

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

内田, 孝紀
九州大学応用力学研究所

Li, Graham
Tsubasa Windfarm Design

<https://doi.org/10.15017/1526130>

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 145, pp.107-119, 2013-09. 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 —急峻な傾斜角度を有する3次元孤立地形を対象として—

内田 孝紀* Graham Li**

(2013年7月31日受理)

Reproducibility of Complicated Turbulence Flow by Using Commercial CFD Software —In the case of three-dimensional isolated-hill with a steep slope—

Takanori UCHIDA and Graham Li

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 hill 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, Isolated-hill

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、第一著者が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。主な納入先には、(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)、西日本技術開発(株)、(株)シーテック、三菱重工業(株)などがある。

非定常な乱流シミュレーション(LES, Large-Eddy Simulation)に主眼を置いたRIAM-COMPACT®では、計算時間の問題が懸念されてきた。現行の流体計算ソルバーは、Intel Core i7などのマルチコアCPU(Central Processing Unit)や、GPGPU(General Purpose computing on GPU)コンピューティングに対応しており、計算時間は劇的に短縮され、実用面での利用において特段の問題は無くなってきた¹⁻³⁾。

本報では、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の

で、その結果を報告する。

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、主に設計ツールとして発展を遂げてきた。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>

■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/

風力業界においては、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きている。

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+の計算結果と比較を行ったので、その結果を報告する。

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。本研究で使用したバージョンは6.02.007 (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。本研究では、ダッソー・システムズ(株)が開発した3次元CADソフトウェアCATIAを用いて3次元の孤立地形モデル(IGES形式)を作成した。作成した3次元CADデータを、STAR-CCM+で読み込み、格子の種類、メッシュサイズ、乱流モデル(詳細は後述する)、時間刻み幅、境界条件などを設定し、前処理、流体解析および後処理を行う。

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1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数も大幅に減少できる。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。

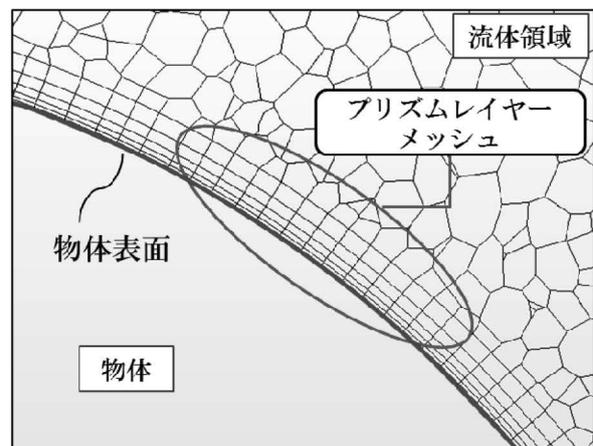


図1 ポリヘドラルメッシュとプリズムレイヤーメッシュ

4. RIAM-COMPACT®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ため、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。

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

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

$$\tau_{ij} \approx \overline{u'_i u'_j} \approx \frac{1}{3} \overline{u'_k u'_k} \delta_{ij} - 2\nu_{\text{SGS}} \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

$$\nu_{\text{SGS}} = (C_s f_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (4)$$

$$|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (5)$$

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

$$f_s = 1 - \exp(-z^+ / 25) \quad (7)$$

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

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⁴⁾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⁵⁾タイプの $\alpha=3$ に対して、 $\alpha=0.5$ 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⁶⁾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。計算領域は主流方向(x)、主流直交方向(y)、鉛直方向(z)に $13h \times 9h \times 10h$ の空間領域を有する(図2を参照)。ここで、hは孤立峰の高さである。孤立峰の形状は下記の関数で表現される。

$$z(r) = 0.5h \times \{1 + \cos(\pi r/a)\}, \quad r = (x^2 + y^2)^{1/2}, \quad a = 2h \quad (9)$$

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。地面には粘着条件を課した。レイノルズ数は、孤立峰の高さhと流入境界面における高さhでの風速Uに基づき、 $\text{Re} = (Uh/\nu) = 10^4$ とした。RIAM-COMPACT®における時間刻みは $\Delta t = 2 \times 10^{-3}(h/U)$ である。一方、STAR-CCM+においては、 $\Delta t = 1 \times 10^{-2}(h/U)$ とした。

RIAM-COMPACT®で用いた孤立峰近傍における計算格子(構造格子)を図3に示す。格子点数はx, y, z方向に $326 \times 226 \times 67$ 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 $(0.003 \sim 0.6)h$ である。

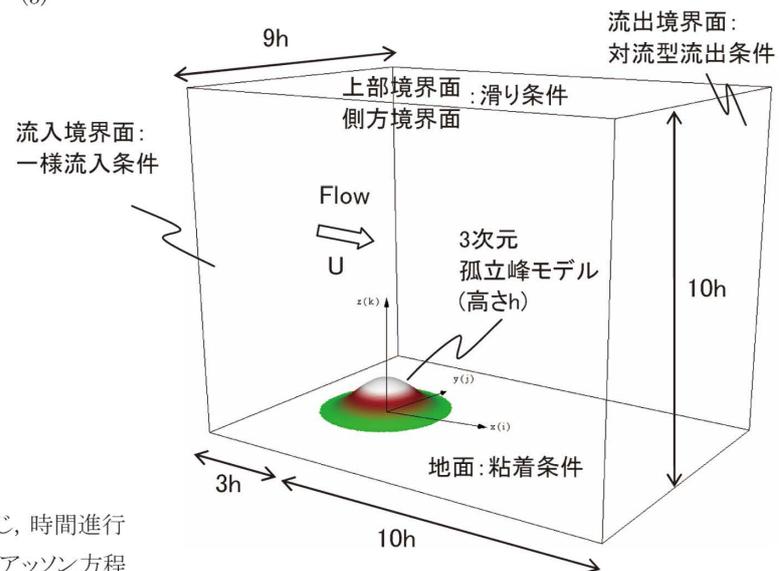


図2 計算領域、座標系、境界条件など

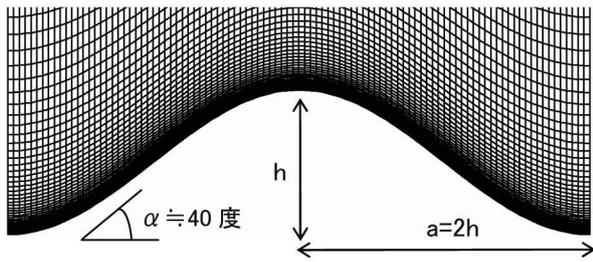
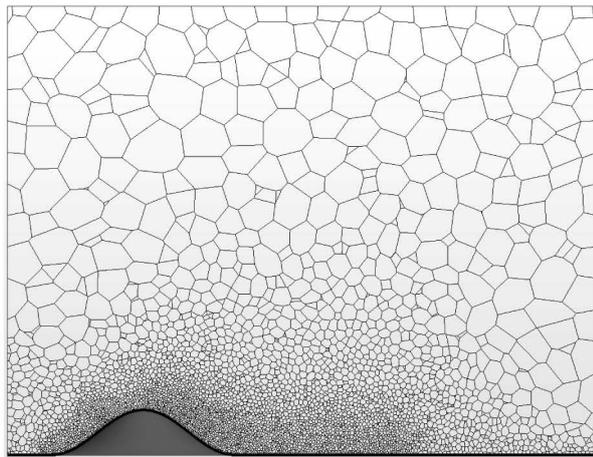
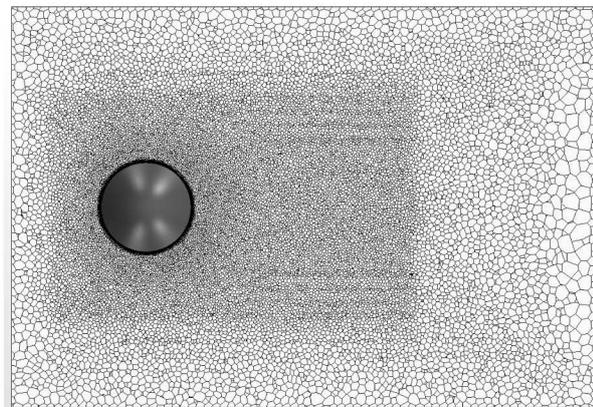


