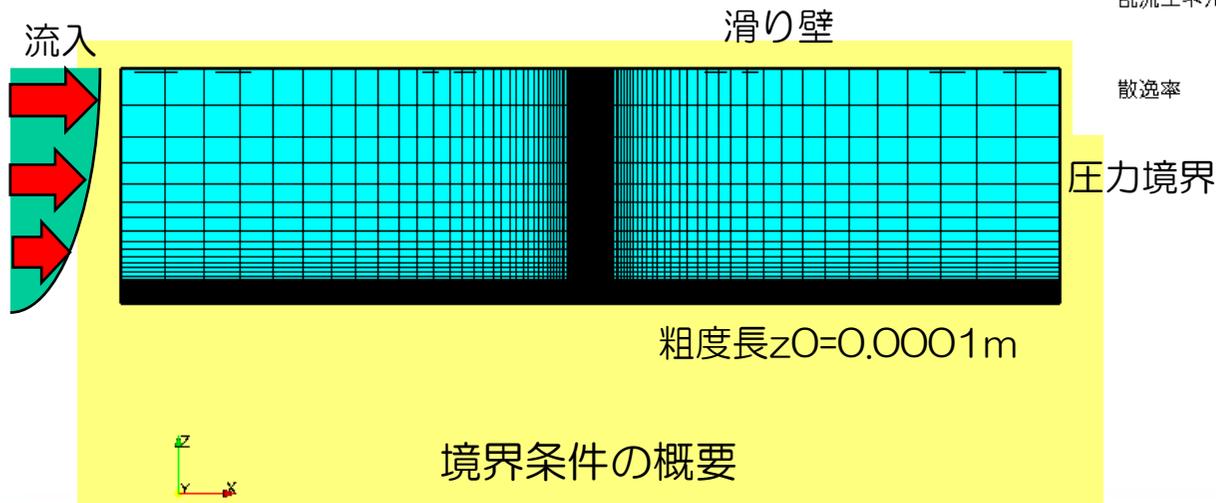
・ k, ε

乱れの強さ $l(z) = \frac{\sigma_u(z)}{u(z)} = 0.1 \left(\frac{z}{z_G} \right)^{(-\alpha-0.05)}$

z_G : 上空風高度、 σ : 風速変動の標準偏差

乱流エネルギー $k(z) = \frac{\sigma_u^2(z) + \sigma_v^2(z) + \sigma_w^2(z)}{2} \cong \sigma_u^2(z) = (l(z) \cdot u(z))^2$

散逸率 $\varepsilon(z) = C_\mu^{1/2} k(z) \frac{u_s}{z_s} \alpha \left(\frac{z}{z_s} \right)^{(\alpha-1)}$



境界条件の概要

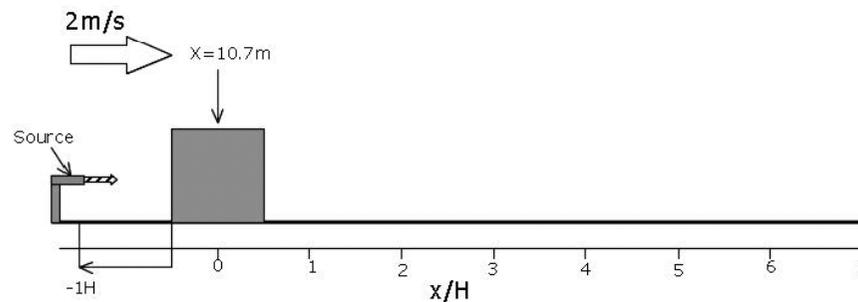
設定条件の概要(発生源条件)

