

標準 $k-\varepsilon$ モデルを用いた複雑地形周りの流れ解析

Analysis of Flow around Complex Terrain using Standard $k-\varepsilon$ Model

片桐純治¹⁾, 大熊武司²⁾, 岡田創³⁾, 野田博⁴⁾, 丸川比佐夫⁵⁾
Junji KATAGIRI¹⁾, Takeshi OHKUMA²⁾, Hajime OKADA³⁾,
Hiroshi NODA⁴⁾, Hisao MARUKAWA⁵⁾

ABSTRACT

This paper compares flows around complex terrains obtained from computational fluid dynamics with those from wind tunnel tests targeting the area from the seashore at Hiratsuka to Lake Tsukuiko in a mountainous area 32km long by 4.5km wide in Kanagawa prefecture. As the first step of CFD for flow around complex terrain, the study is carried out by using a standard $k-\varepsilon$ model which is composed of basic turbulent model.

The studies clarify that CFD's results are some difference from the experimental results on the profiles of mean wind speed at the wake of complex terrain. The CFD's results estimate some small value near the ground.

Key Words: CFD, standard $k-\varepsilon$ model, wind tunnel test, complex terrain

1. はじめに

建築基準法及び建築物荷重指針¹⁾の風荷重算定では、地域毎に与えられた基本風速 V_0 に、建設場所の周辺建物状況に応じた風速鉛直分布係数 E を乗じて設計風速が求められる。しかし、山岳地等の起伏の激しい地域では、建築物が建設される地域の地形の影響を含めた局所的な風の状況を考慮して耐風設計を行う必要がある。

地形を考慮した風速の予測手法としては、広範囲の地形の影響を考慮するため数値流体解析が適しており、すでに風力発電用風車の発電効率の予測²⁾⁻⁵⁾等或いは山岳地における送電鉄塔の風荷重評価⁶⁾を目的として数値流体解析による検討が行われている。また、複雑地形の流れの予測に数値流体解析を適用することの妥当性は、独立・連立峰あるいは急な傾斜地等の風洞実験結果及びフィールドでの観測結果との比較により確認されている。実際の複雑地形を対象とした風洞実験との比較検討についても研究例はあるが^{4),6),7)}、広範囲の地形をモデル化した風洞実験結果との比較は余りない。

本研究は、地形を考慮した局所的な設計風速を求めることを目的としており、本論文では複雑地形周りの流れの予測に数値流体解析を適用した場合の予測結果の精度を検証するために、神奈川県の一部の地形を風洞測定部全体にモデル化して行った風洞実験と数値流体解析の比較検討を行った結果について報告するものである。

地形を対象とした解析では、広域から地表面近傍までを対象とする必要があるため、ネスティングによる解析手法が用いられている。本研究でもこの手法を用いることを考え、広範囲の流れの様子を捉えるための 50km~100km 四方を対象とする場合と、この結果を初期値に用いて地表面付近の流れを対象とする場合の 2 つの状況を想定して、解析範囲及び格子間隔を変えて解析を行い、風洞実験結果との比較検討を行った。なお、既往の研究における解

^{1,3,5)} ㈱泉創建エンジニアリング, 副所長, 主任研究員, 所長 (〒299-0264 袖ヶ浦市南袖 51)

²⁾ 神奈川大学工学部建築学科, 教授 (〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋3-27)

⁴⁾ 三井住友建設㈱技術研究所, グループ長 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)

析では、後流域の予測精度等を考えて、改良型の $k-\epsilon^{2), 3), 7)}$ あるいは $LES^{4), 5)}$ が用いられているが、本研究では研究の第一段階として基本的な乱流モデルである標準 $k-\epsilon$ モデルを用いて検討を行った。

2. 実験方法概要

実験風洞は、幅 2.2m、高さ 1.8m、測定部長さ 20m の室内回流式エッフェル型風洞で行った。

実験模型は、図 1 に示す平塚海岸から津久井湖までの幅 4.5km、長さ 32km(模型スケールで幅 1.8m、長さ 12.8m)の地形を縮尺 1/2500 で模型化したものである。地形の模型化は、厚さ 4mm のベニヤ板(海岸付近では厚さ 2mm のベニヤ板)を縮尺 1/2500 の地形図に基づいて 10m 毎(模型上 4mm)の等高線でカットし、これを積み上げることによって作成した。地形模型と風洞壁面の隙間には、模型端部と同じ高さにカットしたスチレンボードを設置した。建物等の構造物は模型化していないが、地表面の粗度として模型表面に 4mm 角のラフネスブロックを 30mm 間隔で山岳地を除き千鳥に貼り付けた。このラフネスブロックにより発達する境界層は、図 3 に示すようにべき法則では $\alpha=0.2$ の分布に近似している。対数則では、ゼロ面変位 d をラフネスブロック高さの 0.6 倍の 2.4mm とした場合に床面近傍の風速勾配は粗度長 $z_0=0.02$ mm の分布に近似している。実験風速は $X=-8.5$ km 地点の高さ 1.2m において約 10m/s とした。

