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

# 市販CFDソフトウェアによる複雑乱流場の再現性 : 第3報 3次元立方体を対象として

内田, 孝紀
九州大学応用力学研究所

https://doi.org/10.15017/1526207

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 146, pp.157-167, 2014-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

# 市販CFDソフトウェアによる複雑乱流場の再現性
## ー第3報 3次元立方体を対象としてー

内田 孝紀*

(2014年1月31日受理)

# Reproducibility of Complicated Turbulence Flow by Using Commercial CFD Software
## —In the case of three-dimensional cube—

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

**Abstract**

It is highly important in Japan to choose a good site for wind turbines, because the spatial distribution of wind speed is quite complicated over steep complex terrain. We have been developing the unsteady CFD code called the RIAM-COMPACT®. The RIAM-COMPACT® is based on LES turbulence model. In this paper, to test the accuracy of the RIAM-COMPACT®, we have performed a numerical simulation of a non-stratified airflow past a three-dimensional cube in a uniform flow. Attention is focused on airflow characteristics in the wake region. Through comparison of the commercial CFD software (STAR-CCM+), the results from the RIAM-COMPACT® are in good agreement with those obtained from STAR-CCM+.

**Key words :** *CFD, Marketing CFD software, STAR-CCM+, RIAM-COMPACT®, LES, RANS, Cube model*

## 1. 緒言

我々のグループでは，RIAM-COMPACT®(リアムコンパクト)と称する数値風況診断技術の開発を進めている[1]．そのコア技術は，九州大学応用力学研究所で開発が続けられており，著者が2006年に起業した九州大学発ベンチャー企業の(株)リアムコンパクト(http://www.riam-compact.com/)が，(株)産学連携機構九州(九大TLO)から独占的ライセンス使用許諾を受けている．同年には，RIAM-COMPACT®の商標と実用新案を取得した．現在では，「実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェア」と名付け，風力業界の標準ソフトウェアの一つとして広く普及に努めている．

前報[2]では，急峻な傾斜角度を有する孤立峰を対象として，他の市販CFDソフトウェアの計算結果と比較を行った．本報では，3次元立方体を対象にした結果を報告する．

## 2. 市販CFDソフトウェアの概要

数値流体力学CFD(Computational Fluid Dynamics)に基づいた市販CFDソフトウェアは，これまで自動車業界や航空機業界を中心に，設計ツールとして主に発展を遂げてきた．下記に主な市販CFDソフトウェアの一覧を示す．

**汎用熱流体CFDソフトウェア**

■STAR-CCM+
http://www.cd-adapco.co.jp/products/star_ccm_plus/index.html

■ANSYS(CFD, Fluent, CFX)
http://ansys.jp/solutions/analysis/fluid/index.html

■SCRYU/Tetra
http://www.cradle.co.jp/products/scryutetra/

■STREAM
http://www.cradle.co.jp/products/stream/index.html

■CFD2000
http://www.cae-sc.jp/docs/cfd2000/index.htm

■PHOENICS
http://www.phoenics.co.jp/

■Autodesk Simulation CFD
http://www.cfdesign.com/

■CFD++
http://bakuhatsu.jp/software/cfd/

■CFD-ACE+
http://www.wavefront.co.jp/CAE/cfd-ace-plus/

■AcuSolve
http://acusolve.jsol.co.jp/index.html

■FLOW-3D
http://www.terrabyte.co.jp/FLOW-3D/flow3d.htm

■FloEFD
http://www.sbd.jp/product/netsu/floefd3cad.shtml

*九州大学応用力学研究所

■Flow Designer
http://www.akl.co.jp/

■PowerFLOW
http://www.exajapan.jp/pages/products/pflow_main.html

■KeyFlow
http://www.kagiken.co.jp/product/keyflow/index.shtml

■OpenFOAM
http://www.cae-sc.jp/docs/FOAM/

■FrontFlow
http://www.advancesoft.jp/product/advance_frontflow_red/

風力業界に関しては，風車の適地選定を目的としたCFDソフトウェアが独自に開発・流通している(下記を参照)．最近では，上記の汎用熱流体ソフトウェアの一部も，風力業界への適用が進んでいる．

風力業界向けCFDソフトウェア(Wind Farm Design Tool)

■RIAM-COMPACT®
http://www.riam-compact.com/

■MASCOT
http://aquanet21.ddo.jp/mascot/

■WindSim
http://www.windsim.com/

■METEODYN
http://meteodyn.com/

本報では，代表的な市販CFDソフトウェアであるSTAR-CCM+の計算結果との比較を報告する．

## 3. STAR-CCM+ソフトウェアの概要

ここでは，(株)IDAJが提供する汎用熱流体解析ソフトウェアSTAR-CCM+(開発元：(株)CD-adapco)の概要を記述する(表1を参照)．本研究で使用したバージョンは8.02.008 (For Windows64)である．

STAR-CCM+では，計算メッシュ生成から流体解析の実行，結果処理までを同一GUI(Graphical User Interface)上で行う．STAR-CCM+における特徴的なメッシュ生成法を説明する．STAR-CCM+では，ポリヘドラルメッシュおよびプリズムレイヤーメッシュの利用が可能である(図3を参照)．ポリヘドラルメッシュとは，CD-adapcoが提唱する新しいタイプの解析メッシュで，平均10～15個程度の面を持った多面体セルのことである．このセルを用いることで，従来のテトラメッシュと比べ，同等の解析結果を得るために必要なメッシュ数を大幅に削減することが可能で，かつソルバーが必要とするメモリ量も大幅に削減可能である．解析安定性も大幅に向上し，収束解を得るまでの時間も短くなる．プリズムレイヤーメッシュは，物体表面上の境界層の挙動を捉えるための細分化メッシュであり，物体表面を覆うように層状の薄いセルを規則的に配置する．物体表面から法線方向への厚さと層数を自由に調整できるため，壁面近傍での境界層の挙動を精度よく捉えることが可能である．但し，プリズムレイヤーメッシュの数が膨大になってしまうと，計算時間が大幅に増加する．