立方体模型時発生源設定

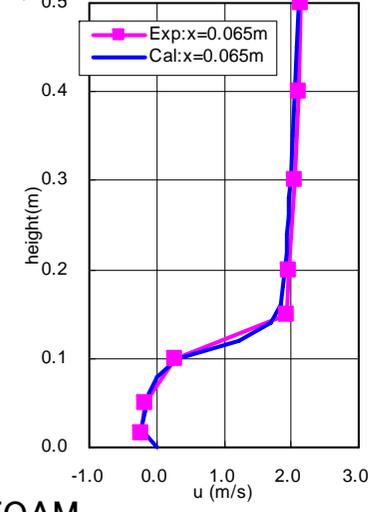
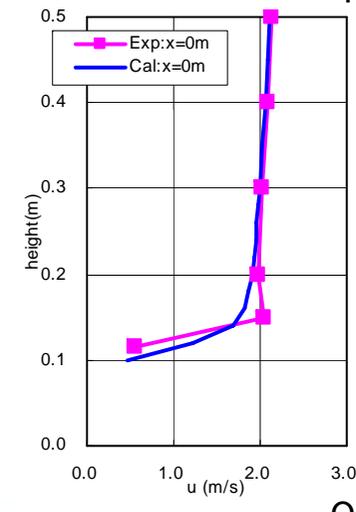
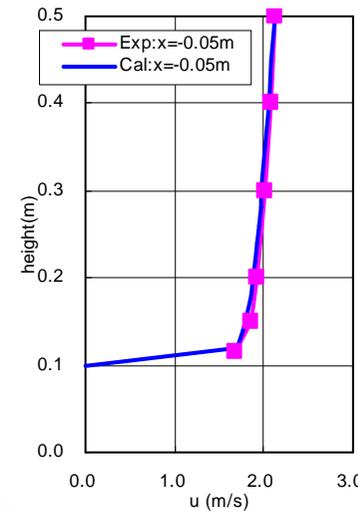
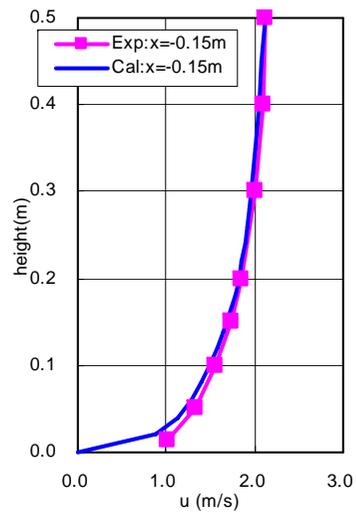
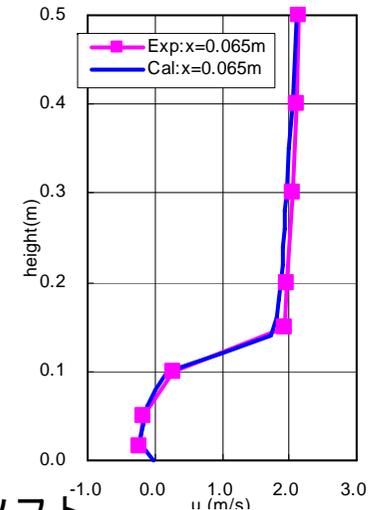
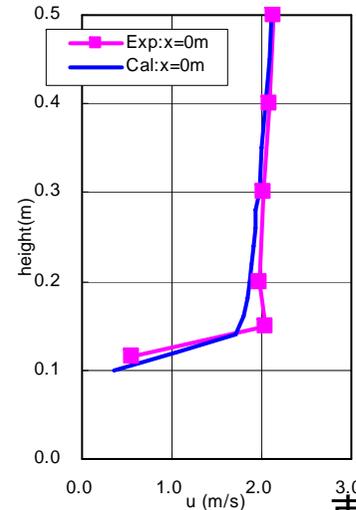
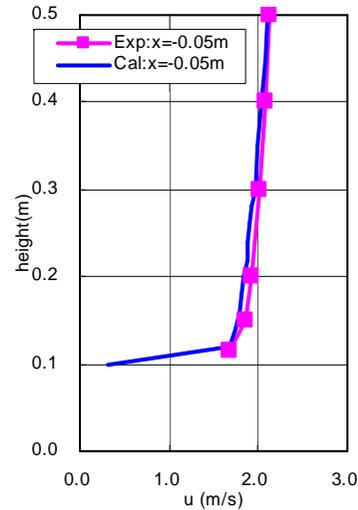
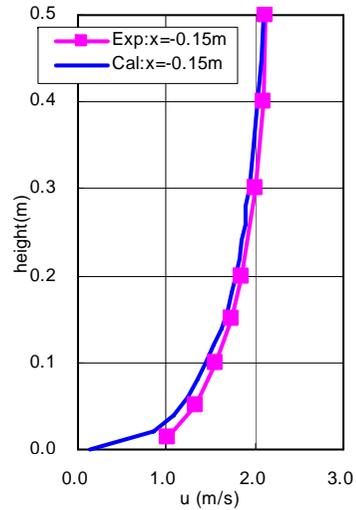
風洞実験のガス放出高さ 50mm から以下のメッシュに発生項を設定した。

