九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

実在市街地における浮力効果を考慮したガス拡散の 大規模数値予測

内田, 孝紀 九州大学応用力学研究所

荒屋, 亮 (株)環境GIS研究所

https://doi.org/10.15017/27125

出版情報:九州大学応用力学研究所所報. 142, pp.63-70, 2012-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University バージョン: 権利関係:

実在市街地における浮力効果を考慮した ガス拡散の大規模数値予測

内田 孝紀* 荒屋 亮**

(2012年1月31日受理)

HUGE COMPUTATION OF BUOYANT GAS DIFFUSION IN THE REAL CITY AREA

Takanori UCHIDA and Ryo ARAYA

E-mail of corresponding author: takanori@riam.kyushu-u.ac.jp

Abstract

In order to simulate unsteady three-dimensional airflow around urban city area with characteristic length scales of the order of kilometers, we have been examining the large-eddy simulation (LES) technique using a finite-difference method (FDM). In this paper, using the LES technique, we have performed the calculation of buoyant gas diffusion around real urban area with huge computational grids. The various patterns of gas diffusion are clarified, and airflow is also locally accelerated or decelerated, due to the topographic and the obstacle effects.

Key words : CFD, LES, GIS, Urban area, Gas diffusion, Buoyant effect, Huge computation

1. 緒言

我々の研究グループでは、RIAM-COMPACT®(リアムコ ンパクト)と称する数値風況予測技術(CFD)を開発している¹⁾. 現在では、九州電力グループの西日本技術開発(株),(株) 環境GIS研究所と開発コンソーシアムを作り、「実地形版 RIAM-COMPACT®ソフトウエア」と名付け、(株)産学連携機 構九州(九大TLO)の協力を受け、風力業界標準モデルの 一つとして広く普及に努めている.国内の風力事業者最大 手の(株)ユーラスエナジーホールディングス、電源開発(株), 日本風力開発(株)、エコ・パワー(株)、ミツウロコグリーンエネ ルギー(株)を含め、多数の導入実績を有する.

また同時に、大気環境アセスメントなどの分野を対象に、 地理情報システム(GIS)との親和性を深めた新しい数値風況 モデル(Airflow Analyst®, エアフローアナリスト)の開発も行 っている^{2,3}. 最大の特長は、建物群や地形などを意識せず に、任意形状物体周辺の気流場や拡散場の解析が可能で あることである. GIS上で流体解析を行う利点として、①GIS データとして普及している地形や建物などの既存の空間デ ータを、そのまま流体解析用の形状データとして利用できる 点、②建物形状、物体温度、拡散源などを指定する際、空 間データベースとして属性情報を簡易に設定できる点、③ 計算領域や格子条件を地図上で実際のスケールを確認し ながら直観的に行える点、④計算結果を、地図上に3次元 的に可視化し、他の空間情報と重ね合わせた空間的な解析 が可能である点、などが挙げられる. 従来、GISデータを用

** (株)環境GIS研究所

いて流体解析を行うCFDコードは幾つか存在した.しかしな がら、GIS上で格子生成から計算結果の可視化までの全て のプロセスを実行できるのは、Airflow Analyst®が世界初で ある.プラットホームとして、米国ESRI社が販売しているGISソ フトウエアArcGISの拡張モジュールとして開発を進めている. ArcGISは世界で最大のシェアを有するGISソフトウエアであ る.地図管理・表示機能に加え、多様な空間解析機能を有 しており、地理空間的な問題解決の支援ツールとして普及 している.筆者らは、計画者の意思決定や合意形成を支援 することを最大の目的として、CFDとGISの技術を融合させた Airflow Analyst®を開発した.Airflow Analyst®を用いること で、都市計画、建築、土木、防災、医療、エネルギーなど 様々な応用分野で気流場と拡散場を把握し、最適な意思決 定を行うことが可能になる.

本報では、Airflow Analyst®による浮力の効果を考慮した ガス拡散の大規模数値予測の事例を紹介する.

2. 数値計算手法

2.1 支配方程式など

数値不安定を回避し,複雑地形上の風の流れを高精度 に数値予測するため,一般曲線座標系のコロケート格子を 採用している.ここでコロケート格子とは,計算格子のセル中 心に物理速度成分と圧力を定義し,セル界面に反変速度 成分にヤコビアンを乗じた変数を定義する格子系である.数 値計算法は差分法(FDM)に基づき,乱流モデルとしてLES

^{*} 九州大学応用力学研究所

を採用する. LESでは流れ場に空間フィルタを施し、大小 様々なスケールの乱流渦を計算格子よりも大きなGS成分の 渦と、それよりも小さなSGS成分の渦に分離する. GS成分の 大規模渦はモデルに頼らず直接数値シミュレーションを行う. 一方で、SGS成分の小規模渦が担う、主としてエネルギー消 散作用は、SGS応力を物理的考察に基づいてモデル化され る. 流れの支配方程式は下記に示す通りである.