数値計算は有限体積法FVM(Finite-Volume Method)に基づいており，支配方程式はナビエ・ストークス方程式である．速度場および圧力場ともにAMG(Algebraic Multi-Grid)線形ソルバーにより反復計算が行われる．時間進行は1次精度陰解法を用いた．対流項に関して，RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation)の場合には2次精度風上法を採用し，LES(Large-Eddy Simulation)の場合には，有界中心差分離散化スキーム(Bounded Central Differencing (BCD) Scheme)を採用した．表1に，定常RANSモデルを例として，STAR-CCM+の概要などを示す．

| 計算コード | STAR-CCM+ v.8.02.008 |
|---|---|
| 支配方程式 | 3次元非定常N-S方程式 |
| 乱流モデル | 定常RANS<br>(Spalart-Allmaras 1方程式<br>渦粘性乱流モデル) |
| 時間進行 | ①1次精度陰解法非定常解析<br>②定常解析<br>(ステップ数で計算をコントロール) |
| 計算範囲 | ①無次元時間0～100s<br>(時間平均：100～200s)<br>②ステップ数0～2000,<br>(時間平均：2000～4000) |
| 対流項の離散化 | 2次精度風上差分<br>(1次および2次精度風上差分<br>以外は選択不可) |
| 気体 | 密度一定 |
| 密度$\rho$ | 1.0 [kg/m$^3$] |
| 粘性係数$\mu$ | $1.0\times10^{-5}$ [Pa·s] |
| 峰モデルの高さh | 0.1 [m] |
| 流入風速U | 1.0 [m/s] |
| Re数=(U*h*$\rho$)/$\mu$ | $1.0\times10^{4}$ |
| 無次元時間刻み$\Delta$t=(dt*U)/h | $2.5\times10^{-2}$ |
| セル数 | 約106万セル |

表1　STAR-CCM+の概要，定常RANSモデルを例として

## 4. RIAM-COMPACT®ソフトウェアの概要

ここでは，我々が開発している「実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェア」の概要を記述する．実地形版RIAM-COMPACT®ソフトウェアでは，数値不安定を回避し，複雑地形上の局所的な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 (Finite-Difference Method)に基づき，乱流モデルにはLES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(Grid Scale)成分の渦と，それよりも小さなSGS(Sub-Grid Scale)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，空間フィルタ操作を施された非圧縮流体の連続の式(式(1))とナビエ・ストークス方程式(式(2))である．本研究では，平均風速6m/s以上の強風場を対象にしているので，大気が有する高度方向の温度成層(密度成層)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．

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

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

$$\tau_{ij} = \overline{u_i' u_j'} = \frac{1}{3}\overline{u_k' u_k'}\delta_{ij} - 2\nu_{SGS}\bar{S}_{ij} \qquad -(3)$$

$$\nu_{SGS} = \left(C_s f_s \Delta\right)^2 \left|\bar{S}\right| \qquad -(4)$$

$$\left|\bar{S}\right| = \left(2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}\right)^{1/2} \qquad -(5)$$

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

$$f_s = 1 - \exp\left(-z^+ / 25\right) \qquad -(7)$$

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

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．空間項の離散化は式(2)の対流項を除いて2次精度中心差分とし，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[3]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[4]タイプのα=3に対して，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[5]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．

## 5. 本研究で対象とした流れ場と計算条件

ここでは，本研究で対象とした流れ場，座標系，計算条件などを記述する(図1を参照)．

境界条件に関して，流入境界面には一様流入条件，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した．立方体および地面には粘着条件を課した．レイノルズ数は，立方体の一辺(高さ)hと流入境界面における高さhでの風速Uに基づき，Re(=Uh/ν)=$10^4$とした．RIAM-COMPACT®における時間刻みは$\Delta t=2\times10^{-3}$(h/U)である．一方，STAR-CCM+においては，$\Delta t=2.5\times10^{-2}$(h/U)とした．

RIAM-COMPACT®で用いた計算格子(構造格子)を図2に示す．格子点数はx, y, z方向に326×226×67点(約500万)点である．x方向およびy方向の格子幅は等間隔に0.04h，z方向の格子幅は不等間隔に(0.003～0.6)hである．

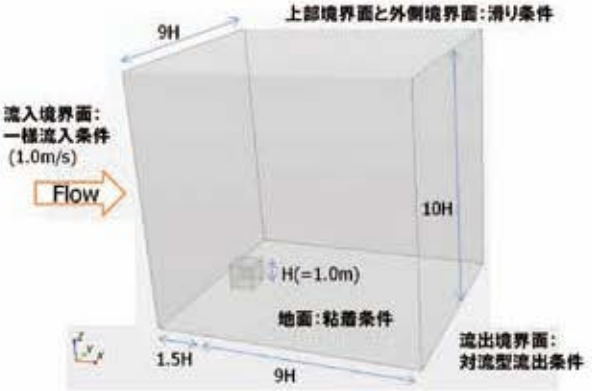



図1 計算領域，座標系，境界条件など

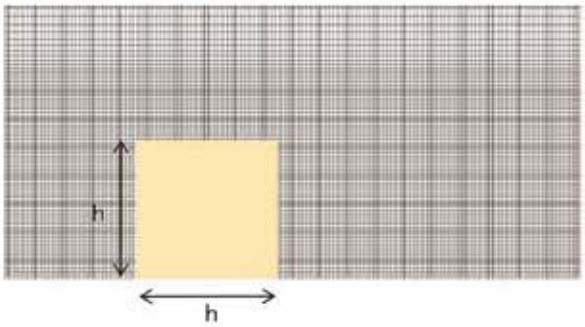
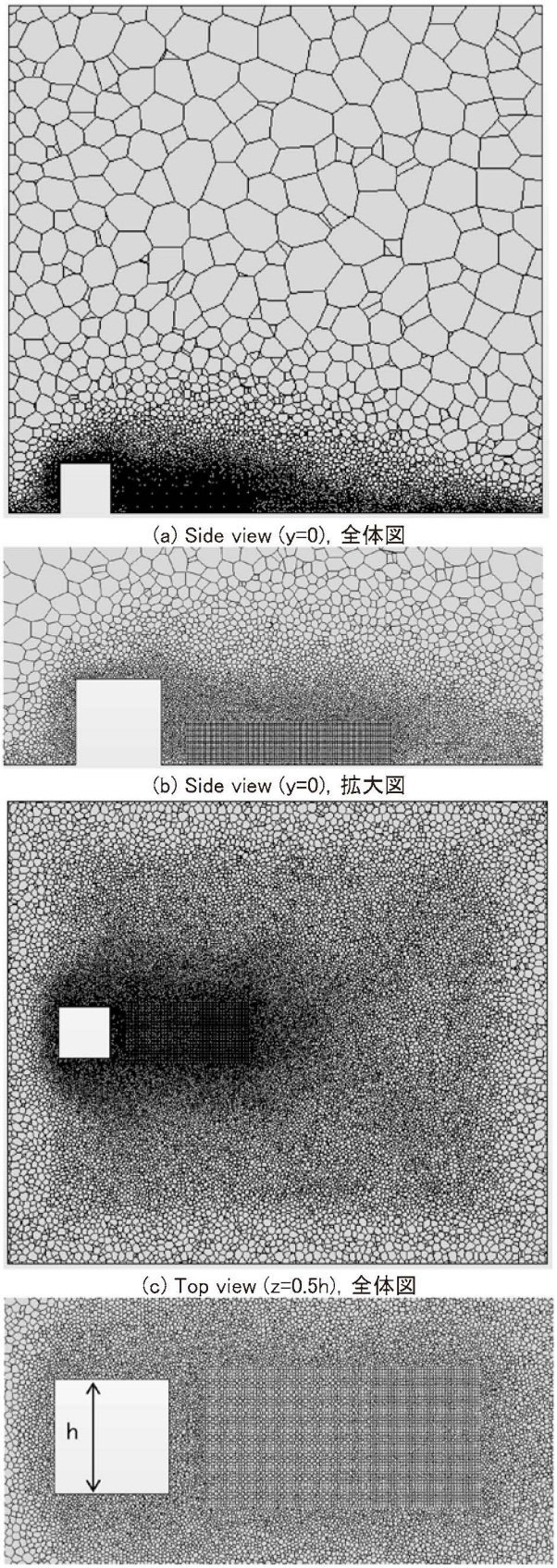