(前方 1 H からの放出による実験を対象)

	x(m)	y(m)	z(m)
① 発生源メッシュ	-0.15~-0.139	-0.002~0.002	0.048~0.052
② 排出量	101.6cc/min		



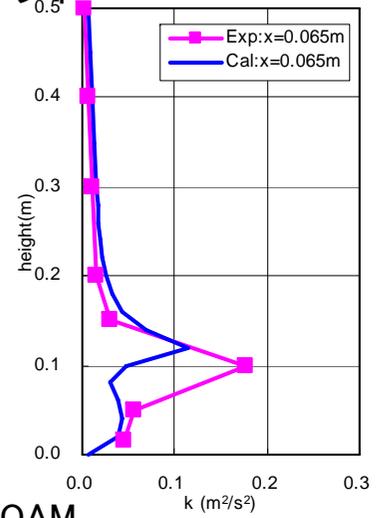
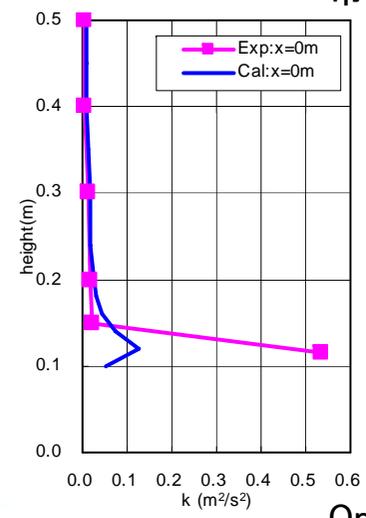
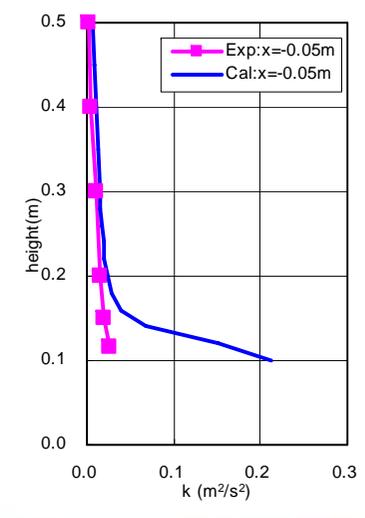
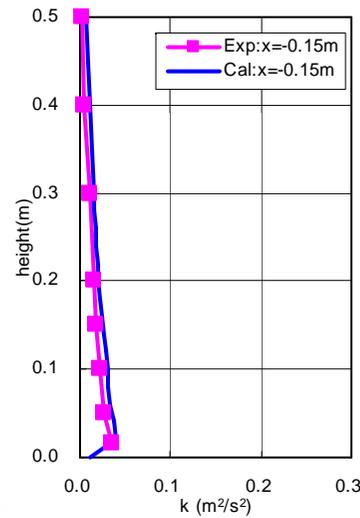
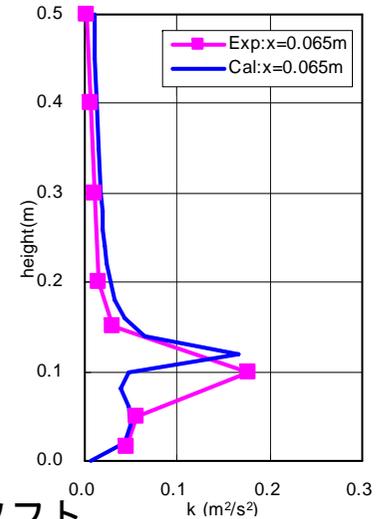
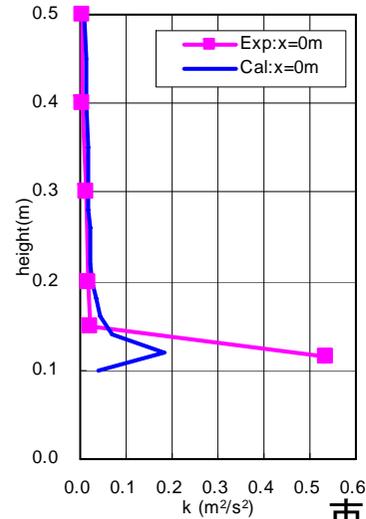
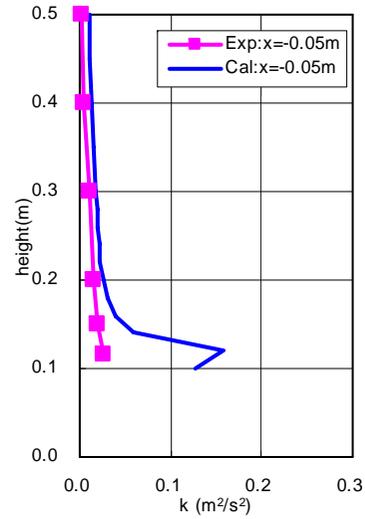
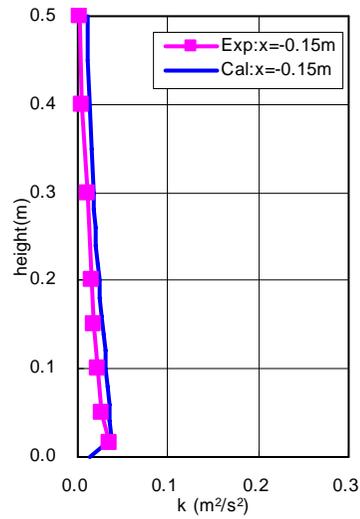
流れ場解析結果の例(u)



