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
＊＊ (株)環境GIS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 $\alpha=3$ に対して，

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i}=0 \qquad -(1)$$

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t}+\overline{u}_j\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j}=-\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i}+\frac{1}{Re}\frac{\partial^2 \overline{u}_i}{\partial x_j \partial x_j}-\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}-Fr\bar{c}\delta_{i3} \qquad -(2)$$

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

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

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

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

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

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

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

$$h_j=-\alpha_{SGS}\frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} \qquad -(10)$$

$$\alpha_{SGS}=\frac{\nu_{SGS}}{Pr_{SGS}} \qquad -(11)$$

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

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

$$Re=\frac{UH}{\nu} \qquad -(14)$$

$\alpha=0.5$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 $\Delta t=2\times10^{-3}H/U$とした．

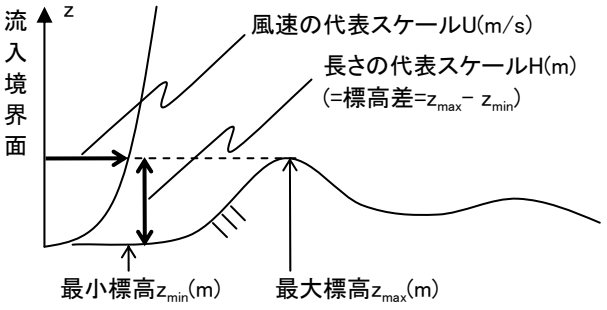


図1　本研究における風速および長さの代表スケールの取扱い

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．

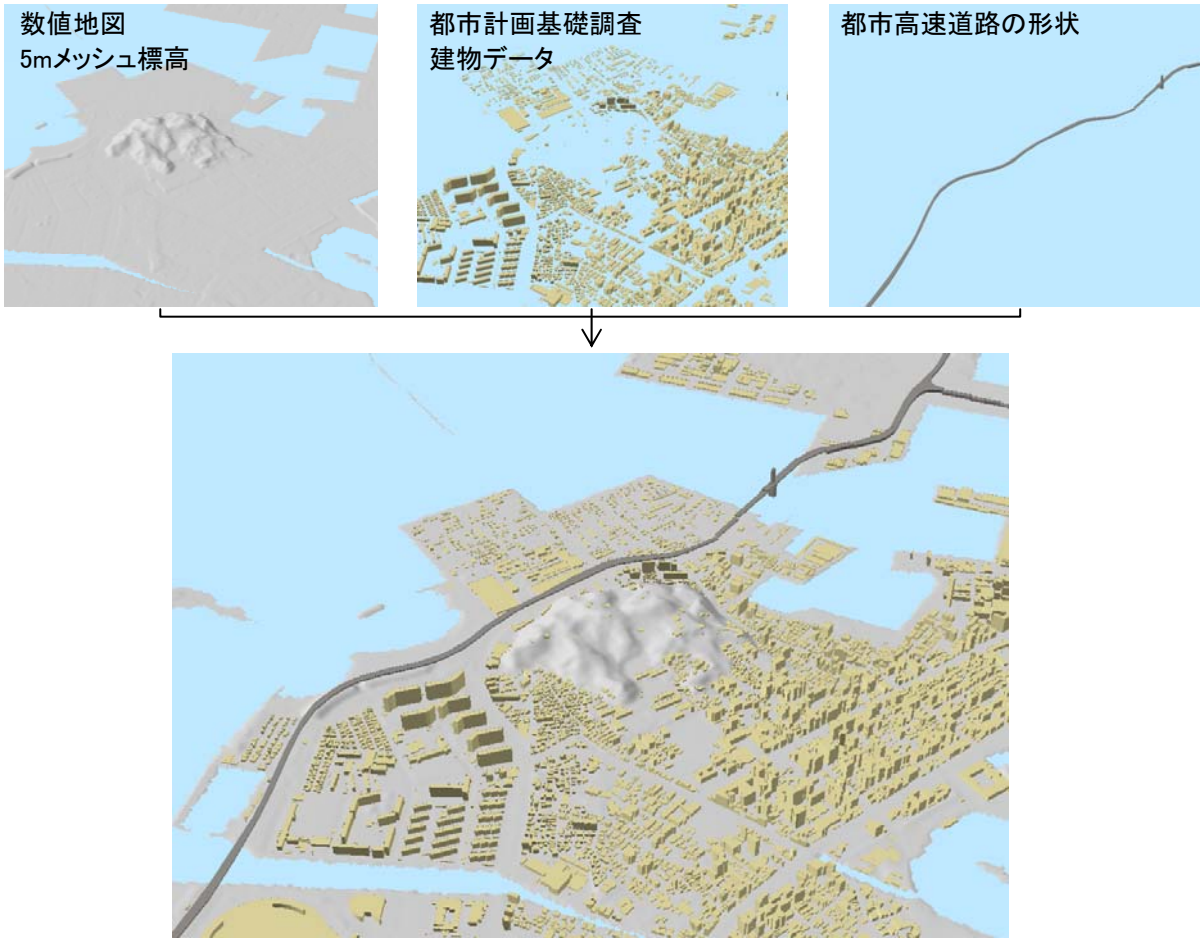


図2 実在市街地モデルの構築事例

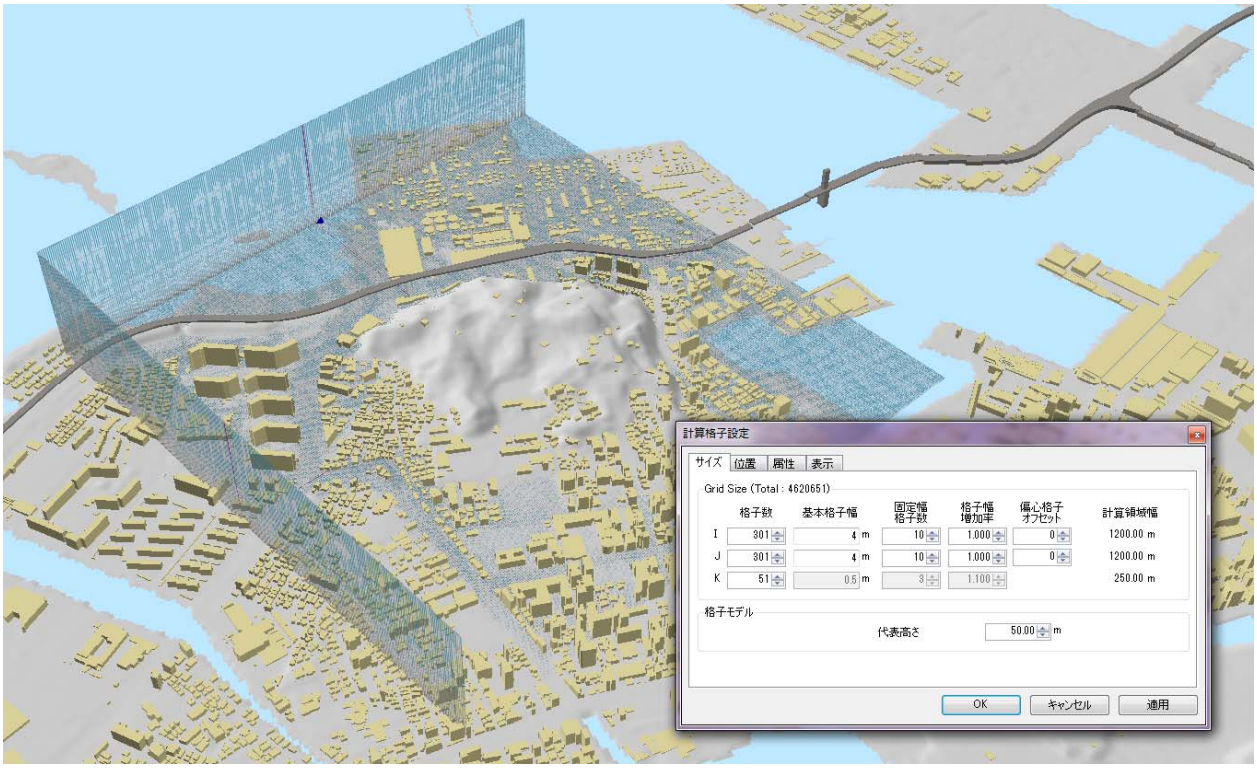


図3 Airflow Analyst®の格子生成の画面

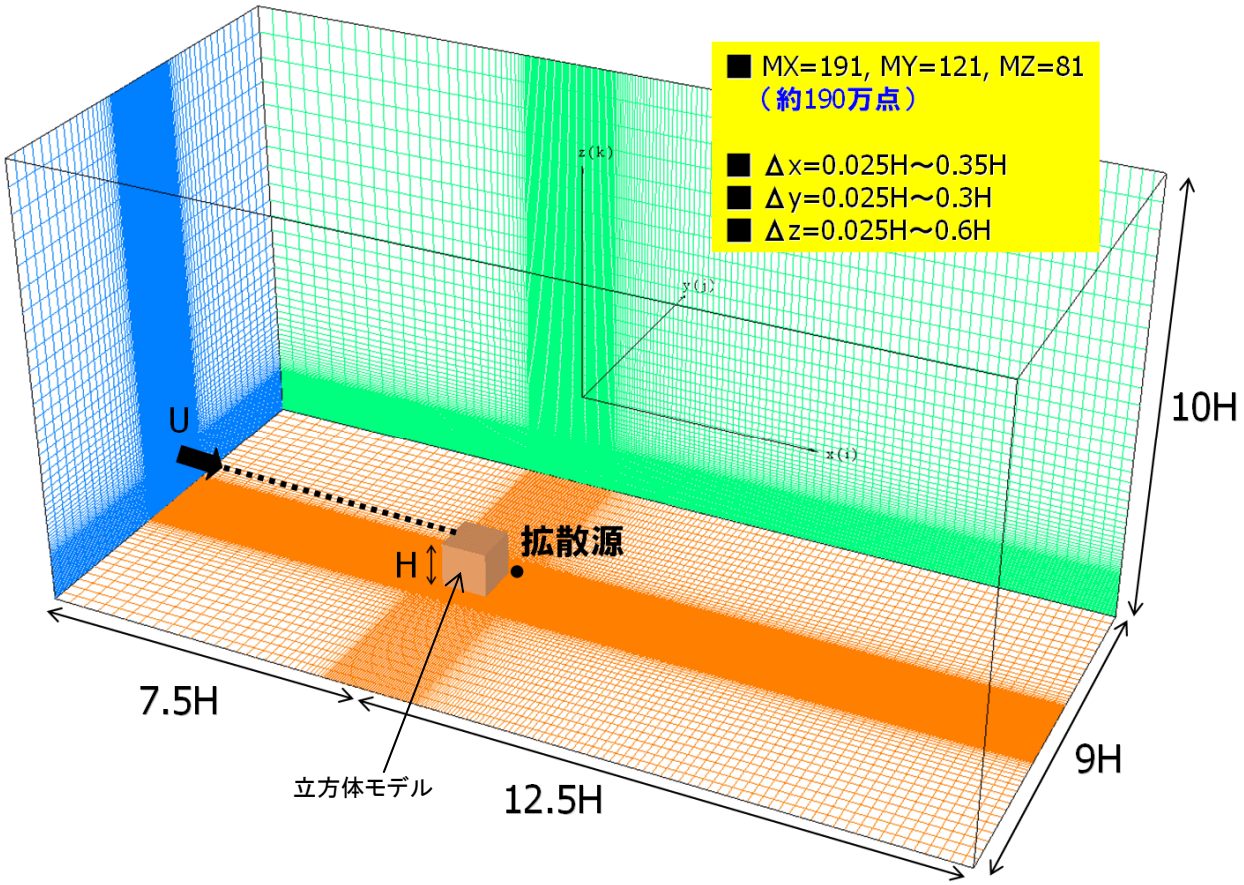


図4　立方体モデルを対象にした計算領域と計算格子など

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．

一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．

	ρ_s/ρ_a	Fr	Re
Case1 (重いガス)	1.7	+2.4	10^4
Case2 (空気と同じ)	1.0	0	
Case3 (軽いガス)	0.3	-2.4	

計算例. . .