図3 RIAM-COMPACT®で用いた孤立峰近傍の計算格子, 構造格子, 主流直交方向(y)の中央面(y=0)



(a) Side view (y=0)



(b) Top view (z=0.5h)

図4 STAR-CCM+で用いた計算領域全体の計算格子, 非構造格子

STAR-CCM+で用いた計算格子(非構造格子)を図4に示す. 格子点数の合計は約100万点(RIAM-COMPACT®の約1/5)である. ここで, 孤立峰近傍の格子解像度はRIAM-COMPACT®とほぼ同様の設定とした.

表1および表2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. Case4のWALEモデル⁷⁾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1 STAR-CCM+で用いた乱流モデル

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

表2 RIAM-COMPACT®で用いた乱流モデル

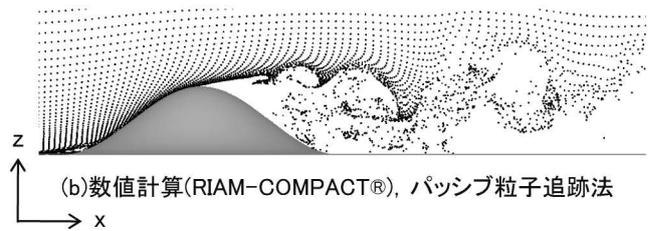
6. 計算結果と考察

最初に, 本研究で対象とした孤立峰周辺に形成される流れパターンについて説明する(図5を参照). 数値シミュレーション(RIAM-COMPACT®)と風洞実験で得られた流れ場の定性的な挙動は, 非常に類似している. すなわち, 孤立峰の頂部付近で剥離したせん断層は, 孤立した渦に巻き上がり, 大規模渦を形成する. これが孤立峰の下流側に周期的に放出される. RIAM-COMPACT®による計算結果と風洞実験との詳細な比較は, 文献⁸⁾を参照して頂きたい.