実験では、海側からの風を対象として、図 1 に ● で示す 15 個所の鉛直方向の平均風速を測定した。測定時間は 30 秒とした。図 1 に示す $X=-16.5$ km より風上側の測定は、縦型の I 型プローブの熱線風速計を風洞床下より手で測定高さに設置して行った。 $X=-8.5$ km より風下側の測定は X 型プローブの熱線風速計をトラバース装置で測定位置に移動して行った。X 型プローブの測定では $u-w$ もしくは $u-v$ 成分を測定した。なお、測定位置の高さ 12mm にタフトを設置して行った目視観測では、全ての測定位置において逆流は生じていなかった。

3. 数値流体解析方法概要

数値流体解析は、標準 $k-\epsilon$ モデルを用いて行った。時間進行は 2 次陽解法(Adams-Bashforth 法)とした。 u, v, w の

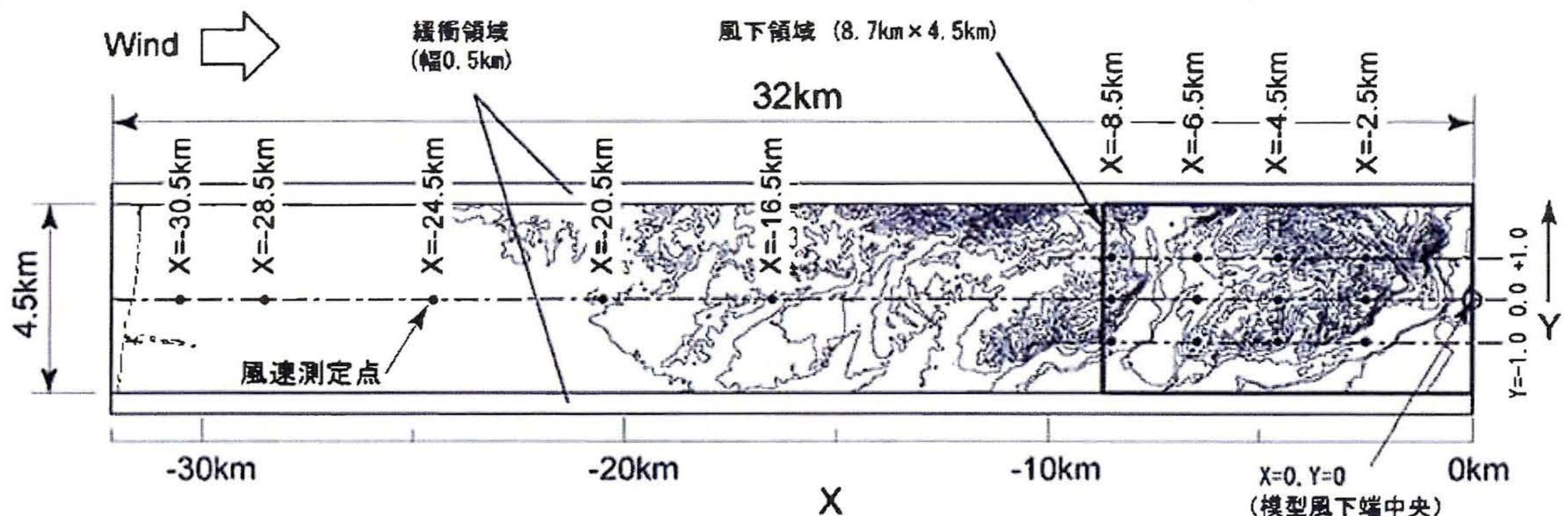


図 1 対象地域及び風速測定点



図 2 実験模型(風下側より撮影)