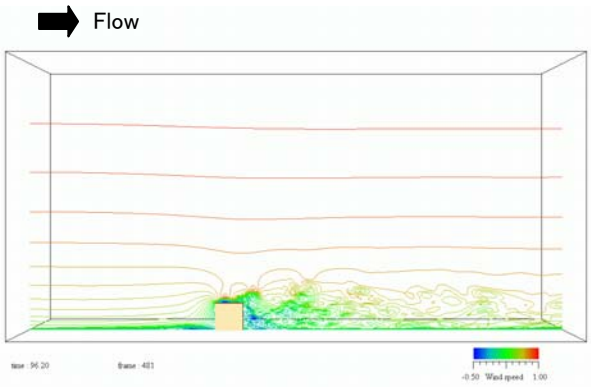
$H=0.2(m),\ U=0.75(m/s)$

$$Fr=-\frac{(\rho_s-\rho_a)}{\rho_a}\frac{Hg}{U^2}=-\left(\frac{\rho_s}{\rho_a}-1\right)\frac{Hg}{U^2}=-\frac{0.7\times0.2\times(-9.8)}{0.75^2}=+2.4,\quad Re=\frac{UH}{\nu}=\frac{0.75\times0.2}{1.5\times10^{-5}}=10^4$$

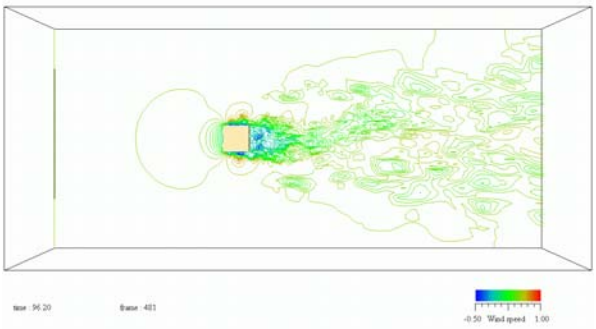