⇒ Flow



(a)風洞実験, スモークワイヤー法

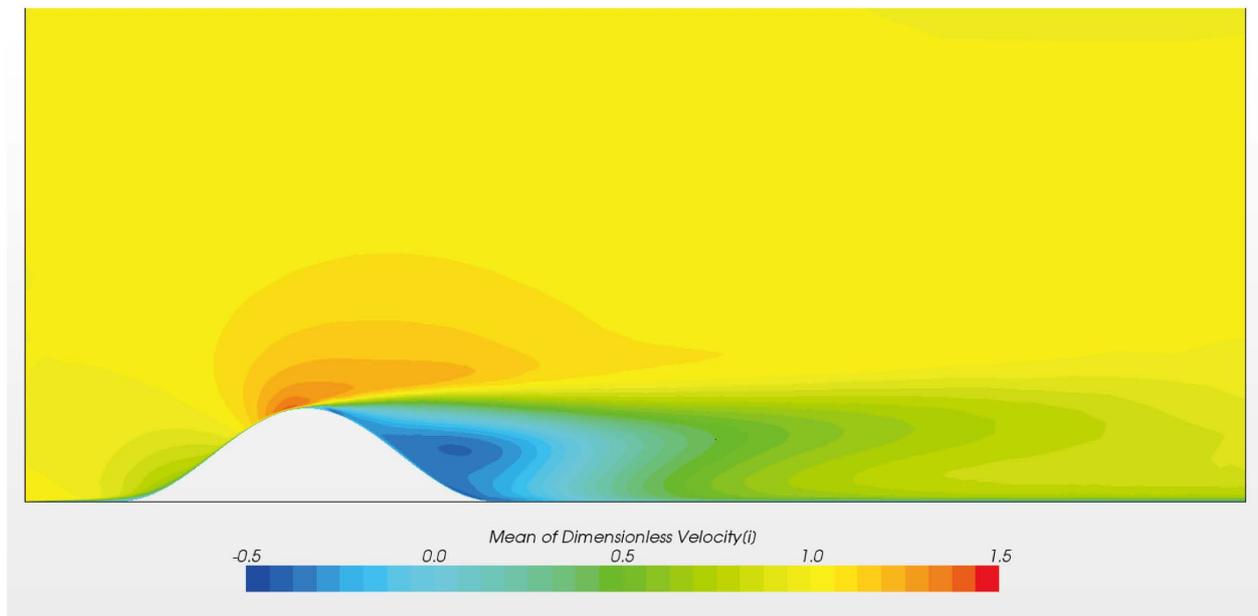


(b)数値計算(RIAM-COMPACT®), パッシブ粒子追跡法

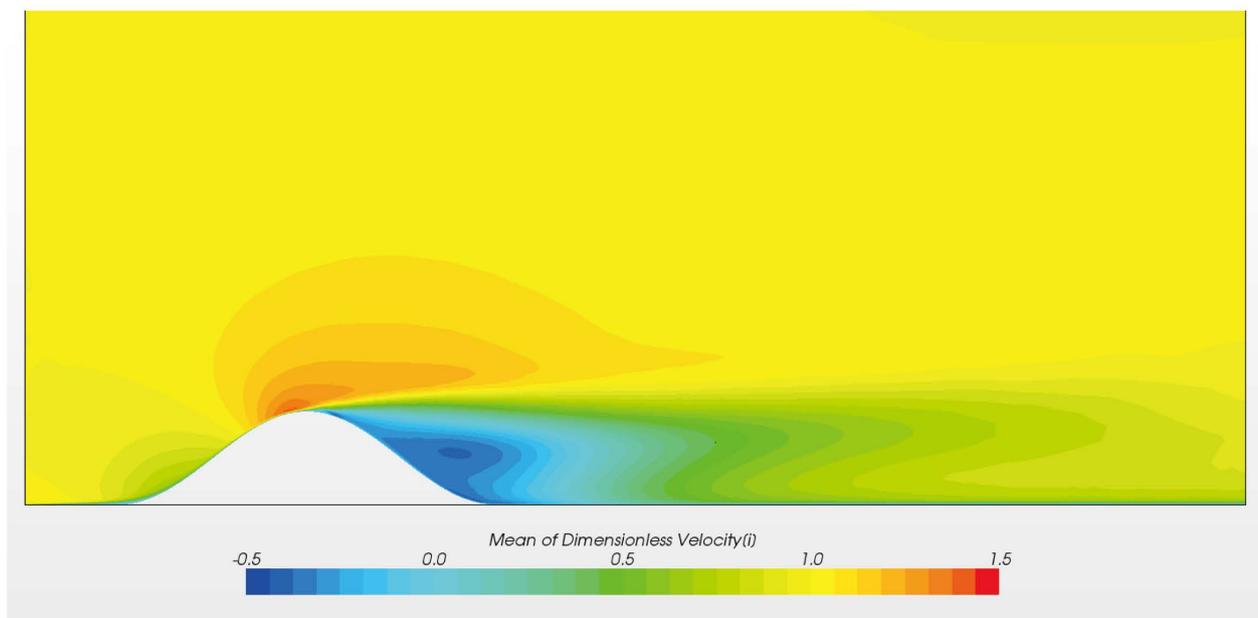
図5 孤立峰近傍における流れ場の可視化, 瞬間場

図6~図12に計算結果の比較を示す. ここで, 時間平均した流れ場や, 各種乱流統計量は, 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. これらの図(図6~図10)を吟味すると, STAR-CCM+におけるRANS系の計算結果(定常, 非定常)の傾向は両者で類似している. 一方, LES系の計算結果に注目すると, STAR-CCM+およびRIAM-COMPACT®の区別なく, 三者の計算結果(標準Smagorinskyモデル, WALEモデル)は非常に類似している. ここで特筆すべきは, LES系の計算結果では, 孤立峰背後に明確な渦中心が再現されているものの, RANS系ではそれが再現されていない.

⇒ Flow



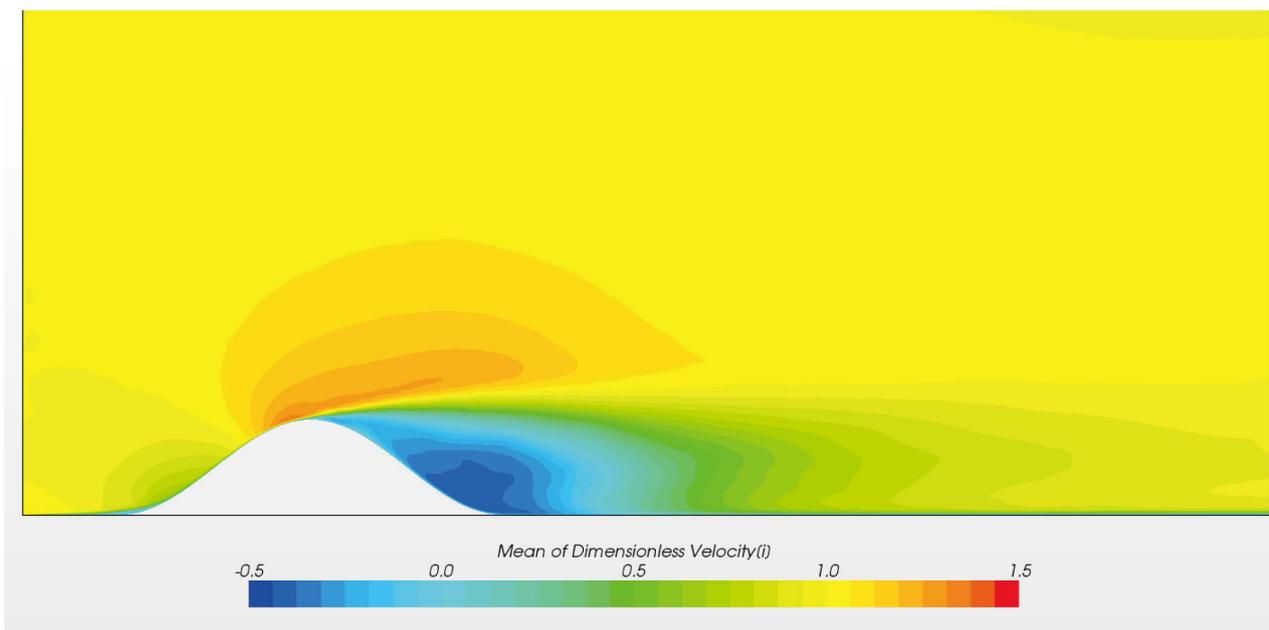
(a) Spalart-Allmaras 1 方程式渦粘性乱流モデル: 定常RANS



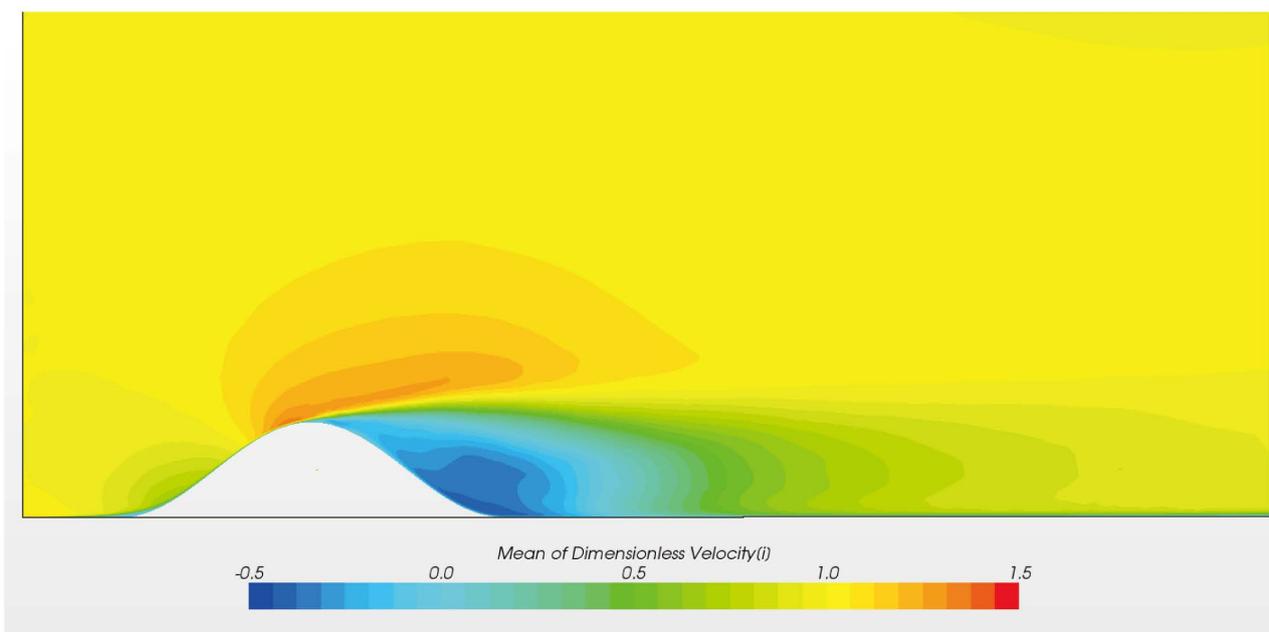
(b) SST $k-\omega$ 2 方程式渦粘性モデル: 非定常RANS(URANS), 時間平均場

図6 主流方向(x)速度成分の分布, RANS系の計算結果, STAR-CCM+, 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.