市販ソフト

OpenFOAM

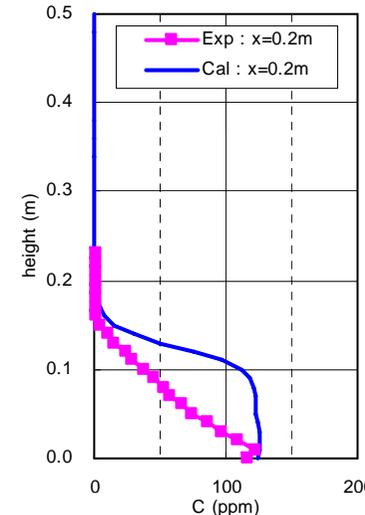
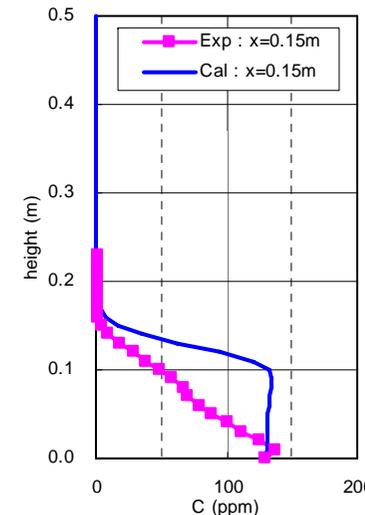
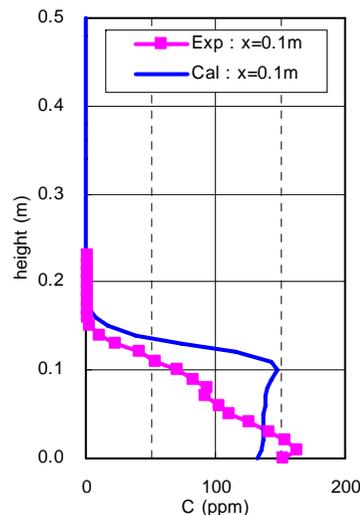
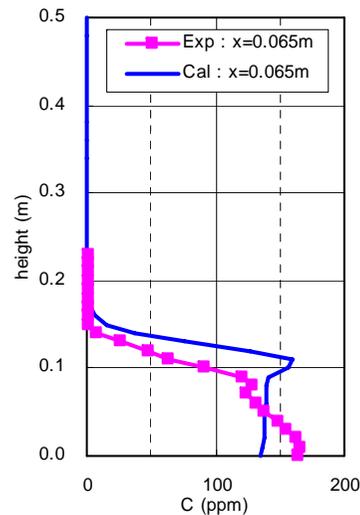
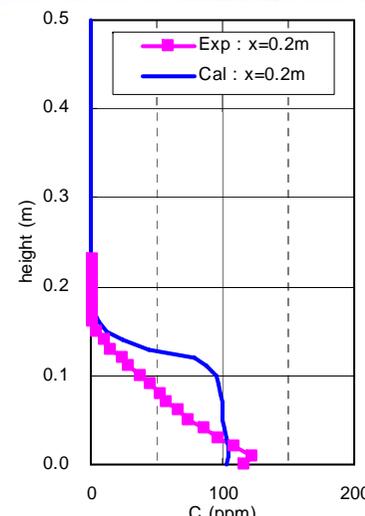
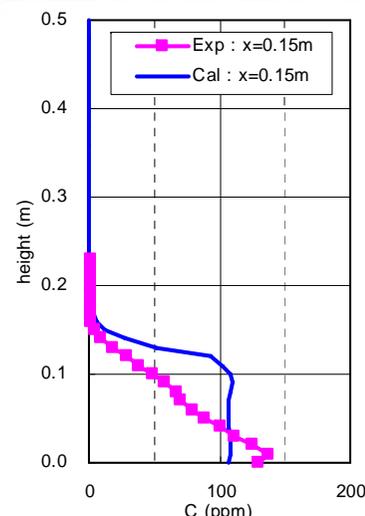