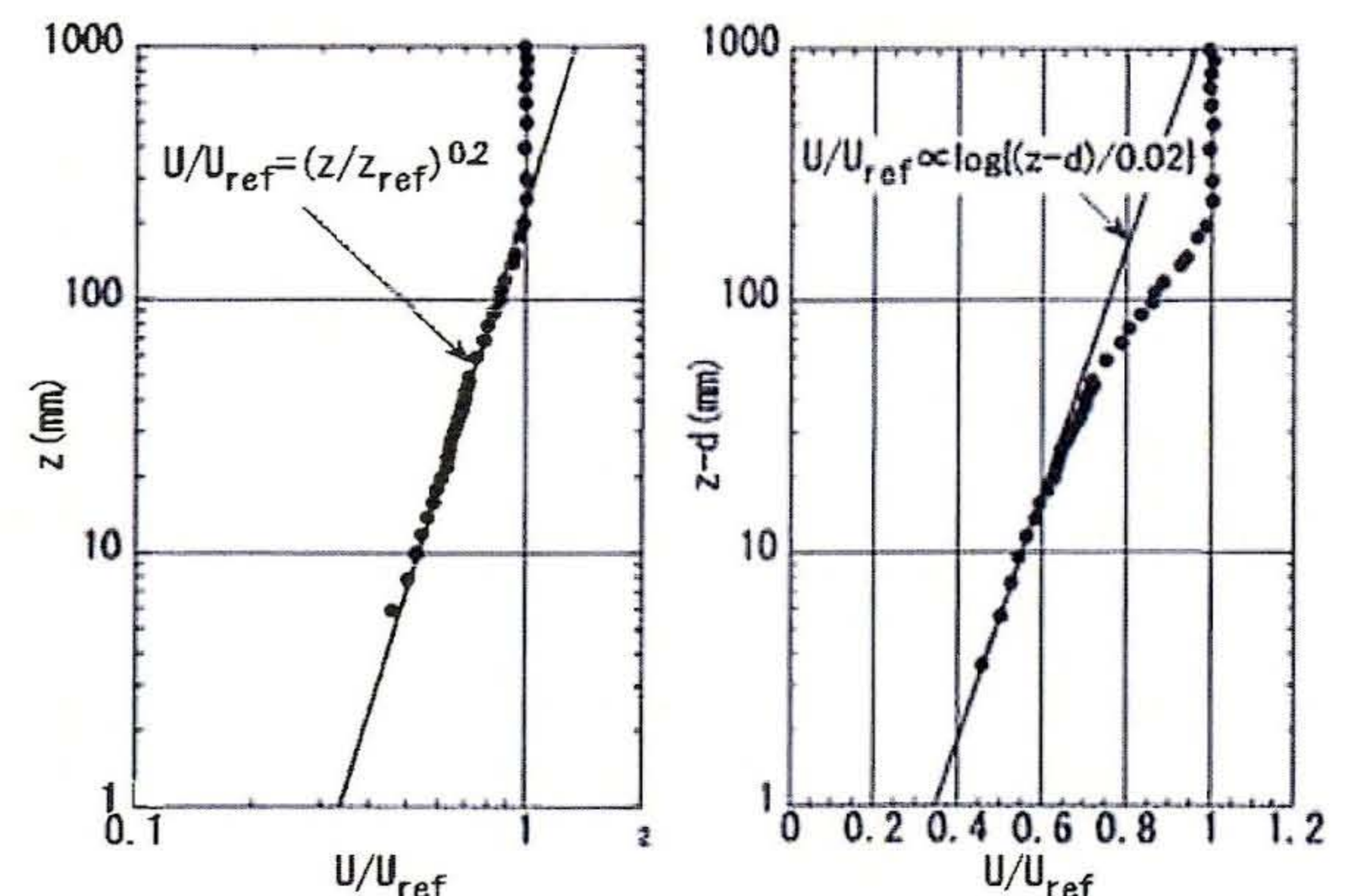


図 3 模型に貼り付けたラフネスブロックにより平板上に発達する風速分布の測定結果

空間微分の差分近似は、移流項は3次風上差分(UTOPIA)、拡散項は2次中心差分、 k, ϵ の空間微分の差分近似は、移流項は1次風上差分、拡散項は2次中心差分を用いた。連続の式の収斂計算はHSMAC法によった。

解析は、風洞模型全体を対象とした場合(以下、Case1)と風下の8.5kmの領域を対象とした場合(以下、Case2)の2ケースについて行った。計算格子は構造格子とし、表1に示すようにCase1では100km四方程度の広範囲の解析を想定した水平方向400m、地表面付近の鉛直方向100mの格子(以下、格子A)と50km四方程度の解析を想定した水平方向100m、地表面付近の鉛直方向50mの格子(以下、格子B)の2種類とし、Case2では10km四方程度の解析を想定して水平方向50m、地表面付近の鉛直方向25mの格子1種類とした。地形の数値データは、Case1では50mメッシュ地形図(国土地理院)、Case2では10mメッシュ地形図(北海道地図(株))とした。図4にCase1の格子B及びCase2の解析モデルを示す。格子接点数は、Case1の格子Aは $81 \times 15 \times 23 = 27,945$ 、格子Bは $321 \times 51 \times 42 = 687,582$ 、Case2は $175 \times 91 \times 49 = 780,325$ である。なお、Case2の領域において水平方向25m、鉛直方向12.5mの格子を用いた解析も行ったが、Case2の結果と大きな差が無かったため、本論文ではCase2での結果を示した。