図2 RIAM-COMPACT®で用いた立方体近傍の計算格子，構造格子，主流直交方向(y)の中央面(y=0)




(a) Side view (y=0), 全体図

(b) Side view (y=0), 拡大図

(c) Top view (z=0.5h), 全体図

(d) Top view (z=0.5h), 拡大図

図3 STAR-CCM+で用いた計算格子図, 非構造格子

比較のため, STAR-CCM+で用いた計算格子(非構造格子)を図3に示す. 格子点数の合計は約150万点(RIAM-COMPACT®の約1/3)である. ここで, 立方体近傍の格子解像度はRIAM-COMPACT®とほぼ同様の設定とした.

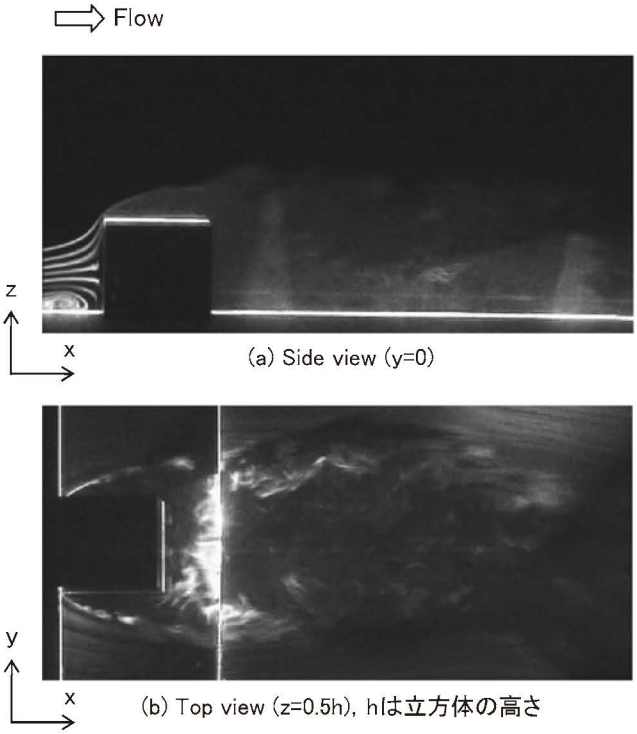
表2および表3には, 本研究で比較検討した各種乱流モデル(RANS系, LES系)を示す. 便宜上, Case1～Case5と称する. 比較を行った乱流モデルは, 前報[2]と同様である. ここで, Case4のWALEモデル[6]について簡単に説明する. WALEモデルでは, 地面近傍で壁面減衰関数を用いることなく, 渦粘性係数がゼロになることと, 層流せん断流れにおいて渦粘性係数が算出されないように工夫が施されている.

| | | |
|---|---|---|
| RANS系 | **Case 1** | Spalart-Allmaras 1方程式渦粘性乱流モデル:定常RANS |
| | **Case 2** | SST k-ω 2方程式渦粘性モデル:非定常RANS(URANS) |
| LES系 | **Case 3** | Smagorinskyモデル:LES |
| | **Case 4** | WALEモデル:LES |