本研究の計算では,強風を対象にしているので,大気が 有する温度成層の効果は省略した.また,地表面粗度の影響は,地形表面の凹凸を高解像度に再現することで取り入 れた(水平解像度は数mオーダー).

計算アルゴリズムは部分段階法(F-S法)に準じ,時間進行 法はオイラー陽解法に基づく. 圧力に関するポアッソン方程 式は逐次過緩和法(SOR法)により解く. 空間項の離散化は 対流項を除いて全て2次精度中心差分とする. 対流項は3次 精度風上差分とする. ここで,対流項を構成する4次精度中 心差分は, 梶島による4点差分と4点補間に基づいた補間法 を用いる. 3次精度風上差分の数値拡散項の重みは,通常 使用される河村-桑原スキームタイプのα=3に対して,

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad -(1)$$

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \overline{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - Frc\delta_{i3}$$

$$-(2)$$

$$\frac{\partial \overline{c}}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \overline{c}}{\partial x_j} = \frac{1}{Re \Pr} \frac{\partial^2 \overline{c}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial h_j}{\partial x_j} \qquad -(3)$$

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2v_{SGS} \overline{S}_{ij} \qquad -(4)$$

$$v_{SGS} = (C_s f_s \Delta)^2 |\overline{S}| \qquad -(5)$$

$$\overline{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \qquad -(6)$$

$$|\overline{S}| = (2\overline{S}_{ij} \overline{S}_{ij})^{1/2} \qquad -(7)$$

$$\Delta = (h_x h_y h_z)^{1/3} \qquad -(8)$$

$$f_s = 1 - exp(-z^+ / 25) \qquad -(9)$$

$$h_j = -\alpha_{SGS} \frac{\partial \overline{c}}{\partial x_j} \qquad -(11)$$

$$Pr_{SGS} = 0.5 \qquad -(12)$$

$$Fr = -\frac{\left(\rho_s - \rho_a\right)}{\rho_a} \frac{Hg}{U^2} \qquad -(13)$$
$$Re = \frac{UH}{v} \qquad -(14)$$

α=0.5としその影響は十分に小さくする. LESのサブグリッド スケールモデルには標準スマゴリンスキーモデルを用いる. 壁面減衰関数を併用し,モデル係数は0.1とした.

境界条件の設定は下記に示す通りである. 流入境界面に は1/4~1/7乗のベキ法則に従う速度プロファイルを与える. 側方境界面と上部境界面は滑り条件, 流出境界面は対流 型流出条件とする. 地面には粘着条件を課した. 本研究に おける無次元パラメータはレイノルズ数Re(式(14)とフルード 数(式(13))である. 代表スケールの取扱いは図1に示す通り である. Hは計算領域の標高差, Uは流入境界面の最大標 高地点における風速, ν は動粘性係数である. 時間刻みは Δt=2×10⁻³H/Uとした.



2.2 地理情報システム(GIS)による格子生成

実在市街地の再現には,地形,建物,高速道路などの GISレイヤを用いた.地形には,国土地理院の発行する数値 地図5mメッシュ標高を利用した.

本研究では、福岡市街地を対象とした(図2を参照).よっ て、建物形状は福岡市の作成する都市計画基礎調査の現 況建物データを使用した.都市高速などの大規模な構造物 は、都市域の気流場に影響を与えるため、道路地図を参照 することでその位置と平面的な形状を取得し、現地写真から おおよその高さを設定した.なお、建物や土木構造物は、ポ リゴンと呼ばれる面構造の図形データとして作成し、属性と して「標高(m)」「高さ(m)」を与えた.都市高速など空中に 存在する構造物には、地面から構造物底面までの高さを 「オフセット(m)」として属性に与えた.建物データには、建 物階数が属性として入力されていたため、「建物階数×3m」 を建物高さとして計算で与え、標高は数値地図5mメッシュ標 高から自動的に取得した.





図2 実在市街地モデルの構築事例







図4 立方体モデルを対象にした計算領域と計算格子など

実際の格子生成は、Airflow Analyst®の格子生成機能を 用いて行う.ここでは、計算領域の原点、計算格子数、最小 格子幅、引き付け率、計算を行う風向、などを指定する.計 算領域は対話的に画面上に表示され、必要となる計算格子 数や格子解像度を確認しながら、微調整が可能である(図3 を参照).

計算領域の境界面(特に流出断面)において建物や地形 が分断されると、この付近の渦の再現に必要となる格子解像 度が不足し、計算が不安定になる場合がある.そのため、計 算領域の周囲に余白の領域、すなわち、袖領域を自動的に 付与する仕組みを設けている.袖領域ではGISデータの形 状を調整する作業は不要である.