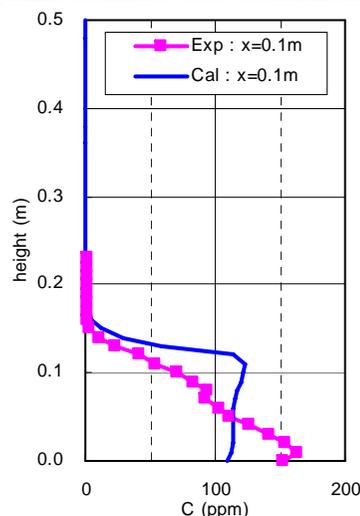
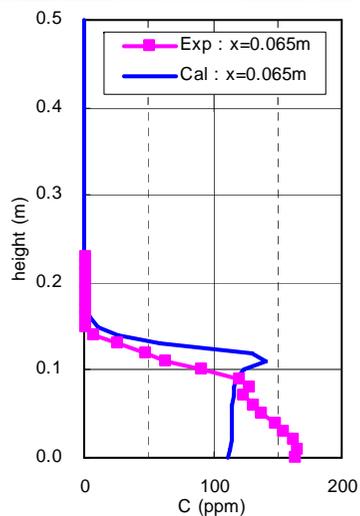
流れ場解析結果の例(k)



市販ソフト

OpenFOAM

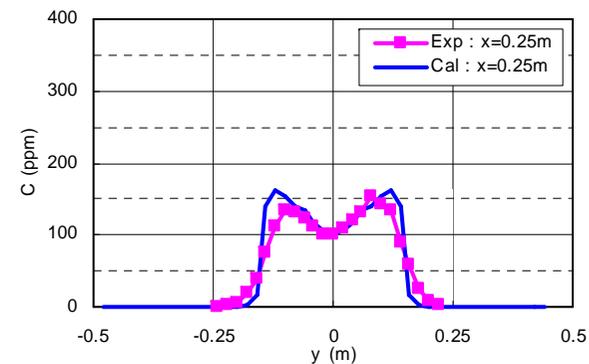
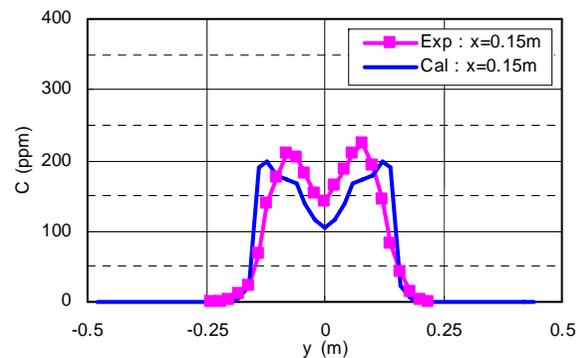
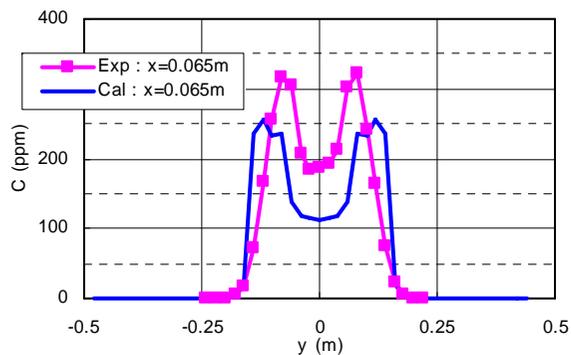
拡散場解析結果の例(鉛直分布、 $Sc=0.9$)