表1　本研究で検討した浮力パラメータ(Fr数)など

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

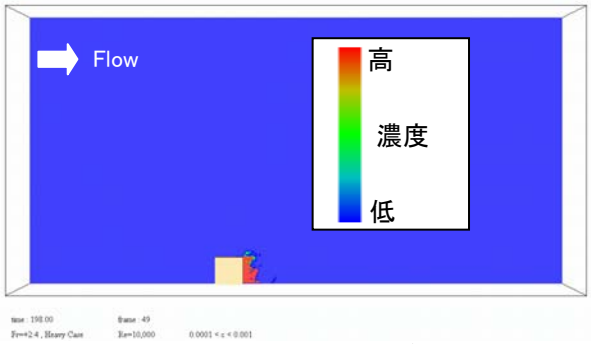


(a)鉛直断面内の主流方向速度成分の分布，y=0

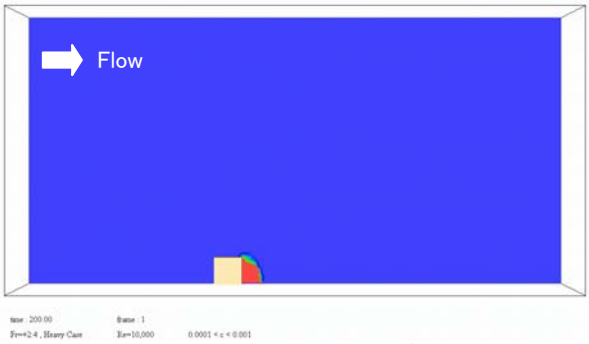


(b)水平断面内の主流方向速度成分の分布，z=0.5H

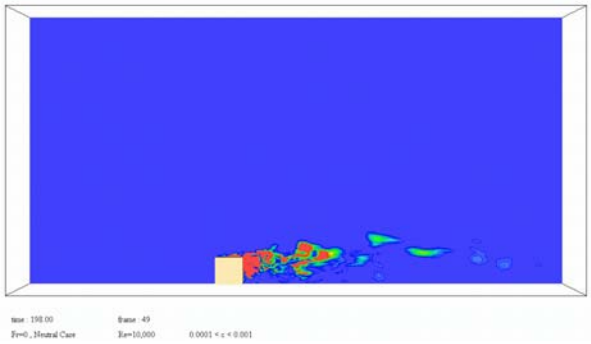
図5　立方体モデルを対象にした計算結果，気流場，瞬間場