⇒ Flow



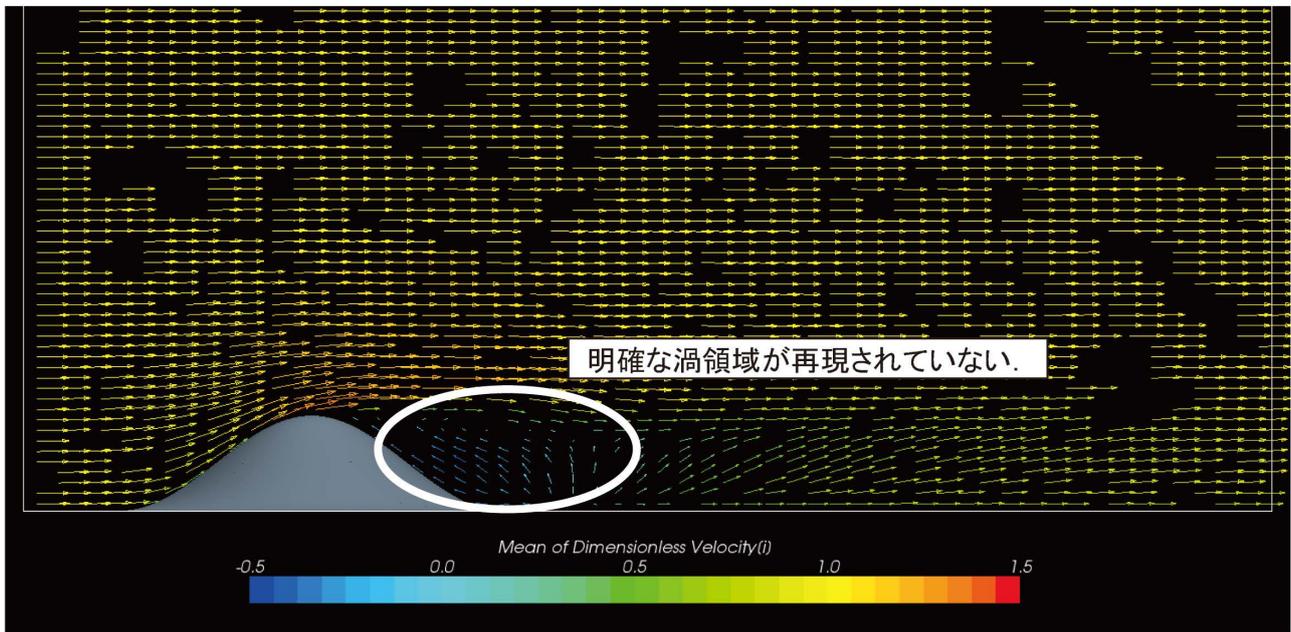
(a) 標準Smagorinskyモデル: LES



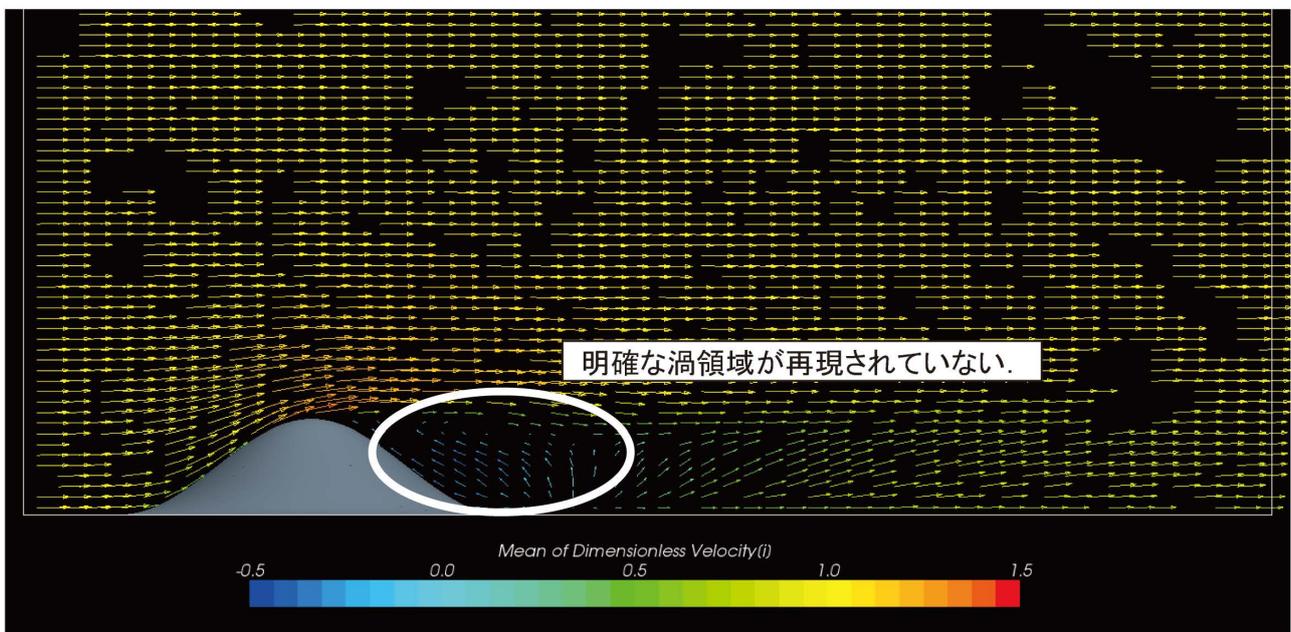
(b) WALEモデル: LES

図7 主流方向(x)速度成分の分布, LES系の計算結果, STAR-CCM+, 主流直交方向(y)の中央面(y=0), 時間平均場, ここで, 速度成分は一様流入風速で正規化されている.

⇒ Flow



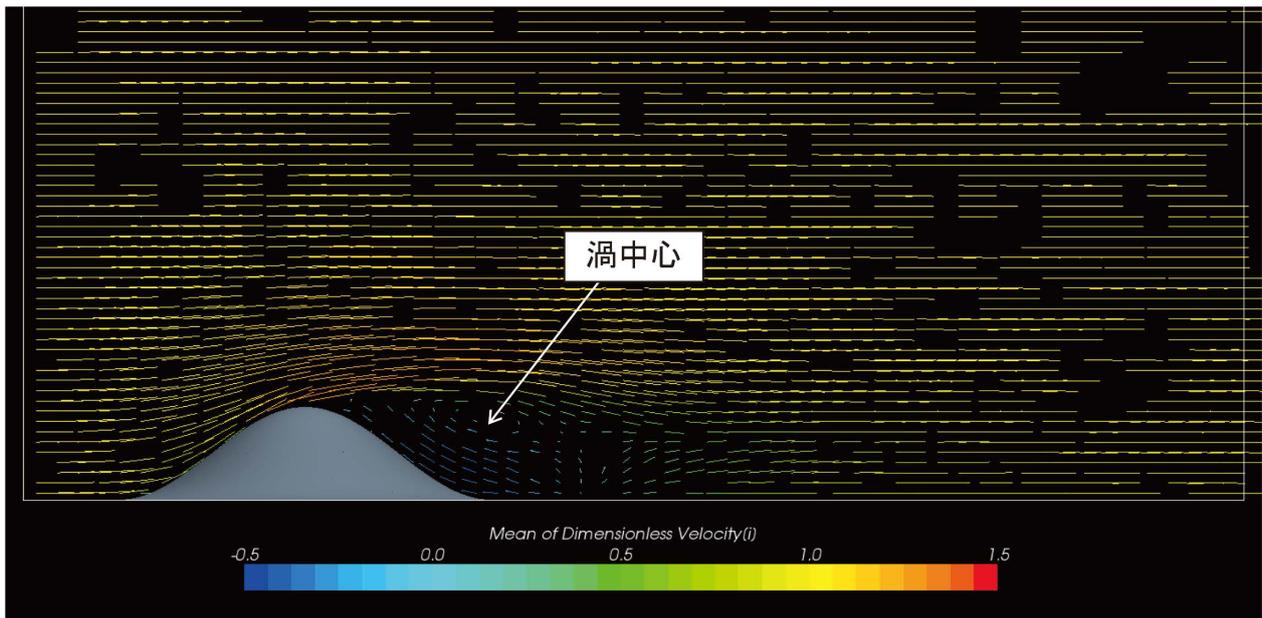
(a) Spalart-Allmaras 1方程式渦粘性乱流モデル: 定常RANS