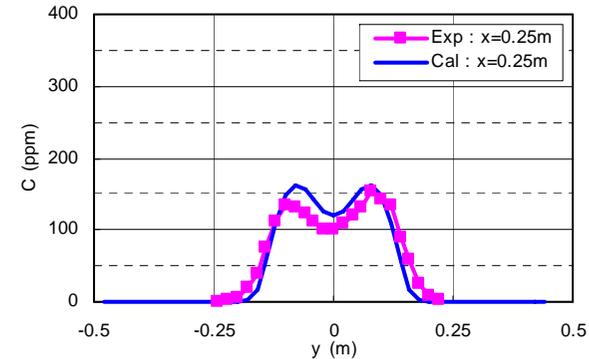
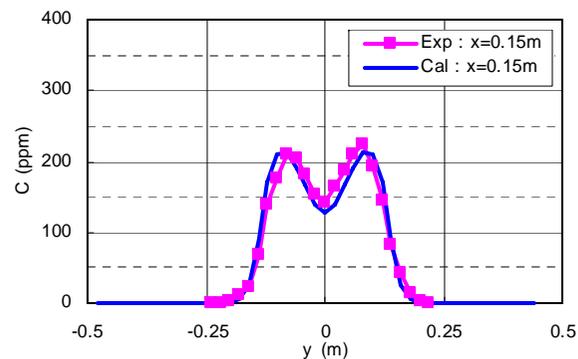
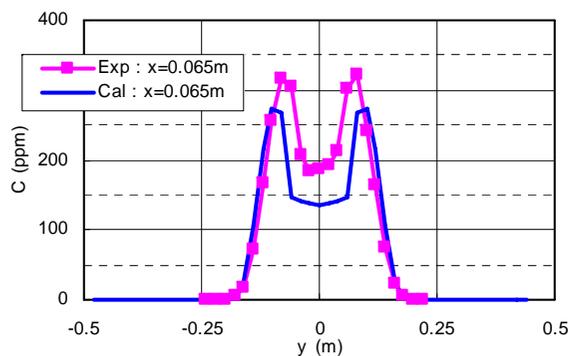
市販ソフト

OpenFOAM

拡散場解析結果の例(水平分布、 $Sc=0.9$)



市販ソフト



OpenFOAM

まとめ

1. 大気環境アセスメントにおけるCFDシミュレーションソフトとして市販のソフトウェアパッケージと同様にOpenFOAMの適用性があることが分かった。
2. また、オープンソースである利点を生かすことにより幅広く対応が可能であることも明らかとなった。
3. 計算の収束性は、市販のソフトよりも劣る場合がある。安定的なスキームにて場を作り、その後所定のスキームにするなど、複雑な流れ場のような場合は注意が必要である。
4. メッシュ作成は、OpenFOAMに付帯したものがツールがあるが、複雑なメッシュ作成は、市販のメッシュ作成ソフトではないとできない場合がある。

参考資料：「CFDモデルによる大気環境アセスメントガイドライン作成に向けた試算と考察(中間報告)」、大気環境学会関東支部予測計画評価部会CFDモデル環境アセスメント適用性研究会、2009年3月