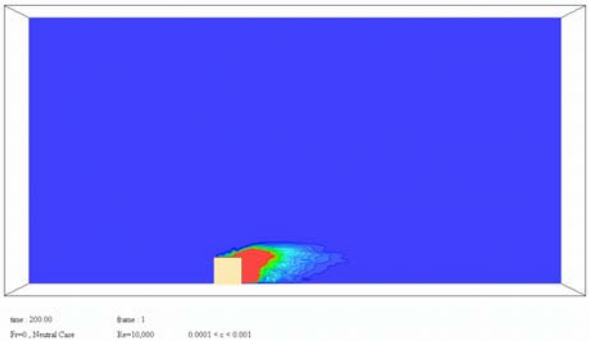
(a)Case1：Fr=+2.4（重いガス）



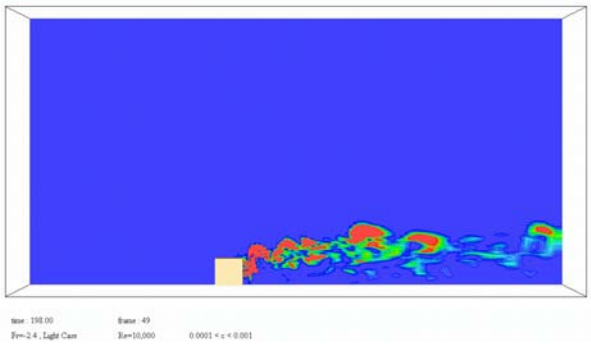
(a)Case1：Fr=+2.4（重いガス）



(b)Case2：Fr=0（空気と同じ比重）



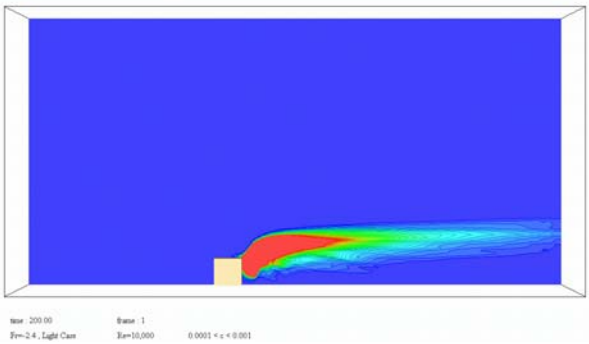
(b)Case2：Fr=0（空気と同じ比重）



(c)Case3：Fr=−2.4（軽いガス）

図6　拡散場，瞬間場，y=0

- 気流場の計算結果(無次元時間t=100)を初期値に，t=100～200の拡散場の計算を実行．