表2 STAR-CCM+で用いた乱流モデル

| | | |
|---|---|---|
| LES系 | **Case 5** | Smagorinskyモデル:LES |

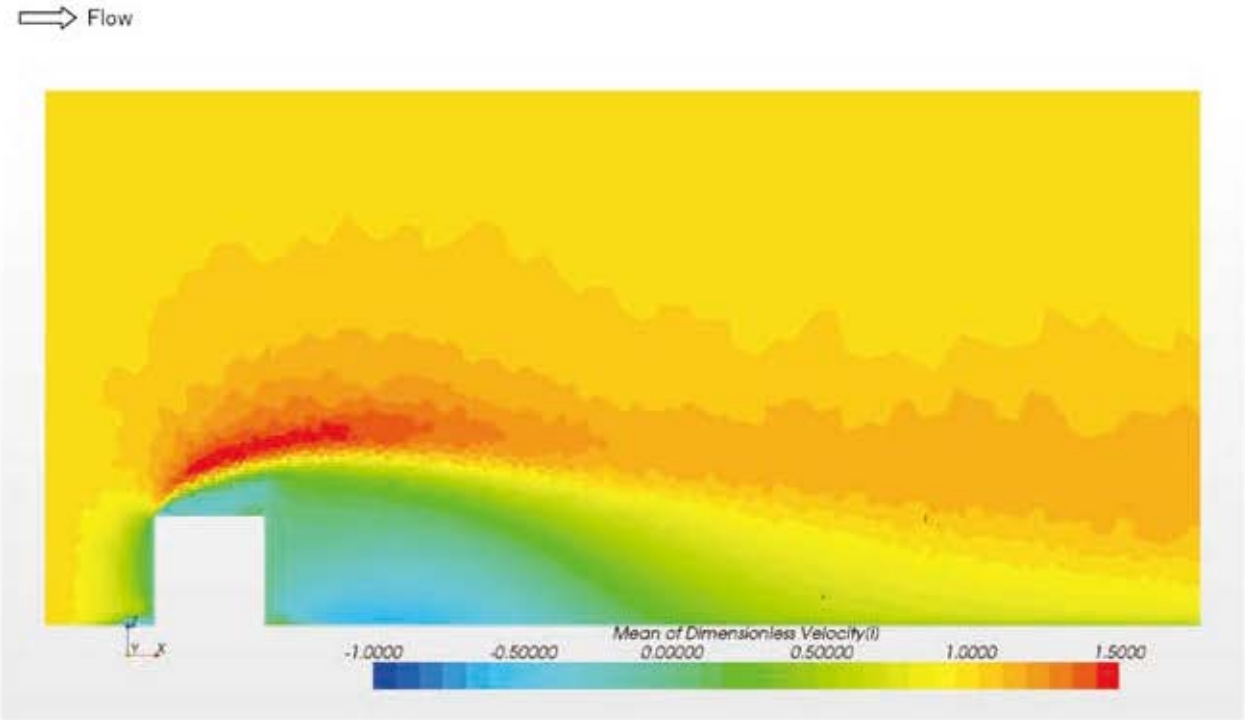
表3 RIAM-COMPACT®で用いた乱流モデル



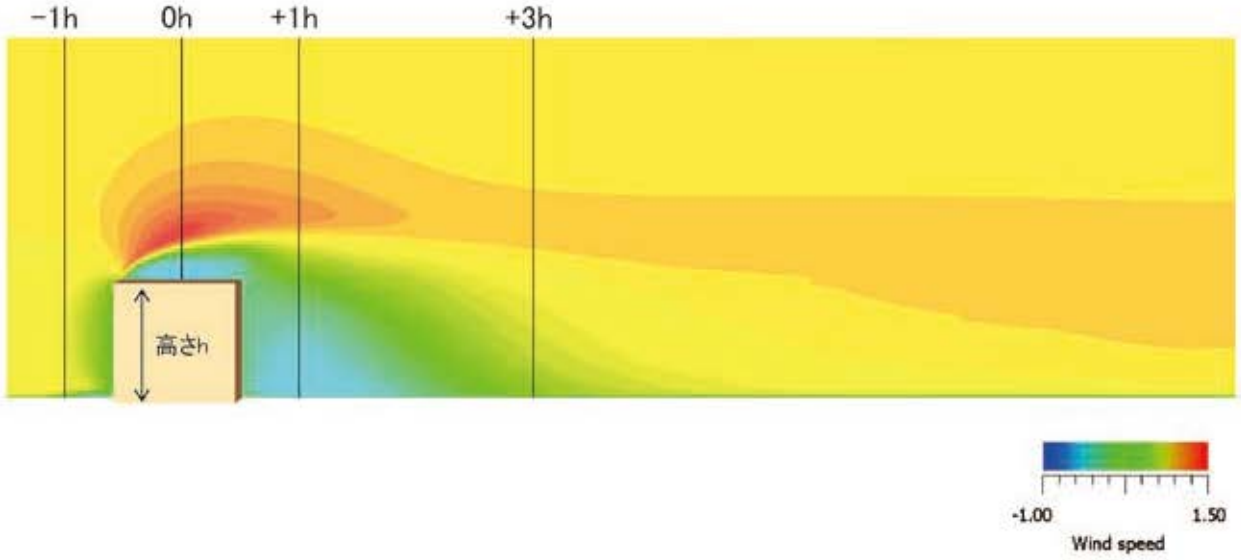

(a) Side view (y=0)