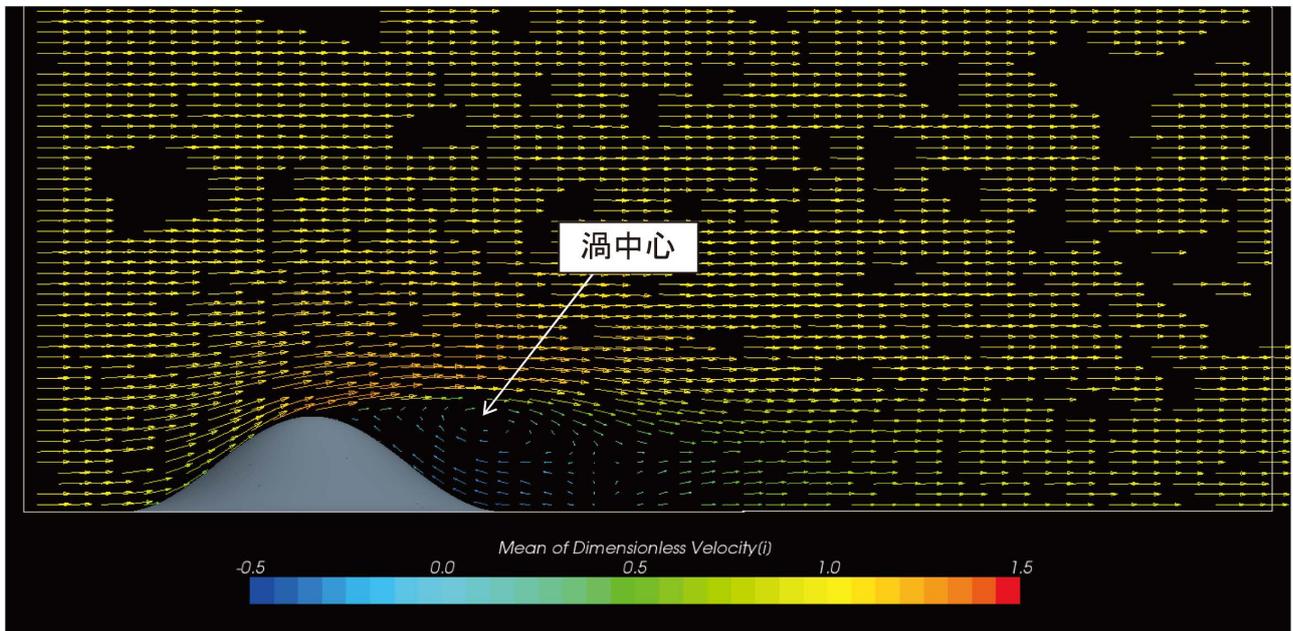
(b) SST $k-\omega$ 2方程式渦粘性モデル: 非定常RANS(URANS), 時間平均場

図8 速度ベクトルの分布, RANS系の計算結果, STAR-CCM+, 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.