(c)Case3：Fr=−2.4（軽いガス）

図7　拡散場，時間平均場，y=0

- 気流場の計算結果(無次元時間t=100)を初期値に，t=100～200の拡散場の計算を実行．
- t=100～200の時間平均場の表示

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．

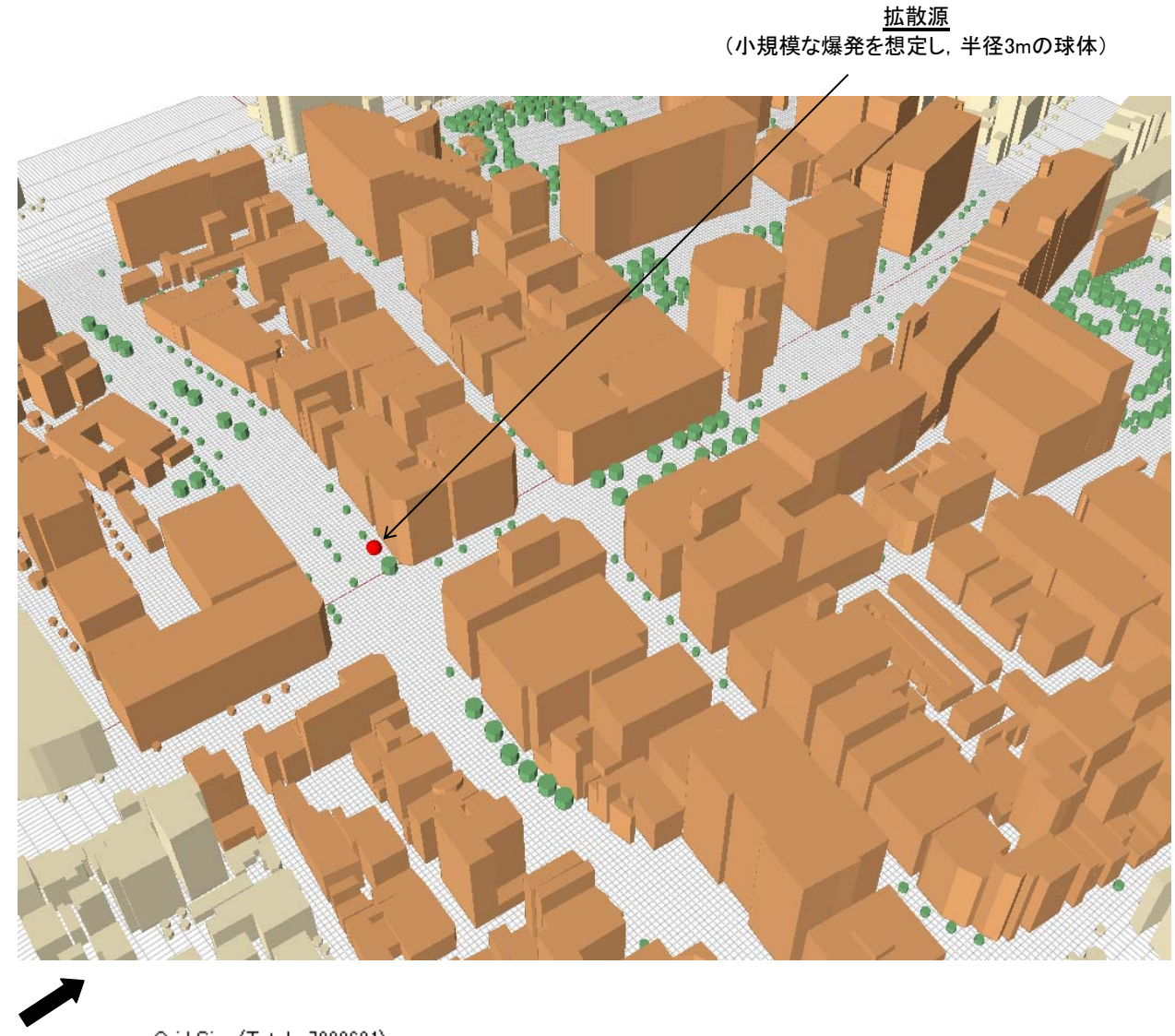
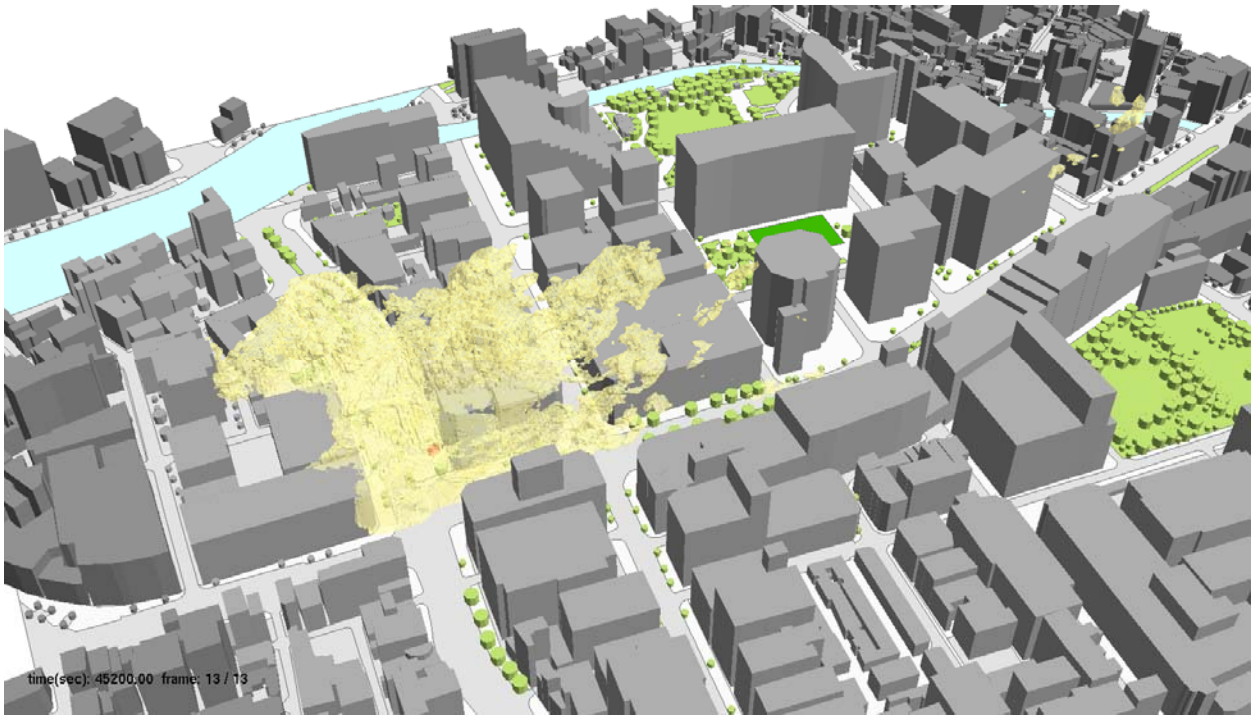
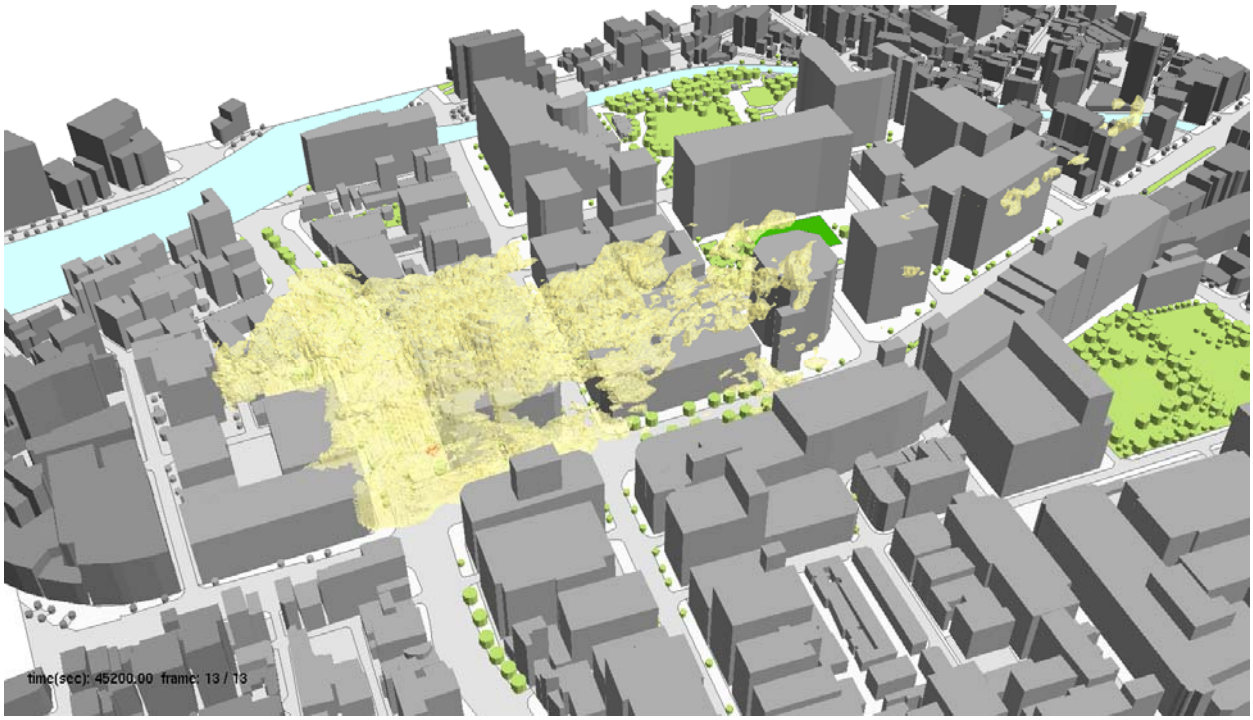