(b) Top view (z=0.5h), hは立方体の高さ

図4 風洞実験,
スモークワイヤー法による可視化, 瞬間場

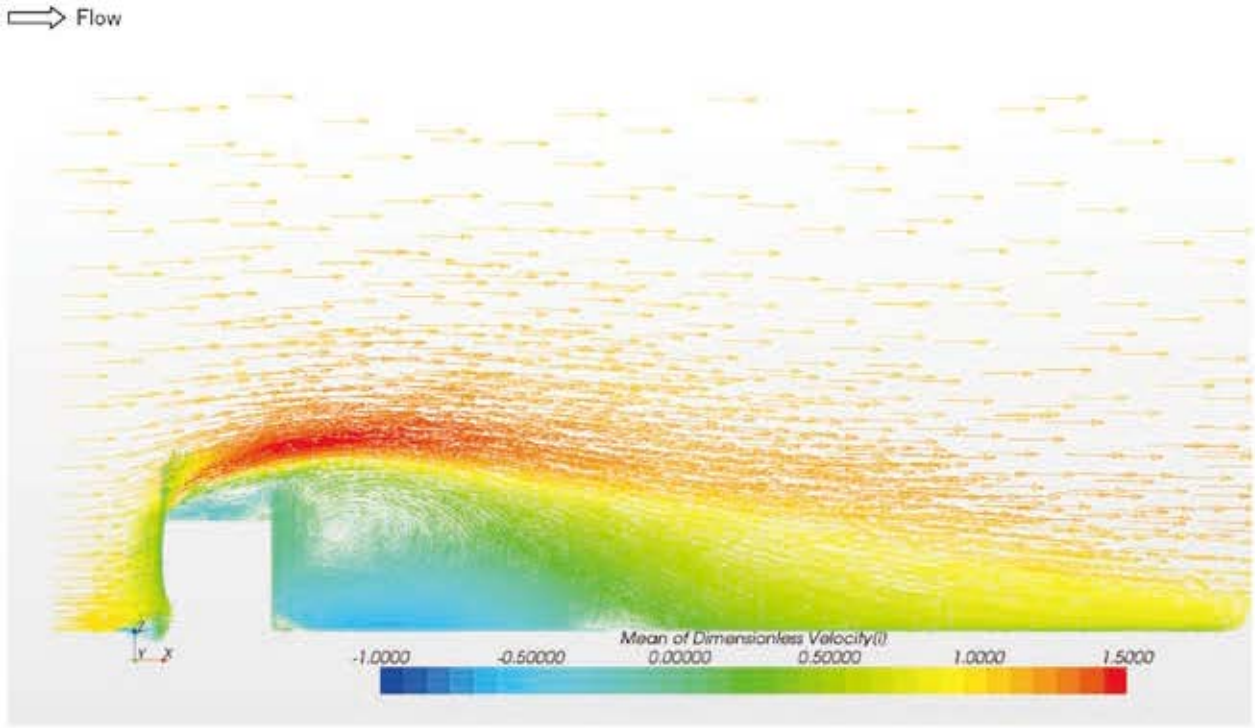



(a) Case1, STAR-CCM+の定常RANSの結果, Spalart-Allmaras 1方程式渦粘性乱流モデル

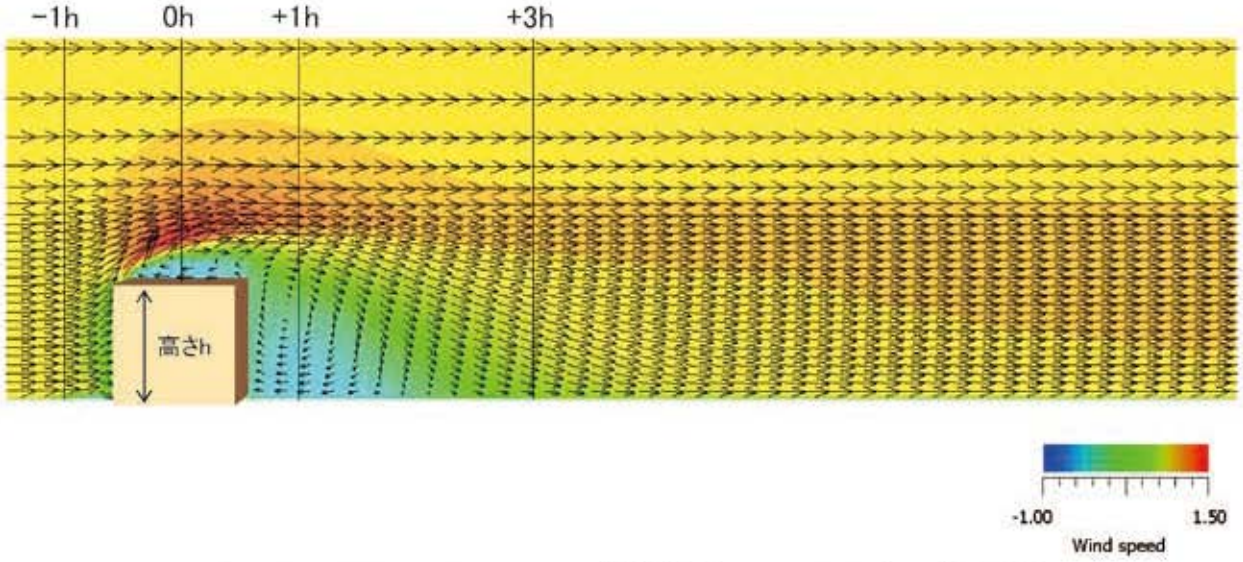



(b) Case5, RIAM-COMPACT®のLESの結果, 標準Smagorinskyモデル, 時間平均場

図5 主流方向(x)の速度成分分布図の比較, 主流直交方向(y)の中央面(y=0),
ここで, 速度成分は一様流入風速で正規化されている.




(a) Case1, STAR-CCM+の定常RANSの結果, Spalart-Allmaras 1方程式渦粘性乱流モデル




(b) Case5, RIAM-COMPACT®のLESの結果, 標準Smagorinskyモデル, 時間平均場

図6　速度ベクトル図の比較, 主流直交方向(y)の中央面(y=0),
ここで, 速度成分は一様流入風速で正規化されている.

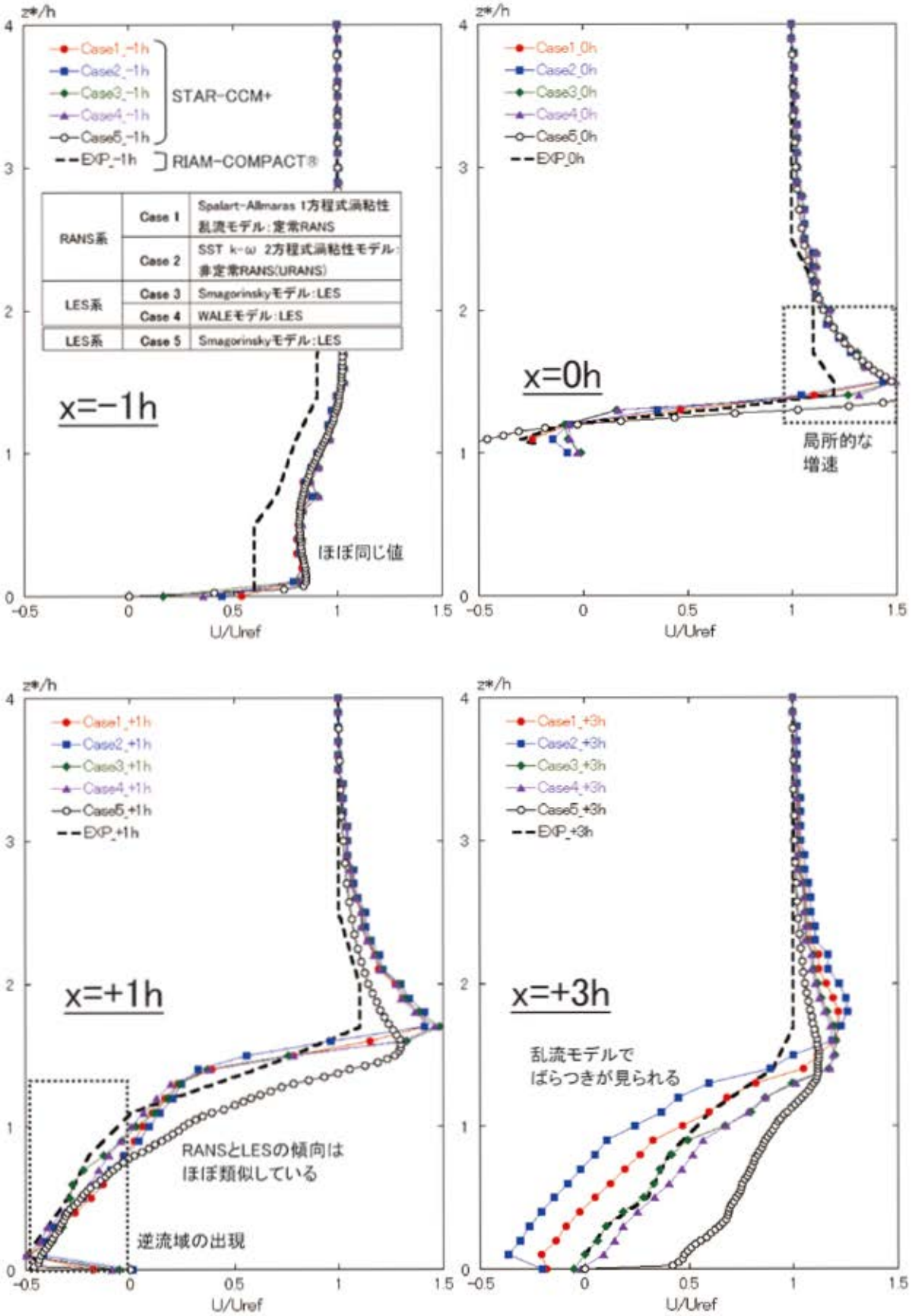



図7 主流方向(x)の平均速度プロファイルの比較.
ここで, 速度成分は各位置の上空風速で正規化されている.

