

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19510035

研究課題名（和文）CFDを用いた大気環境影響評価手法の標準化に関する研究

研究課題名（英文）STUDY ON STANDARDIZATION FOR THE ASSESSMENT IN ATMOSPHERIC ENVIRONMENT USING CFD MODELS

研究代表者

北林 興二 (KITABAYASHI KOJI)

工学院大学 機械システム工学科

研究成果の概要：

Computer Fluid Dynamics(CFD)モデルは、近年の計算機科学の発展に伴い汎用ソフトとしていろいろな分野へ応用されている。大気環境影響評価においても応用される例が増えてきているが、その使用に対するガイドラインが無く、結果の信頼性に問題が残っている。本研究では大気環境学会関東支部予測計画評価部会の下に「CFDモデル環境アセス適用研究会」を設け、CFDモデル相互の比較や風洞実験データベースとの比較を通してCFDを大気環境影響評価に用いる際の問題点を整理しガイドラインを検討した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学、環境影響評価・環境政策

キーワード：CFD、大気環境影響評価、風洞実験

## 1. 研究開始当初の背景

大気拡散は、大気中での物質の拡散と平均濃度分布を記述する学問分野として発展し、1960-70年代の公害の被害が甚大であった時期に定常ガウス分布型モデル(プルーム式、パフ式)を用いる手法が一応の完成を見た。この手法は時間・空間的に定常・一様を仮定したモデルであり、平坦地における年間平均濃度などの長時間平均濃度の予測や記述には適している。一方でこの手法は、複雑地形や建物近傍など、流れの複雑なところで起こる拡散を記述できないなどの難点があり、また、平坦地形上においても昼間日射により暖め

られた陸上に発達する対流境界層中では、大気拡散は鉛直方向に非対称的に起こり(Willis and Deardorff, 1978)、定常ガウス型分布モデルでは記述できないことなどが指摘されている。このような複雑な場に起こる大気拡散について、近年CFD(数値流体力学)モデルを用いた手法がいくつか提案されてきている。しかしながら多くの場合これらのCFDによる手法は、実際に大気中で得られたデータではなく、機械工学的に決められた乱流パラメータを用いるものが多いので、そのまま適用すると大きな誤差が生じることも知られている(Hanna et al., 2004)。また、提

案されているモデルや汎用ソフトウェアには細かい差異が非常に多く、そのような手法それぞれが気拡散の記述に適しているのか明確にされていない。

## 2. 研究の目的

本研究においては、実用的な応用を考慮する観点から、特にRANS(Reynolds Averaged Navier Stokes方程式)系のCFDモデルを中心にCFDモデルの問題点を整理するとともに、過去のフィールド実験データベースや風洞実験結果を補いながら、CFDモデルによる汎用的でより正確な気拡散を記述する手法を整理する。CFDモデルは原理的には定常ガウス分布型モデルが必要とする定常性や一様性などの束縛条件を必要としないため、応用範囲が大変広い。ここでは、対象物質としては定常ガウス型分布モデルが対象としてきた非反応性で密度が大気とほぼ同じガスの拡散の問題を考える。ただし計算対象としてはやや複雑な場である、単体の建物周辺および盛土道路周辺の拡散を対象とする。

計算結果に大きな影響を与えると考えられる項目について、CFDモデルを使用している研究者・事業者の研究協力者として参加してもらい、同じ条件でCFDモデルを走らせることにより比較実験を行い、モデルによる細かい差異や、風洞実験との比較に際し許容できる結果の範囲について検討を行う。

風洞実験では産業技術総合研究所(産総研)の温度成層風洞を用いて、建物や沿道周りの基本的な拡散データを取得する。ここでのCFDモデル使用に際する目標の一つは、やや複雑な流場における拡散の記述においてそのパフォーマンスが既存のガウス分布型モデルよりもよくなることである。このため、定常ガウス分布型モデルを基礎に構築されており、上記のようなやや複雑な場における拡散も対象としている経済産業省のMETI-LIS (Ministry of Economy, Trade and Industry-Low rise Industrial Source dispersion Model) との比較を行う。