図8　本研究で対象とした実在市街地モデル，計算領域と計算格子数など



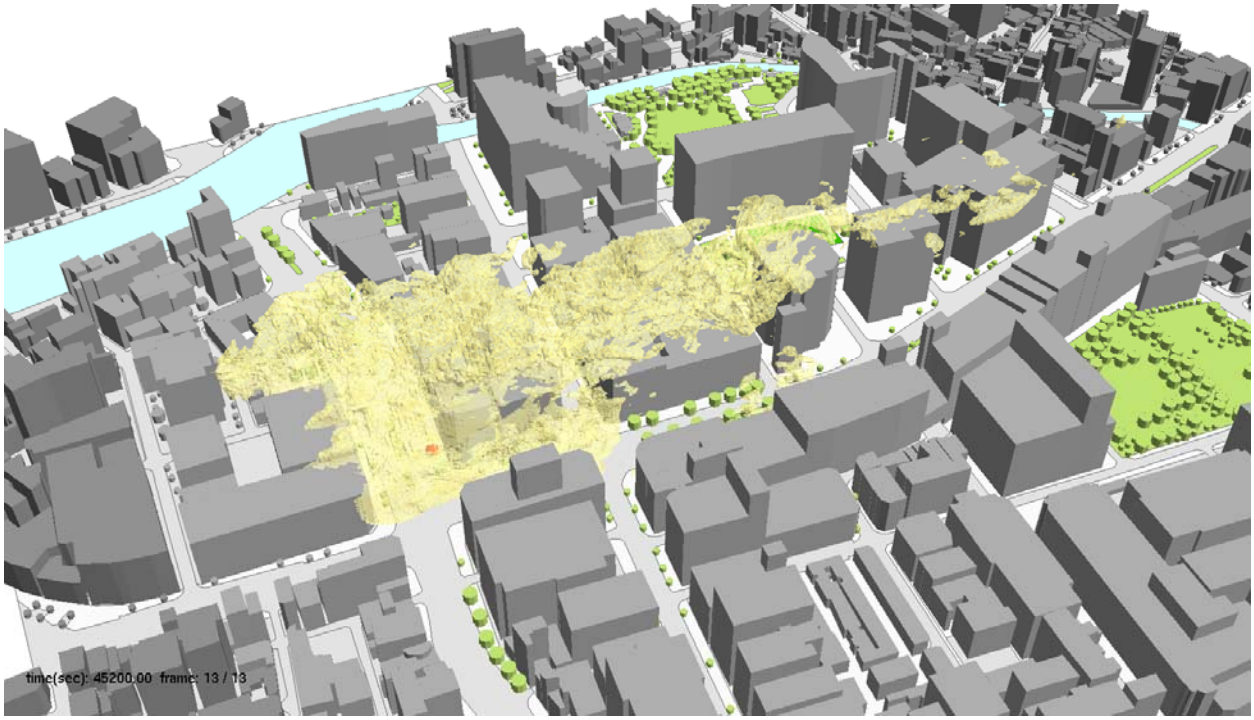
(a)Case1：Fr=+2.4（重いガス）

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)

Flow

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

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

[1] 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―第2報建物群まわりの風環境予測―，九州大学情報基盤センター年報，第3号，pp.57-66，2003