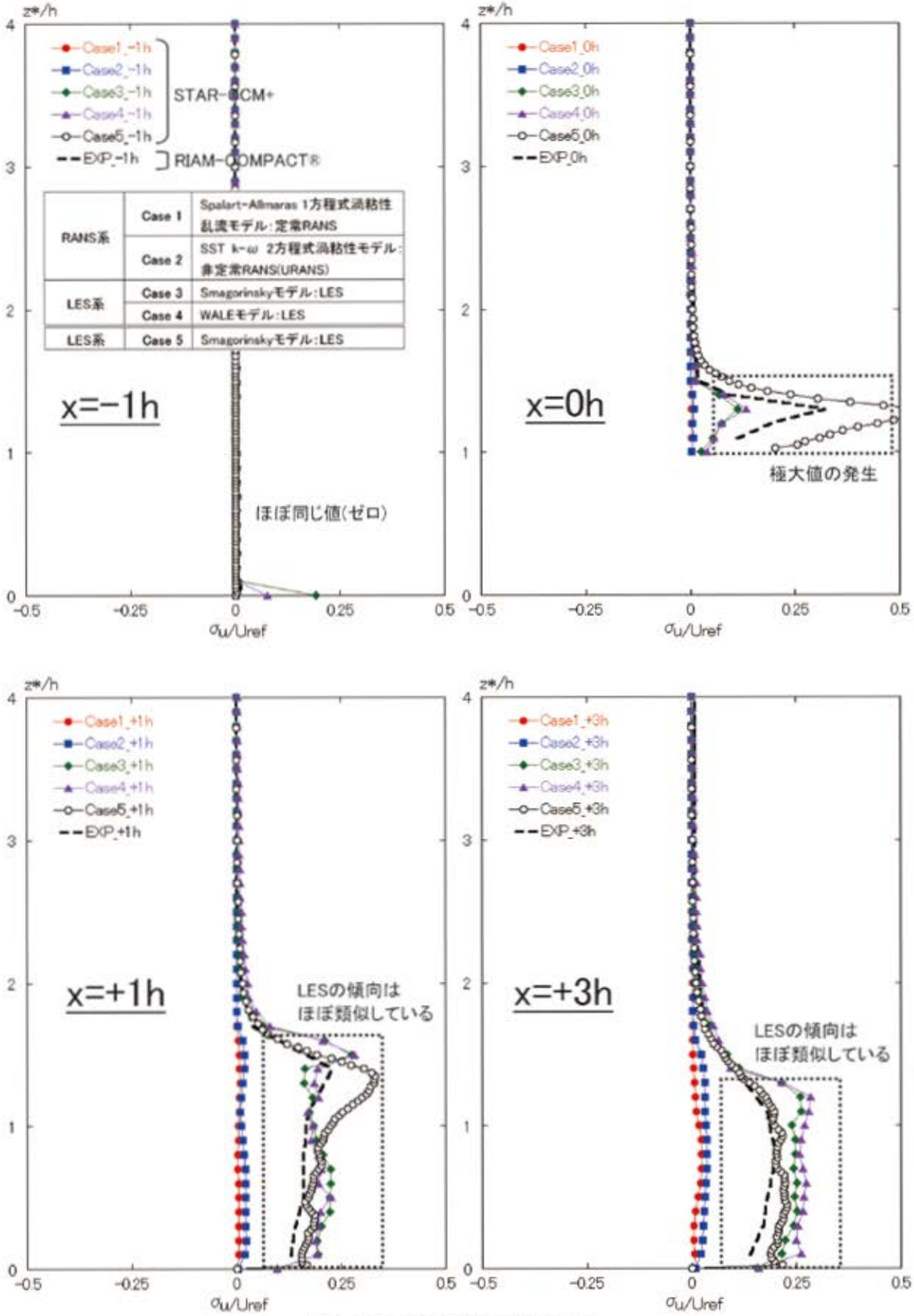



図8　主流方向(x)の標準偏差の比較.
ここで，速度成分は各位置の上空風速で正規化されている.

## 6. 計算結果と考察

最初に，本研究で対象とした立方体周辺に形成される流れパターンについて，風洞実験の可視化写真(スモークワイヤー法)により説明する(図4を参照)．図4(a)に示す鉛直断面および図4(b)に示す水平断面ともに，立方体の上流角部から剥離したせん断層は，孤立した渦に巻き上がる．それらの孤立渦は大規模渦を形成し，立方体の下流側へ周期的に放出されて流下する．結果として，立方体の周辺には3次元複雑乱流場が形成される．

図5～図8に計算結果の比較を示す．ここで，Case5(RIAM-COMPACT®のLESモデル)における時間平均した流れ場や乱流統計量は，流れ場が十分に発達した状態から，時間t=100-200(h/U)で評価した．

図5および図6に示す流れ場の可視化の比較を示す．ここでは紙面の都合上，代表してCase1(STAR-CCM+の定常RANSモデル，時間進行は表1に記載したステップ数でコントロールした定常計算)と，Case5(RIAM-COMPACT®のLESモデル)の結果の比較のみを示す．図5および図6を観察すると，図4で説明したように，立方体の周辺には複雑乱流場が形成されているにも関わらず，RANS系の計算結果(定常)と，LES系の計算結果(Smagorinskyモデル)には有意な差異は観察されず，全体的な傾向は概ね類似した結果を得た．

図7および図8には，本研究で比較検討した各種乱流モデル(RANS系，LES系)で得られた乱流諸量の比較を示す(表2および表3を参照)．乱流諸量を評価した位置は，x=-1h, 0h, +1h, +3hである．なお，図中には過去に著者が実施した風洞実験の結果[7]も示している．図7に示す主流方向(x)の平均速度プロファイルの比較では，x=+3hにおいて乱流モデルでばらつきが見られるものの，その他の位置(x=-1h, 0h, +1h)では，概ね類似した結果を得た．図8に示す主流方向(x)の標準偏差の比較では，RANS系の計算では，前報[2]と同様，すべての地点において有意な値が出力されなかった．一方，LES系の結果では，STAR-CCM+の計算結果(標準Smagorinskyモデル，WALEモデル)とRIAM-COMPACT®の計算結果(標準Smagorinskyモデル)は，ほぼ同様な傾向を示した．

計算時間に関しては，前報[2]と同様，RIAM-COMPACT®では，STAR-CCM+で用いた計算格子(非構造格子，約150万点)の約3倍の計算格子(構造格子，約500万点)を用いたにも関わらず，格段に高速に終了することを確認した．

## 7. 結言

前報[2]では，急峻な傾斜角度を有する孤立峰を対象として，他の市販CFDソフトウェアの計算結果と比較を行った．本報では，3次元立方体を対象として代表的な市販CFDソフトウェアであるSTAR-CCM+との比較を行い，我々が開発を進めているRIAM-COMPACT®(標準Smagorinskyモデルに基づくLES)の予測精度を検証した．STAR-CCM+では，RANS系の乱流モデルとして，Spalart-Allmaras 1方程式渦粘性モデル(定常RANS)と，SST k-ω 2方程式渦粘性モデル(非定常RANS)の二種類を選択した．また，LES系の乱流モデル(SGSモデル)として，標準Smagorinskyモデルと，WALEモデルの二種類を選択した．

各種乱流モデルから得られた計算結果の比較を通じて，以下のことが明らかになった．

流れ場の可視化の比較では，立方体周辺に複雑乱流場が形成されているにも関わらず，RANS系の計算結果(定常，非定常)と，LES系の計算結果(Smagorinskyモデル，WALEモデル)には有意な差異は観察されず，全体的な傾向は概ね類似した結果を得た．