ー連の計算条件などを設定し、システム上の計算開始ボ タンを押すと、計算に必要なファイル群が生成・保存され、 数値シミュレーションが開始される.

計算結果は、同じ地図上に可視化され、任意断面における非定常な気流場のアニメーション表示が可能である.また、 GISデータとして風速や風向などの数値を出力し、統計処理 や周囲の地物との空間的な解析も可能である.

3. 計算事例の紹介

ここでは,幾つかの計算事例を紹介する.最初に,単純な

	pJp.	Fr	Re
Case1 (重いガス)	1.7	+2.4	
Case2 (空気と同じ)	1.0	0	104
Case3 (軽いガス)	0.3	-2.4	

計算例... H=0.2(m), U=0.75(m/s)

 $Fr = -\frac{(\rho_{1}^{\prime} - \rho_{n})}{\rho_{n}} \frac{Hg}{U^{2}} = -\frac{(\rho_{1}^{\prime} - 1)}{(\rho_{1}^{\prime} - 1)} \frac{Hg}{U^{2}} = -\frac{0.7 \times 0.2 \times (-9.8)}{0.75^{2}} = +2.4, \quad Re = \frac{UH}{r} = \frac{0.75 \times 0.2}{1.5 \times 10^{16}} = 10^{4}$

表1 本研究で検討した浮カパラメータ(Fr数)など

地上構造物(立方体モデル)を対象にした計算結果を示す. 図4には,計算領域と計算格子などを示す.表1には,本研 究で検討した三種類の浮力パラメータ(Fr数)などを示す.

図5には、気流場の瞬間場(主流方向速度成分)を示す. この図から、立方体の背後に逆流域を含む複雑な乱流場が 形成されているのが観察される.

図6および図7には、浮力の効果を考慮した拡散場(瞬間 場および時間平均場)を示す.図6(a)と図7(a)に示す重いガ スの場合には、拡散物質は立方体モデルの近傍で停滞し ているのが分かる.図6(b)と図7(b)に示す空気と同じ比重の



場合には、拡散物質は立方体モデルの後方に広く拡散している.図6(c)と図7(c)に示す軽いガスの場合には、ガスは立方体モデルの屋根面高さよりも上昇し、そこから物体下流に拡散している.以上のように、浮力の効果により、拡散場の状況が異なる様子が明確に示された.次に、実在市街地を対象にした事例を示す.

図8には、本研究で作成した実在市街地モデルを示す. 同図には、拡散源、計算領域、計算格子数なども示す. 図9 には、三種類の比重の異なる拡散場(瞬間場)の可視化例を 示す.図6および図7で述べたように、浮力の効果により、物 質の拡がり方の状況が異なる様子が明確に観察される.

<u>拡散源</u> (小規模な爆発を想定し, 半径3mの球体)



Γ	格子数 301 (基本格子幅 2.5	m	固定幅 格子数 140 ←	格子幅 増加率 1.300 夫	備心格子 オフセット 0 ◆	計算領域幅 977.03 m
	301 🔿	2.5	m	140 🚓	1.300 🚖	0 🜲	977.03 m
CΓ	81	0.5	m	3 📤	1.100		300.00 m

図8 本研究で対象とした実在市街地モデル、計算領域と計算格子数など



(a)Case1 : Fr=+2.4 (重いガス)

Flow



(b)Case2 : Fr=0 (空気と同じ比重)

図9 実在市街地モデルを対象とした拡散場の可視化例,瞬間場(次頁へ続く)



(c)Case3: Fr=-2.4 (軽いガス) 図9 実在市街地モデルを対象とした拡散場の可視化例, 瞬間場

Flow

4. 結言

大気環境アセスメントなどの分野を主な対象に,数値 流体シミュレーション技術(CFD)と地理情報システム (GIS)との親和性を深めた,Airflow Analyst®(エアフロー アナリスト)と称する新しい数値流体モデルを開発した.

最初に、単純な形状を有する立方体モデルを対象に した計算を実施した.次に、実在市街地モデルへの適 用例を示した.全てのケースにおいて、浮力の効果によ り、拡散場の状況が異なる様子が明確に示された.これ らの結果により、我々が開発を進めるAirflow Analyst® (エアフローアナリスト)の有望性が客観的に示された.

参考文献

- T.Uchida and Y.Ohya, Micro-siting technique for wind turbine generators by using large-eddy simulation, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol.96, pp.2121-2138, 2008
- [2] 内田 孝紀,大屋 裕二,3次元数値モデルによる 九大新キャンパスの風況シミュレーション,九州大 学情報基盤センター年報,第2号,pp.99-106, 2002
- [3] 内田 孝紀,大屋 裕二,3次元数値モデルによる 九大新キャンパスの風況予測シミュレーション一第 2報建物群まわりの風環境予測一,九州大学情報 基盤センター年報,第3号,pp.57-66,2003