なお、複雑地形の解析では、一般座標系や非構造格子あるいは構造格子にFAVOR法⁸⁾やIBM^{9),10)}を適用するなどして解析精度を上げることが考えられるが、本研究では乱流モデルや解析モデルを変えての精度向上に関する検討は今後の課題とし、最も基本的な乱流モデルである標準 $k-\epsilon$ モデルによる風況予測精度の検証を行った。

流入境界及び初期値は、Case1では実験模型の風上端部中央の測定結果に基づいて平均風速及び乱流エネルギー $k (= \sigma_u^2 / 1.2^{11})$ 、 σ_u : u 成分の変動風速の標準偏差)の鉛直方向分布を流入境界に与え、初期値はこれと同じものを解析領域全体に一様に与えた。Case2では、Case1の格子Bにおける解析値を補間して流入及び初期値とした。床面境界は、粗度長 $z_0 = 0.5\text{m}$ (模型上0.02mm)、ゼロ面変位 $d = 6\text{m}$ (模型上2.4mm)の対数則、側壁面及び天井面の境界はスリップ、流出は自由流出とした。解析におけるレイノルズ数は風洞実験と同じとした。

4. 結果及び考察

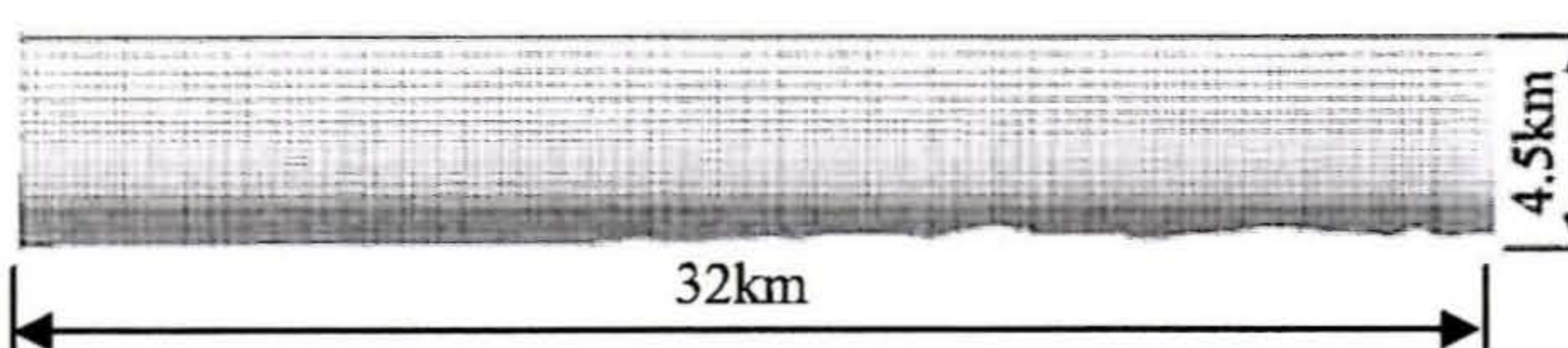
4.1 平板境界層における検討

地形模型を用いた検討に先立ち、地形模型に貼り付けたものと同じラフネスブロックを、流れ方向5.4m、横方向1.8mの範囲の平板に貼り付けてこれに発達する境界層について風洞実験及び数値解析により検討を行った。数値