主流方向(x)の平均速度プロファイルの比較では，x=+3hにおいて乱流モデルでばらつきが見られたものの，その他の位置(x=-1h, 0h, +1h)では，概ね類似した結果を得た．一方，主流方向(x)の標準偏差の比較では，前報[2]と同様，RANS系の計算では，すべての地点において有意な値が出力されなかった．LES系の結果では，STAR-CCM+の計算結果(標準Smagorinskyモデル，WALEモデル)とRIAM-COMPACT®の計算結果(標準Smagorinskyモデル)は，ほぼ同様な傾向を示した．

計算時間に関しても，前報[2]と同様，RIAM-COMPACT®では，STAR-CCM+で用いた計算格子(非構造格子，約150万点)の約3倍の計算格子(構造格子，約500万点)を用いたにも関わらず，格段に高速に終了することを確認した．

## 参考文献


[1] 内田 孝紀, Bolund Experimentを対象にしたLES乱流モデルの予測精度の検証—風洞実験との比較—, 日本風力エネルギー学会誌, Vol.37, 通巻106, pp.226-231, 2013

[2] 内田 孝紀, Graham Li, 市販CFDソフトウェアによる複雑乱流場の再現性－急峻な傾斜角度を有する3次元孤立地形を対象として－, 九州大学応用力学研究所所報, 第145号, pp.107-119, 2013

[3] 梶島 岳夫, 太田 貴士, 岡崎 和彦, 三宅 裕, コロケート格子による非圧縮流れの高次差分解析, 日本機械学会論文集, (B編), 63巻, 614号, pp.3247-3254, 1997

[4] Kawamura, T., Takami, H. and Kuwahara, K., Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, Fluid Dyn. Res., Vol.1, pp.145-162, 1986

[5] Smagorinsky, J., General circulation experiments with the primitive equations, Part 1, Basic experiments, Mon. Weather Rev., Vol.91, pp.99-164, 1963

[6] F. Nicoud, F. Ducros, Subgrid-Scale Stress Modelling Based on the Square of the Velocity Gradient Tensor, Flow, Turbul. Combust., Vol.62, pp.183-200, 1999

[7] 日置文章, 内田孝紀, 杉谷賢一郎, 大屋裕二, 市街地を対象とした風環境予測法の開発—立方体周りの流れの風洞実験と数値シミュレーション, 日本航空宇宙学会西部支部講演集, pp.87-90, 2004

## Appendix

著者が過去に実施した風洞実験の結果[7]と, RIAM-COMPACT®(標準Smagorinskyモデルに基づくLES)の結果をより厳密に比較するため, 立方体の上流側での計算領域を拡大した計算も実施した. 図9には計算領域図を示す. 図10～図12には得られた計算結果を示す. その結果, 計算領域を拡大することで, 図11および図12ともに, RIAM-COMPACT®(標準Smagorinskyモデルに基づくLES)による計算結果は, 風洞実験を良好に再現することが示された.