## 3. 研究の方法

大気環境学会関東支部予測・計画・評価部会の下に「大気環境アセスメントにおけるCFDシミュレーション適用性研究会」を設け、メンバーがそれぞれのCFDを持ち寄って同じ問題に対する計算を実施し、その差異を検討した。また、

- 1) 平坦地形上の煙突からの拡散
- 2) 単体ビルまわりの流れとビルに付随する煙突からの拡散
- 3) 盛土道路からの線源拡散

について産総研で風洞実験を実施し、実験データベースを作成した。1), 2)についてはCFDモデル計算結果を比較してCFDモデル計算の

特徴を明らかにした。これらの結果から、実際の気環境影響評価にCFDモデルを用いる場合のガイドライン、注意点等をまとめた。

## 4. 研究成果

### (1) 平板上の煙突からの拡散

19年度は、大気環境学会関東支部予測計画評価部会の下に「CFDモデル環境アセス適用研究会」を設け、6回研究会を行った。この中で、実用的CFDはRANS型であり、特に多くの汎用ソフトで使用可能な標準k-ε型乱流クロージャータを用いた手法について検討することとした。

5つの異なるソフトウェアで平坦地、地上源で計算し、Pasquill-Giffordのチャートと比較した。ただし、上流側条件として、風速分布と地表面粗度は共通とした。その結果、風速分布の風下方向への変化は計算方法が異なっても大きな差異はなかったが、乱流エネルギーk、逸散率εの鉛直分布とそれらの風下方向への変化ともに相互に全く異なる結果となった。また拡散幅もそれぞれ異なっていた。

流れの場の計算における不一致の原因を明らかにするために、新たな条件として上流側の運動エネルギー・逸散率εの分布も共通に与え、煙源高度30mとして再計算することにした。その結果、設定条件を変えて計算しても、モデルによる風速分布の風下方向への変化には大きな差異はないものの、やはり乱流エネルギーk、逸散率εの鉛直分布、それらの風下方向への変化はそれぞれのソフトウェアで全く異なる結果となった。

各ソフトウェアでデフォルトとして用いられている物性値、壁関数をチェックし、壁関数を滑面の条件とし、かつ、格子条件をそろえて計算し、比較することとした。その結果、流れの場については平均風速、k、εとも結果はほぼ許容できる範囲内に収まった。

滑面で計算結果がほぼ一致したことにより、次に適当な粗度を地表面に与えて計算することとした。その結果、粗度の条件と流入境界の風速分布の条件により、地表面から発達する乱流と、境界から流入する上空の乱流がマッチングしない状態(非平衡状態)が長距離にわたって存在していること、また、そのような非平衡状態で拡散計算を始めている可能性が高いことがわかった。非平衡状態を流入境界から短い距離内にとどめるには地表面粗度と風速分布、境界層高度の三者はリンクさせておくことが必要である。また、流入条件および格子条件を建築学会ガイドブック(日本建築学会, 2007)に沿って設定することによって、粗度のある場合の乱流場の計算結果はどのモデルでも一致する結果となった。

次に産総研の温度成層風洞を用いて過去に実施した風洞内で平板上での拡散実験(煙源高さ5cm)のデータベースを用いて、CFDによ

る再現性を検討した。この実験では風速勾配のベキ数が1/7となるように、測定洞の入口に乱流生成素子を設置し、床面には何もおかない状態で風速の1/7乗則が満たされる状態を設定してある(図1)。この条件で得られた風洞内の乱流エネルギーの計測値、レイノルズストレス値および相似則から得られた粘性消散率をCFDモデルの上流側流入条件とした計算を実行した。ただし、スケールは風洞実験のスケールをそのまま用いた。

結果は、流れ場についてはモデルによらずほぼ実験結果を再現することがわかった。ただし、鉛直方向の拡散幅の再現性については、煙源からの距離が短くなるとシュミット数を0.7~0.9とするとオイラー型拡散計算では拡散幅を過大評価する結果となった(図2)。一方、ラグランジュ型拡散計算では鉛直拡散幅は再現可能の結果となった。オイラー型計