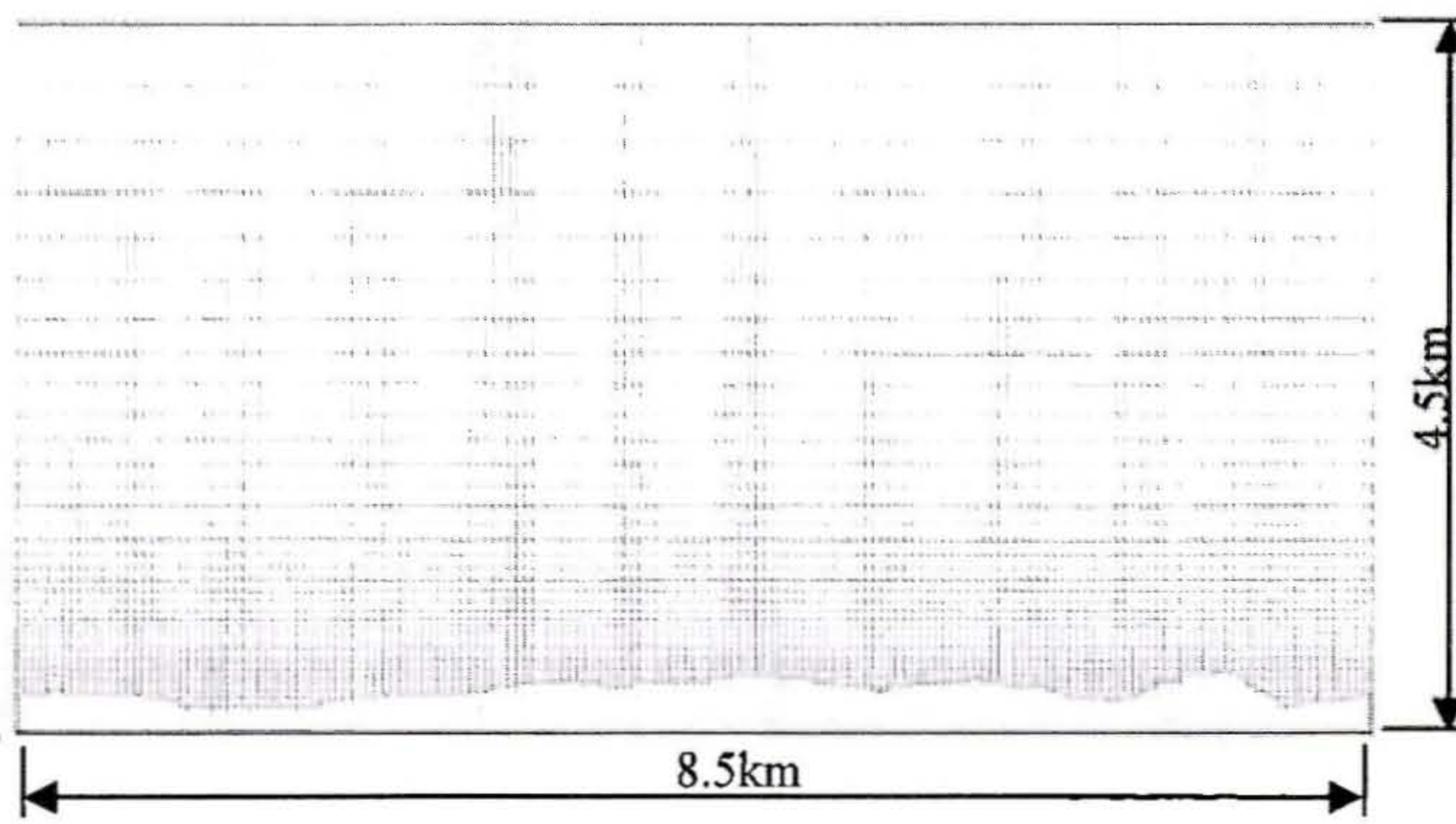
表1 計算格子間隔

		x方向	y方向	z方向 最小間隔
Case1	格子A	400m (81)	400m (15)	100m (23)
	格子B	100m (321)	100m (51)	50m (42)
Case2		50m (175)	50m (91)	25m (49)

括弧内は格子接点数



(i) 計算格子(x-z断面, Y=0km)