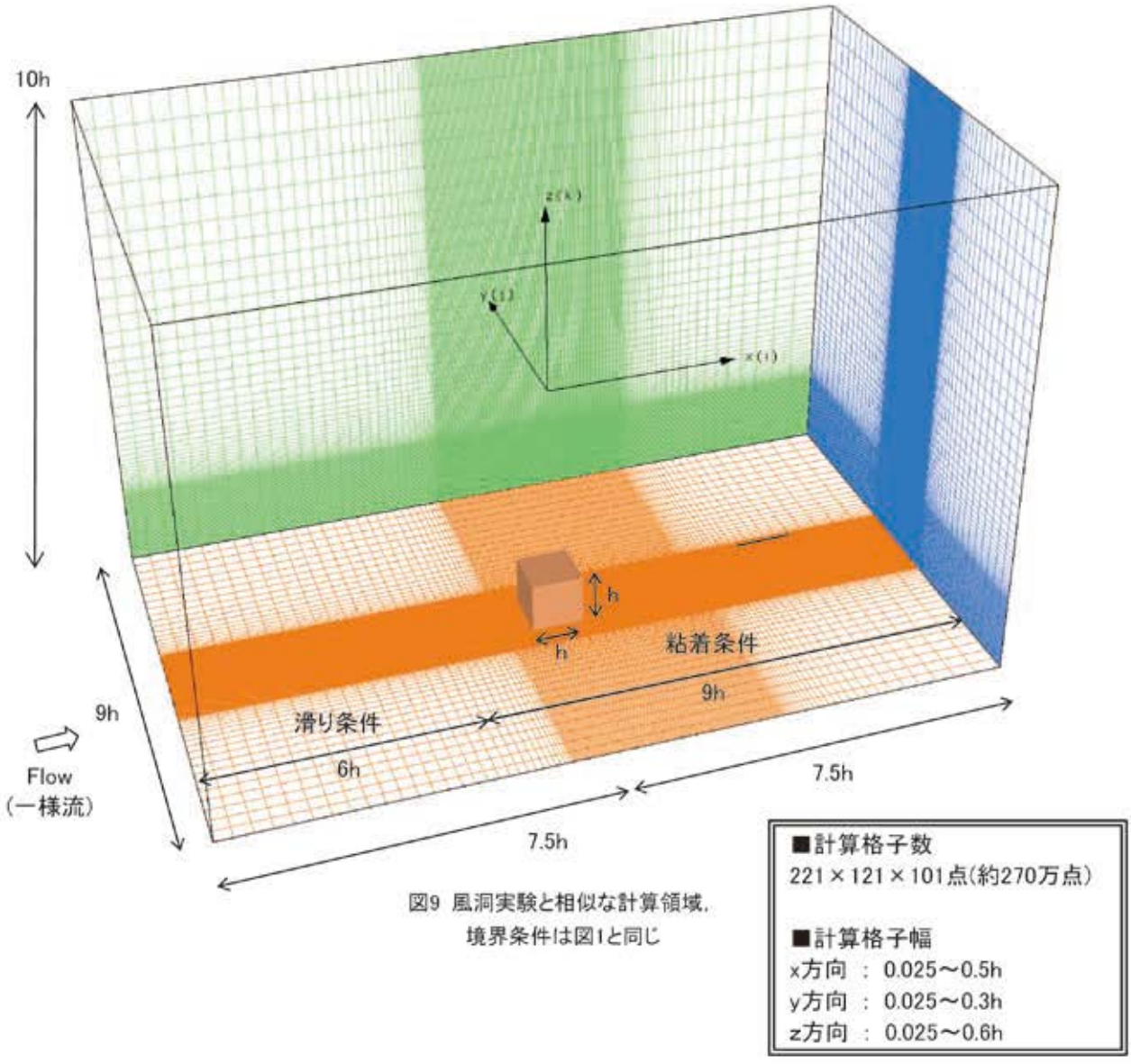



図9 風洞実験と相似な計算領域.
境界条件は図1と同じ

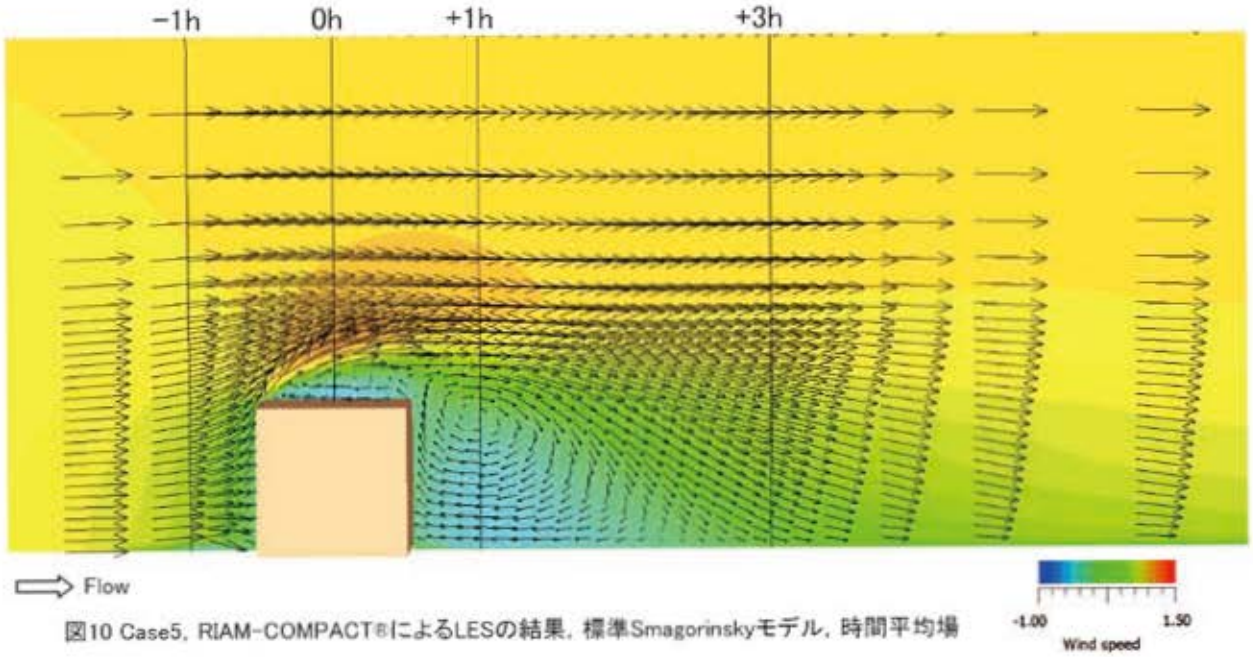



図10 Case5, RIAM-COMPACT®によるLESの結果, 標準Smagorinskyモデル, 時間平均場

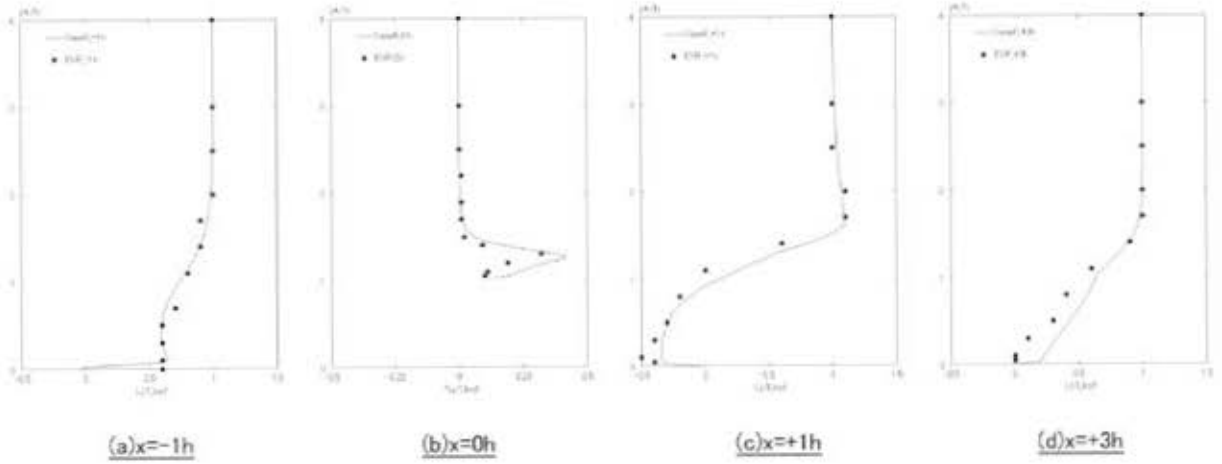



図11 主流方向(x)の平均速度プロファイルの比較, シンボル:風洞実験, ライン:計算結果(RIAM-COMPACT®によるLES)

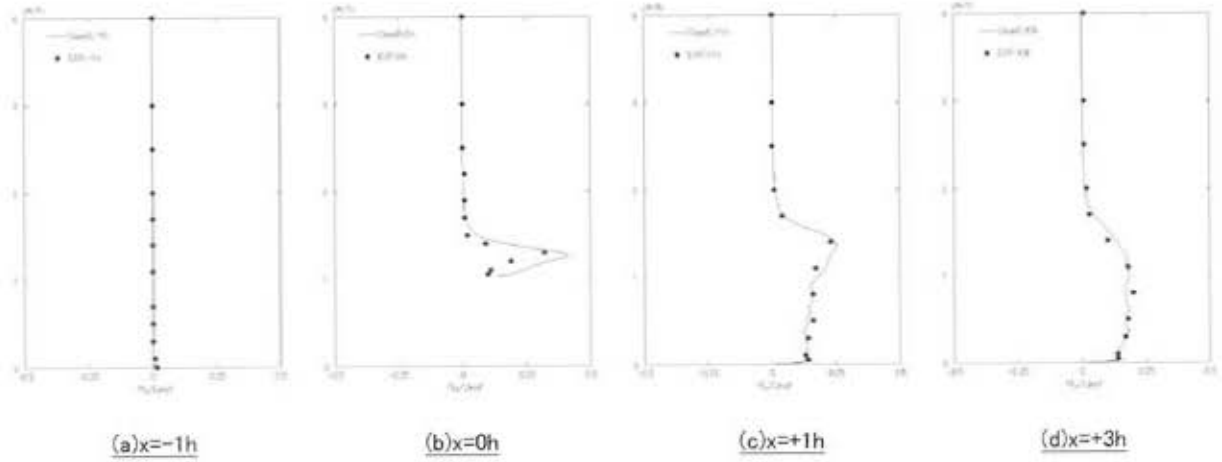



図12 主流方向(x)の標準偏差の比較, シンボル:風洞実験, ライン:計算結果(RIAM-COMPACT®によるLES)