図1 1/7ベキ乗則で測定した際の産総研温度成層風洞内部。

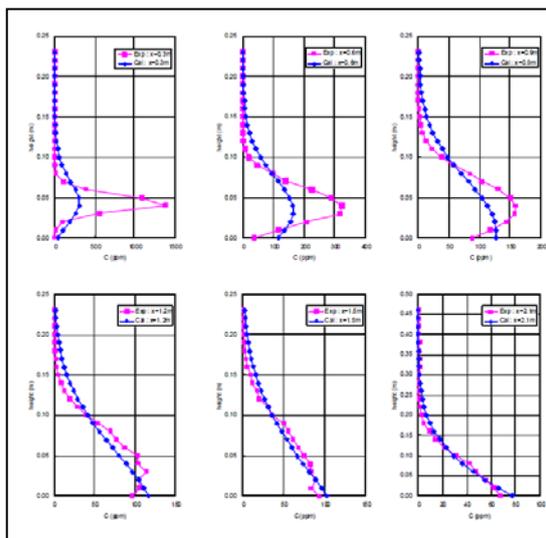


図2 平板拡散計算の煙軸上鉛直濃度分布図。CFDモデルは比較計算参加者の1つ(STAR-LT)。

算で風洞実験の結果を煙源から0.3mの位置で再現するためには、シュミット数を4程度

にする必要が示された。

## (2) 立方体周辺の拡散

障害物として「立方体」がある場合の風洞実験結果の再現性を検討した。新たに一辺が $H(=10\text{cm})$ の単一立方体周りの流れと立方体上流側1H、高さ0.5Hに煙源を置いた拡散に関する風洞実験を産総研温度成層風洞を用いて実施した(図3)。この風洞実験に対応する流体・拡散計算を各機関で実施した。この場合、立方体をまわる3次元な風が生成されるが、拡散計算の結果には計算スキームへの依存性が現れた。計算結果によれば、立方体がある場合の流れの場については今までの他のCFD研究者による $k-\epsilon$ モデルの結果と類似していることが確認できた。ただし、この結果は必ずしも風洞乱流を再現しているということを意味しない。

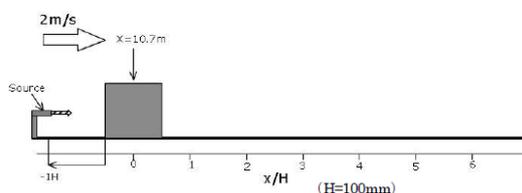


図3 立方体周辺の拡散実験時の煙源と立方体の位置関係。立方体は風洞測定洞入り口より10.7mに設置。

次に、立方体の前方に煙源(立方体の半分の高さ)をおいた場合の鉛直方向の拡散について複数のソフトウェアで計算し比較した。オイラー型拡散計算によるモデル相互の違いは小さいが、風洞実験と比較すると、結果は立方体の後流側2H程度までは実験値よりピーク濃度が低い傾向が得られた。しかし、地上での水平方向拡散については濃度分布形が類似していた。ラグランジュ型拡散計算では鉛直方向拡散はオイラー型計算結果と異なっていたものの、風洞結果と比較する限りではオイラー型計算結果との優劣は付けがたい。水平方向拡散ではオイラー型と類似した結果となった。

立方体後流域での地上濃度について、既存のプルーム・パフ型拡散計算方法に地形特性を加えたMETI-LISの結果と比較したところ、CFDによる拡散計算の方が再現性が高い結果が得られた。

## (3) 道路沿道の拡散

実際の地形や発生源条件を検討する第1歩として盛土上の自動車専用道路について風洞実験による流体・拡散実験データベースの作成を産総研温度成層風洞を用いて行った。この自動車専用道路は田園地帯に盛り土を約5m積んだ幅約50mの片側2車線の自動

車専用道路である。この道路に直交する風向、および 45 度の斜行風について、道路の中央分離帯からトレーサガスを放出した拡散実験を行った。安定度は中立条件で行った。濃度測定値の鉛直断面図を図 4 に示す。