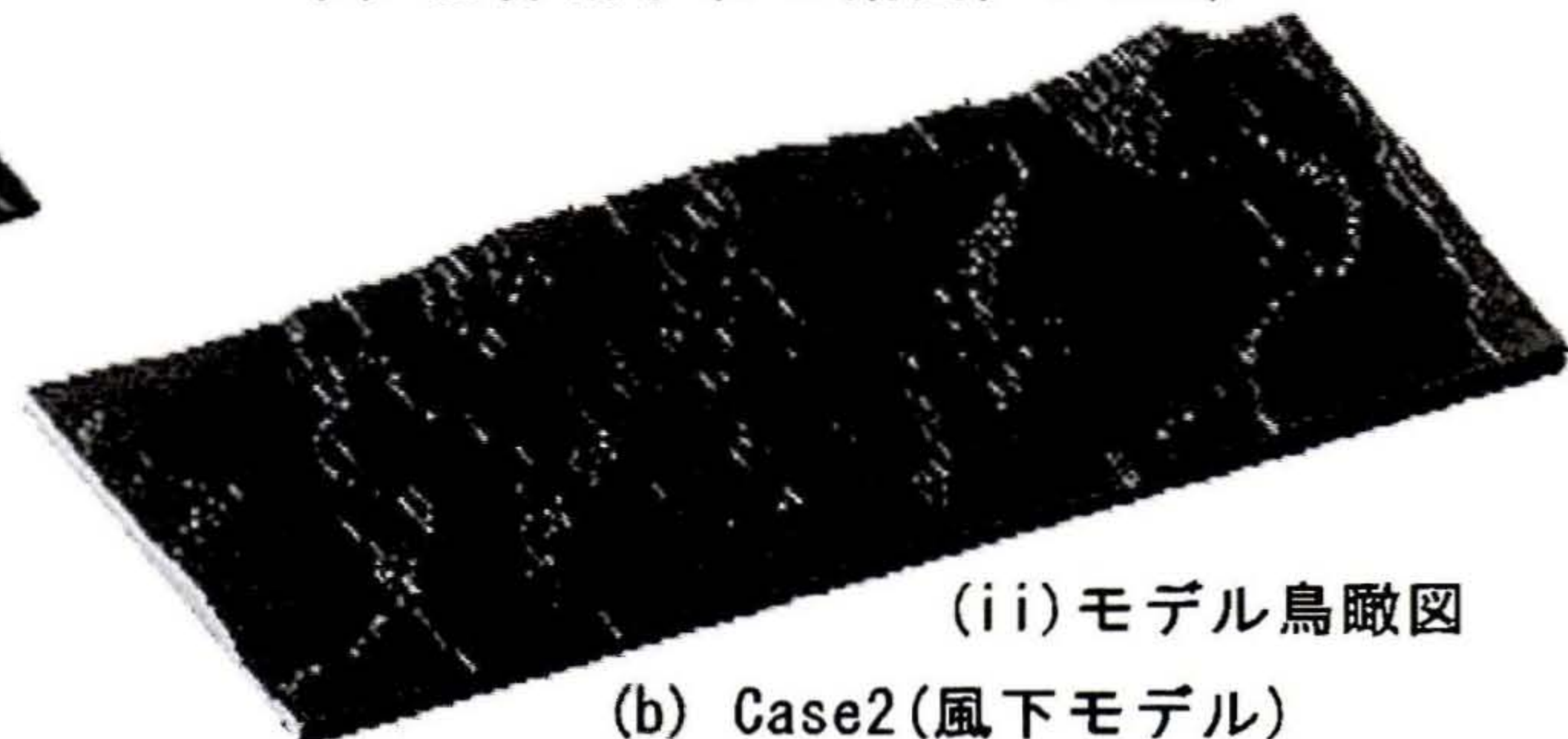


(i) 計算格子(x-z断面, Y=0km)



(ii) モデル鳥瞰図

(a) Case1(全体モデル), 格子B



(ii) モデル鳥瞰図

(b) Case2(風下モデル)

図4 解析モデル

解析での流入は、ラフネスブロックの風上端部における測定結果を用いた。

図5に風下端部における実験結果と表1に示した3種類の計算格子による解析結果の比較を示す。

解析結果は実験結果と比較して、Case1の格子B及びCase2では良く一致しており、格子Aにおける結果は、60mm以上の上空では他の解析結果と一致しているが、床面付近ではやや大きめの値となっている。

図には、大熊他¹²⁾よりラフネス密度を用いて求めた $z_0=0.04\text{mm}$ 、 $d=1.5\text{mm}$ とCounihan¹³⁾より α を用いて求めた $z_0=0.14\text{mm}$ (縮尺1/2500で換算)を用いたCase2の格子での解析結果も示した。大熊他による d と z_0 を用いた結果は、実験値よりやや小さいが概ね一致しており、Counihanによる z_0 を用いた結果は実験値より風速が低くなっている。これらと比べて d と z_0 をそれぞれ2.4mm及び0.02mmとした解析結果は実験値とより一致しており、これらの値を用いることが妥当なものと考えられる。

4.2 Case1の解析結果と実験結果の比較

図6に中央部の流れ方向の測定点におけるCase1の格子A及びBによる解析結果と実験結果の比較を示す。

$X=-8.5\text{km}$ 地点より風上では、格子Aの $X=-8.5\text{km}$ 地点を除き格子A及びBとも風速分布及び境界層高さとも解析結果は実験結果と一致しており、風上から境界層が発達していく様子が得られている。 $X=-6.5\text{km}$ より風下では、境界層高さは実験値と解析値では一致しているが、風速分布は実験値に見られる風速低下の様子が格子A及びBの解析値とも一致