⇒ Flow

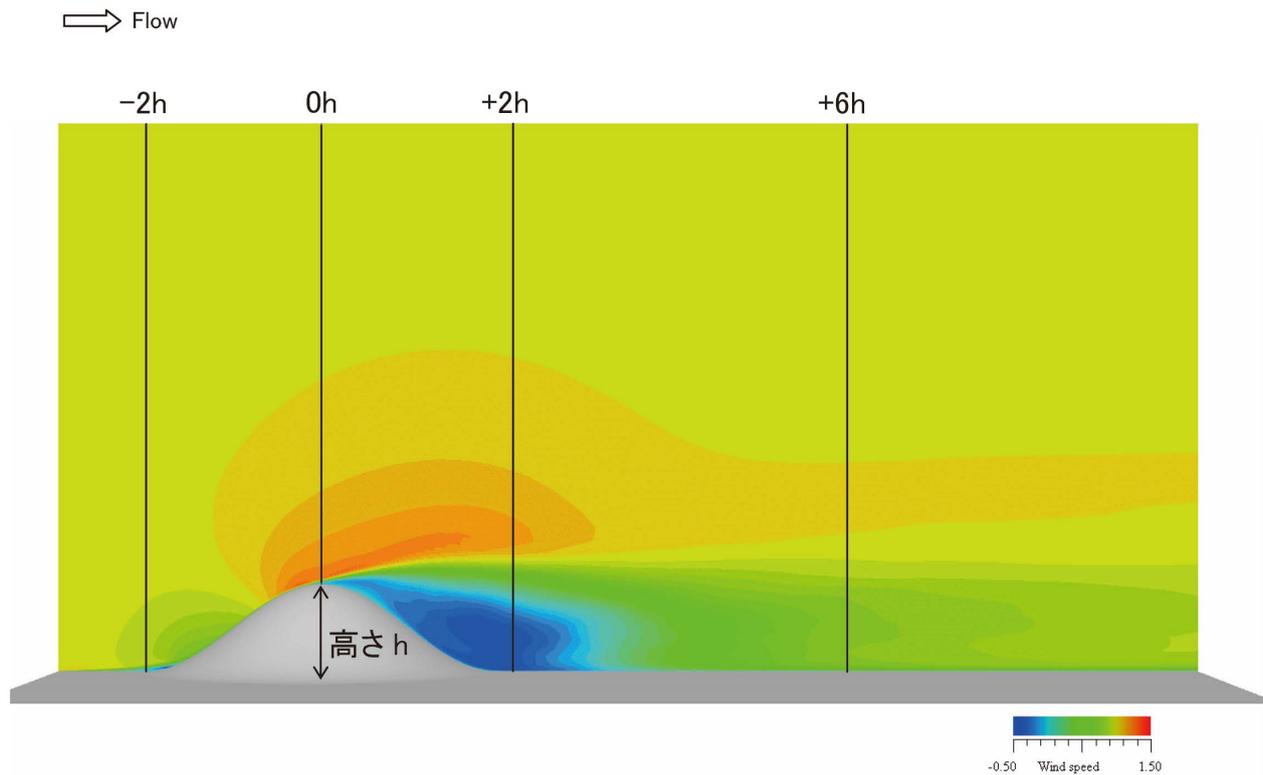


(a) 標準Smagorinskyモデル: LES

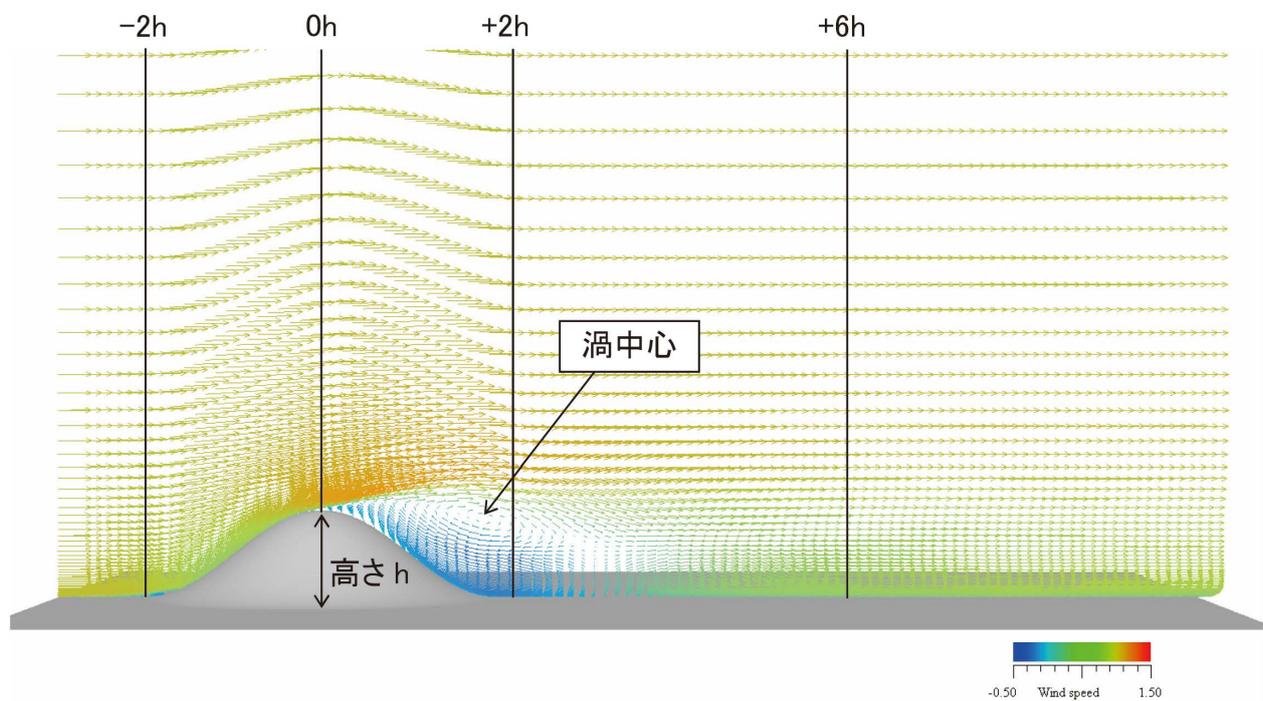


(b) WALEモデル: LES

図9 速度ベクトルの分布, LES系の計算結果, STAR-CCM+, 主流直交方向(y)の中央面(y=0), 時間平均場, ここで, 速度成分は一様流入風速で正規化されている.



(a) 主流方向(x)速度成分の分布



(b) 速度ベクトルの分布

図10 RIAM-COMPACT®の計算結果, LES, 標準Smagorinskyモデル, 主流直交方向(y)の中央面(y=0), 時間平均場, ここで, 速度成分は一様流入風速で正規化されている。

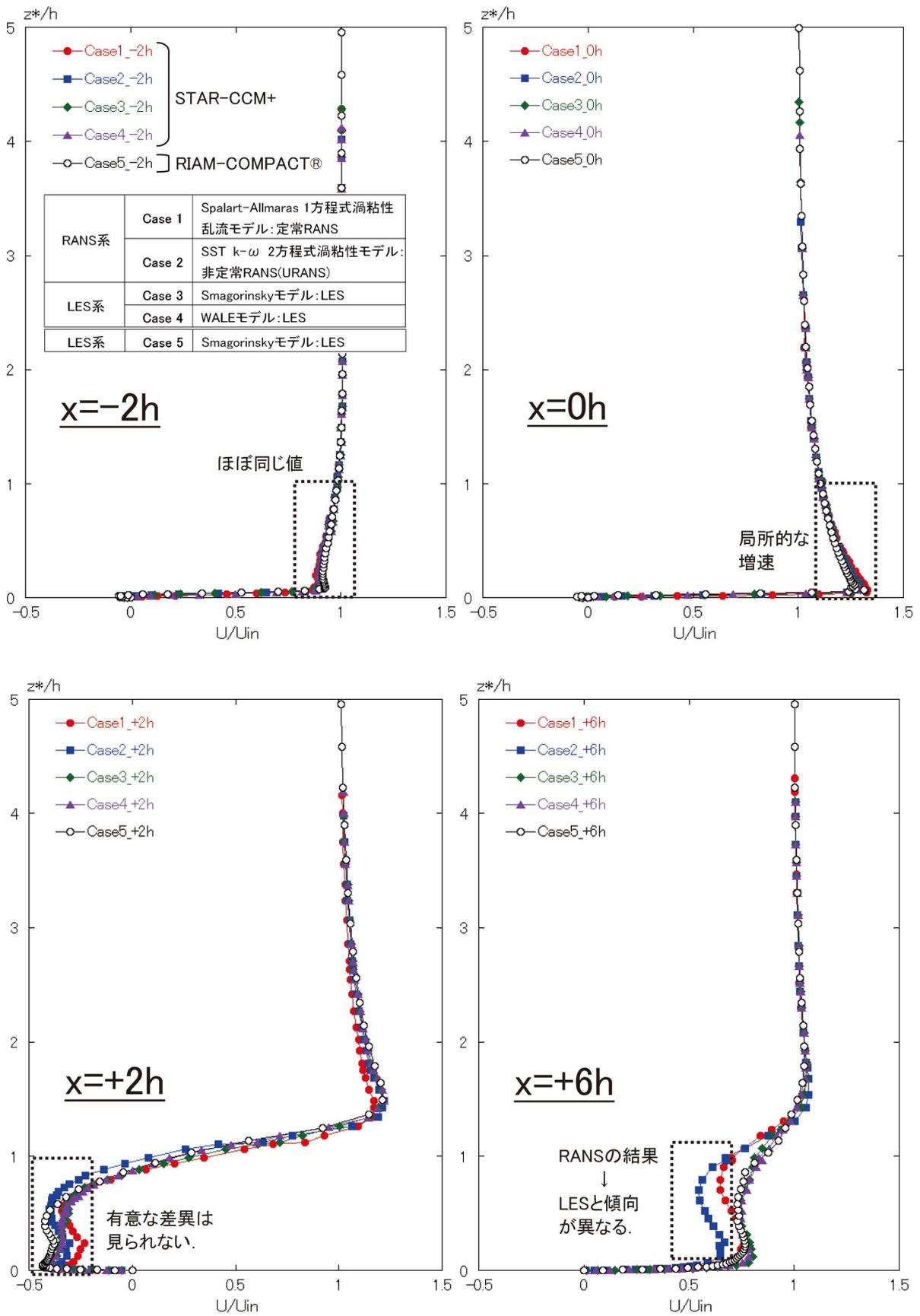


図11 主流方向(x)の平均速度プロファイルの比較, ここで, 速度成分は一様流入風速で正規化されている.