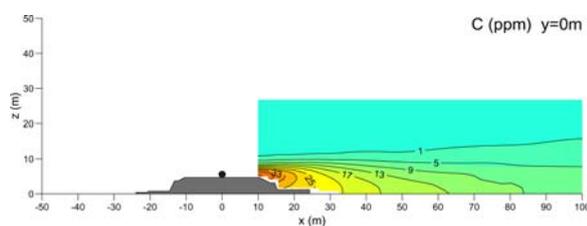


図 4 盛土自動車専用道路中央分離帯からの拡散実験結果（風洞）

#### (4) まとめ

大気環境学会関東支部予測・計画・評価部会では以上の結果を含む内容をまとめて「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」として 2009 年 3 月に中間報告書を作成した。これらの活動を通し、

①使用する CFD ソフトの設定が、適用する大気環境影響評価に適したものになっているかの確認が必要。

②計算格子、k,e を含む流入境界条件、表面の境界条件を一致させれば市販の汎用ソフトの計算結果は標準 k-e モデルについてはほぼ一致する。

③風洞実験との比較により、拡散に特有なオイラー型モデルの誤差が明確になった。

④誤差は必ずしも小さくないが、立方体後流側の拡散計算の CFD モデルによる結果は既存改良ガウス分布型モデルの結果よりは誤差が小さい。

ことが明らかとなった。

#### (5) 参考文献

Hanna, S. R., O. R. Hansen and S. Dharmaram, 2004: FLACS CFD air quality model performance evaluation with Kit Fox, MUS T, Prairie Grass, and EMU observations. *Atmospheric Environment*, **38**, 4675-4687.

日本建築学会, 2007: 市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブック, 丸善, p.207

Willis, G.E. and J.W.Deardorff, 1978: A laboratory study of dispersion from an elevated source in a convective mixed layer. *Atmospheric Environment*, **12**, 1305-1313.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 9 件)

①飯塚悟、近藤裕昭、Large-Eddy Simulation による平板境界層中の拡散解析、第 4 回 CFD

モデル適用性研究会、2007 年 7 月 12 日、東京

②飯塚悟、前山徳久、近藤裕昭、堀晃浩、武藤勝彦、坂本重次、水野健樹、Wind-tunnel and CFD studies on gaseous diffusion from a stack attached to a building、12<sup>th</sup> International Conference on Wind Engineering、2007 年 7 月 5 日、ケアンズ、オーストラリア

③千葉康礼、北林興二、A numerical simulation of tracer gas diffusion in a real street canyon in Tokyo、14<sup>th</sup> World Congress on Clean Air and Environment、2007 年 9 月 10 日、ブリスベン、オーストラリア

④近藤裕昭、富塚孝之、飯塚悟、The influence of a large-scale polluted air mass on pollution in an urban street canyon、AWAS08、済州島、2008/05

⑥飯塚悟、近藤裕昭、武藤勝彦、堀晃浩、北林興二、水野建樹、A wind-tunnel study on gaseous diffusion around a building within two different atmospheric boundary layers、AWAS08、済州島、2008/05

⑦飯塚悟、A wind-tunnel study on gaseous diffusion around a building within two different atmospheric boundary layers、第 49 回大気環境学会年会、特別集会 3、大気環境アセスメントにおける CFD シミュレーションの手法適用性、2008/9/18、金沢大学

⑧近藤裕昭、都市街区外からストリートキャニオンへの汚染物質の輸送過程の数値シミュレーション、第 49 回大気環境学会年会、2008/9/17

⑨近藤裕昭、堀内健司、平野米子、前山徳久、尾形和彦、飯塚悟、水野建樹、Attempt to Make Guideline to use CFD Model for Atmospheric Environmental Assessment in Urban Area in Japan、ICUC7、横浜、2009/7/1.

[図書] (計 1 件)

①飯塚悟、近藤裕昭、気象研究ノート、LES の基礎、(社)日本気象学会、No.219、1-17、2008/11/21、166 頁

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

北林興二 (KITABAYASHI KOJI)

工学院大学 工学部 機械システム工学科・教授

研究者番号：90306895

(2) 研究分担者

近藤裕昭 (KONDO HIROAKI)

産業技術総合研究所 環境管理技術研究部

門・主幹研究員

研究者番号：60357051

飯塚 悟 (IIZUKA SATORU)

名古屋大学 環境学研究科・准教授

研究者番号：40356407

(3)連携研究者

なし