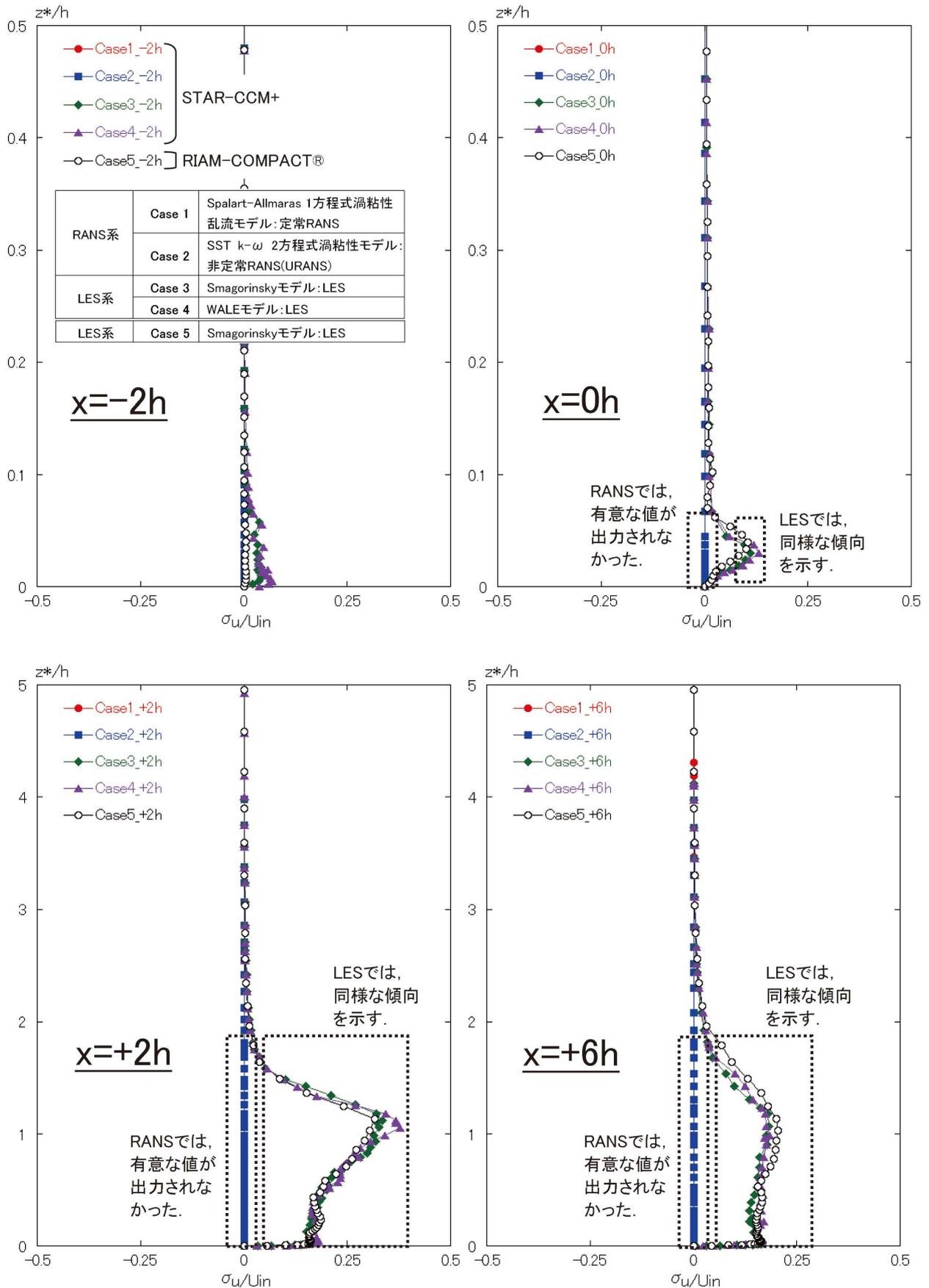


図12 主流方向(x)の標準偏差の比較, ここで, 標準偏差は一様流入風速で正規化されている。

図11および図12に示す乱流統計量(主流方向(x)の速度成分に対する平均風速, 標準偏差)の鉛直プロファイルに注目する. 乱流統計量の評価位置は, 図10に示す $x/h=-2, 0, +2, +6$ の4地点である. 図11に示す平均速度プロファイルに関して, $x/h=-2, 0, +2$ ではすべてのケースにおいて, 有意な差異は見られなかった. $x/h=0$ の孤立峰の頂部では, 局所的な増速が明確に観察される. $x/h=+2$ の孤立峰のすぐ背後では, 逆流域が観察される. $x/h=+6$ では, RANS系の結果とLES系の結果で異なる傾向が見られた. 複雑地形上の気流場予測を考えた際, 上記に示すRANS系の予測誤差は, 発電量の評価などにも大きな影響を及ぼすことになる. 図12に示す標準偏差の鉛直プロファイルに関して, 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. 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すことが明らかになった.

本報で示した計算結果に関して, RIAM-COMPACT®では, STAR-CCM+で用いた計算格子(非構造格子, 約100万点)の約5倍の計算格子(構造格子, 約500万点)を用いたにも関わらず, 約10倍程度高速に計算が終了することを確認した.

7. 結言

本報では, 急峻な傾斜角度を有する孤立峰を対象として, 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 $k-\omega$ 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.

計算結果の比較を通じて, 以下のことが明らかになった. 時間 $t=100-200(h/U)$ で評価した時間平均場の可視化図から, STAR-CCM+におけるRANS系の計算結果(定常, 非定常)の傾向は, 極めて類似していることが示された. 一方, LES系の計算結果に注目すると, STAR-CCM+とRIAM-COMPACT®から得られた両者の流れパターン(標準Smagorinskyモデル, WALEモデル)もほぼ同様な傾向を示すことが明らかになった. 但し, LES系の計算結果において観察された孤立峰背後の渦中心(逆流域)については, RANS系の計算結果において十分に再現されなかった.

乱流統計量(主流方向(x)の速度成分に対する平均風速, 標準偏差)の鉛直プロファイルの比較からは以下のことが示された. 本研究では, $x/h=-2, 0, +2, +6$ の4地点で乱流統計量を評価した. 平均速度プロファイルに関して, $x/h=-2, 0,$

$+2$ ではすべての乱流モデル間で有意な差異は見られなかった. $x/h=0$ の孤立峰の頂部では, 局所的な増速が観察された. $x/h=+2$ の孤立峰のすぐ背後では, 逆流域の存在を示す負の速度分布が観察された. $x/h=+6$ ではRANS系の結果とLES系の結果で異なる傾向が観察された. 複雑地形上の気流場予測を考えた際, RANS系で見られた平均風速の予測誤差は, 発電量の評価などにも大きな影響を及ぼすことになる. RANS系の計算では, すべての地点において有意な標準偏差の値が出力されなかった. これに対し, 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, 流れ場の可視化図と同様, 非常に類似した傾向が得られた.

参考文献

- [1] 内田 孝紀, 大屋 裕二, GPGPUコンピューティングによる数値風況予測技術RIAM-COMPACT®の高速化, 風力エネルギー協会誌, Vol.35, 通巻98, pp.78-84, 2011
- [2] 内田 孝紀, インテル次世代ハイエンドCPU「Sandy Bridge-EP」を用いたRIAM-COMPACT®のOpenMP並列風況シミュレーション—ここまでできた! デスクトップPC1台による大規模計算とその高速化—, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol.36, 通巻101, pp.82-85, 2012
- [3] 内田 孝紀, GPGPUコンピューティングによる数値風況予測技術RIAM-COMPACT®の高速化—第2報 マルチGPUによる大規模計算の試み—, 日本風力エネルギー学会誌, 通巻103, 2012
- [4] 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
- [5] 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
- [6] Smagorinsky, J., General circulation experiments with the primitive equations, Part 1, Basic experiments, Mon. Weather Rev., Vol.91, pp.99-164, 1963
- [7] 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
- [8] 内田 孝紀, 杉谷 賢一郎, 大屋 裕二, 一樣流中に置かれた急峻な単純地形まわりの気流性状の評価—3次元孤立峰モデルの場合—, 日本風工学会論文集, Vol.31, pp.63-74, 2006

Appendix

ここでは、今回実施したRIAM-COMPACT®による計算結果(標準Smagorinskyモデルに基づくLES, 図2に示す計算領域を用いた結果)と、過去に我々が実施した風洞実験の結果⁸⁾の比較を示す。ここで、図13および図14ともに、横軸は各地点における上空風速 U_{ref} で、縦軸はモデル高さ h で正規化した。なお、縦軸の z^* は孤立峰モデル表面からの高さを示す。得られた計算結果を観察すると、計算領域がやや狭いことによる計算結果と風洞実験の乖離が確認されるが、全体的な傾向は良く一致した。

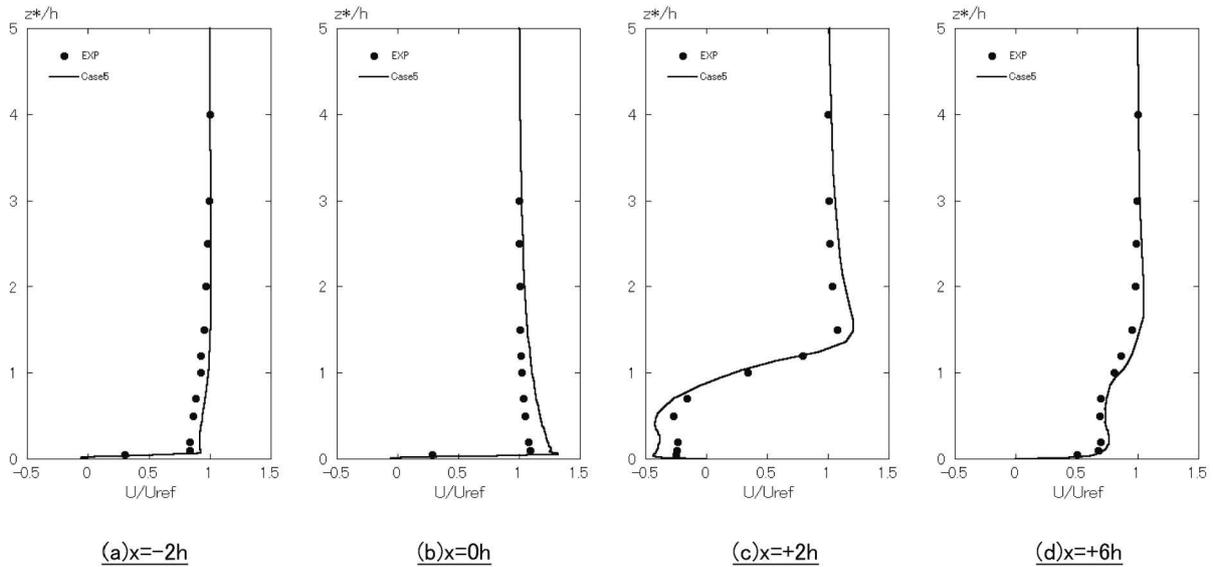


図13 主流方向(x)の平均速度プロファイルの比較, シンボル: 風洞実験, ライン: 計算結果(RIAM-COMPACT®によるLES)

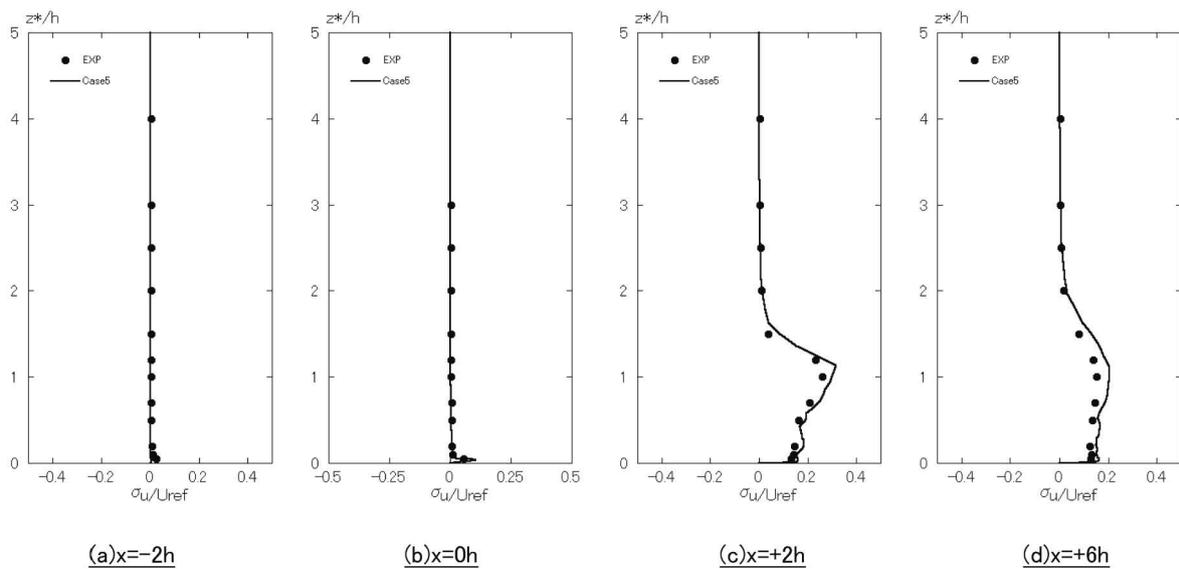


図14 主流方向(x)の標準偏差の比較, シンボル: 風洞実験, ライン: 計算結果(RIAM-COMPACT®によるLES)