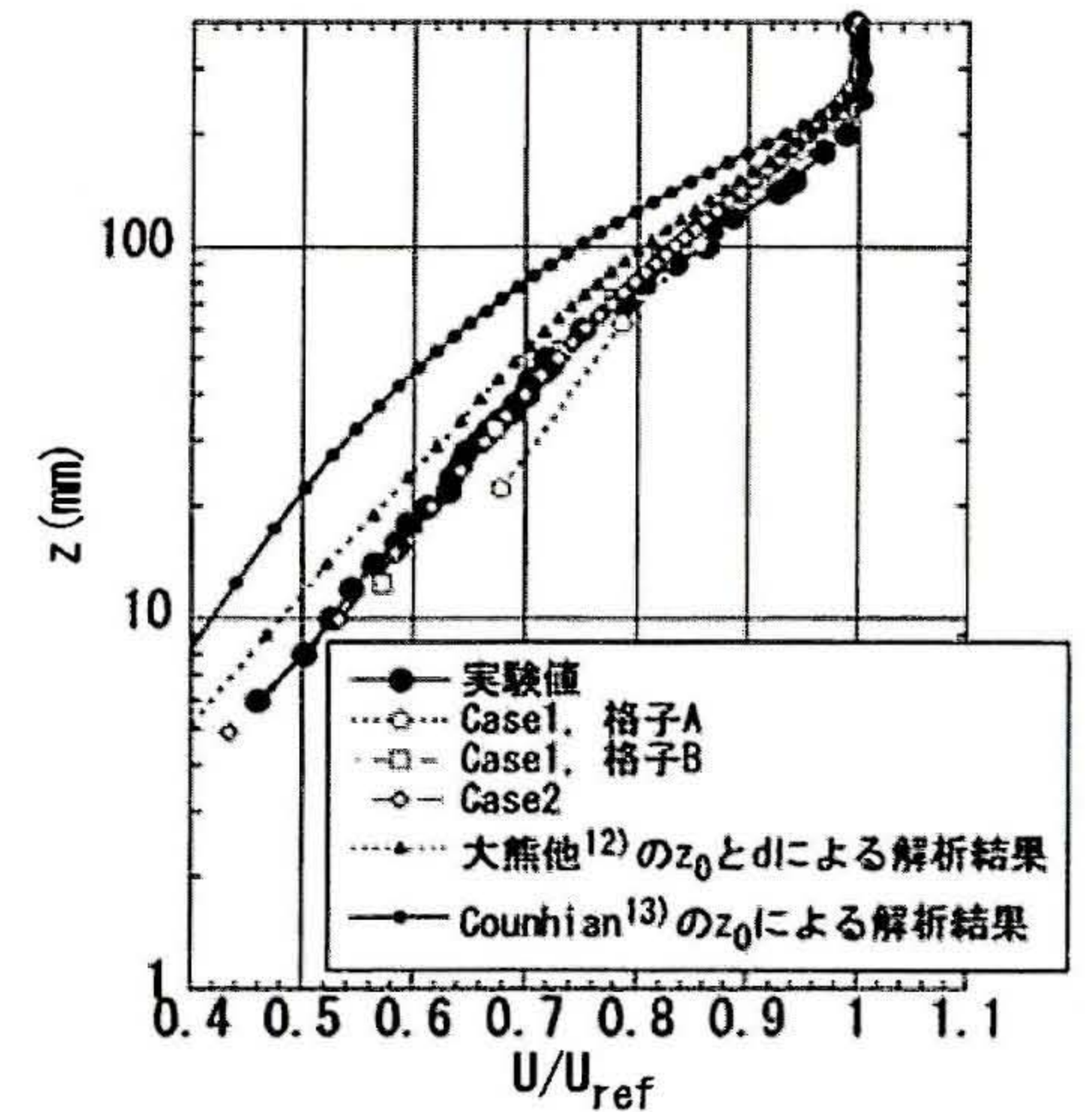


図5 平板境界層の解析結果

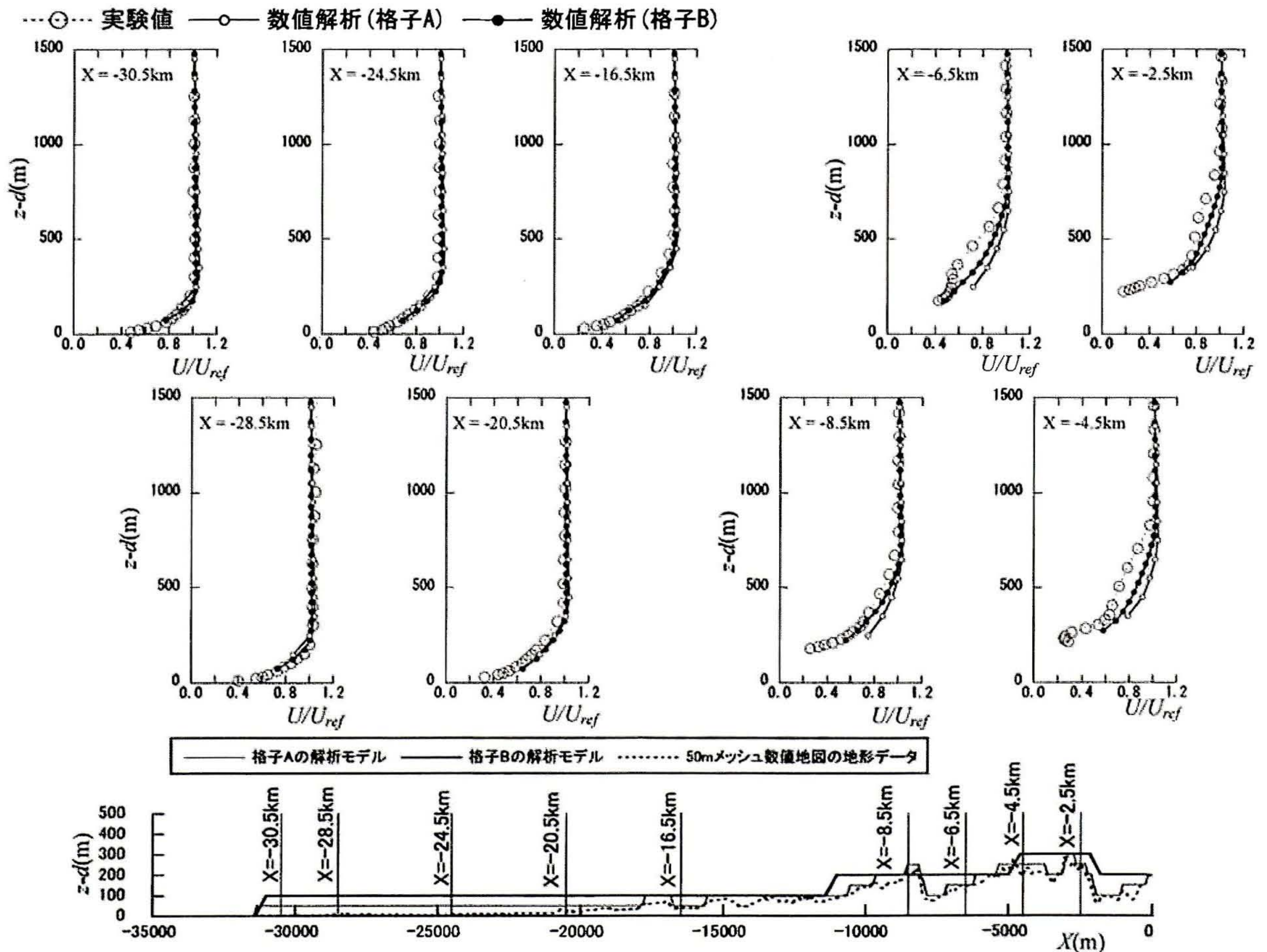


図6 Case1の解析結果及び実験結果(Y=0km)

していない。これは、格子A, Bとも地形の凹凸が十分に再現されていないためと考えられる。また、 $X=-8.5\text{km}$ より風下での格子Bの結果は、地表面付近の値は格子Aよりも大きくなる結果が得られている。

4.3 Case2の解析結果と実験結果の比較

図7にCase2の風下領域における u 成分及び v 成分の解析結果と実験結果の比較を示す。

Case2の u 成分の解析結果は、中央部($Y=0\text{km}$)及び風下側($X=-2.5\text{km}$)を除き地表面付近まで一致している。中央部では、流入部付近の $X=-8.5\text{km}$ 地点では実験値とほぼ一致した結果が得られているが、 $X=-6.5\text{km}$ より風下側の地表面付近の風速は、実験値と一致しているものの風速分布には差が見られる。これは、 $X=-8\text{km}$ 付近にある起伏からの剥離流がCase2においても十分に表されていないためと考えられる。また、 $X=-2.5\text{km}$, $Y=\pm 1\text{km}$ 地点の地表面付近において解析値は実験値よりやや小さめの値となっている。

v 成分の解析結果は、中央($Y=0\text{km}$)の $X=-6.5\text{km}$ において明瞭な差異が見られるが、その他では地表面の近傍を

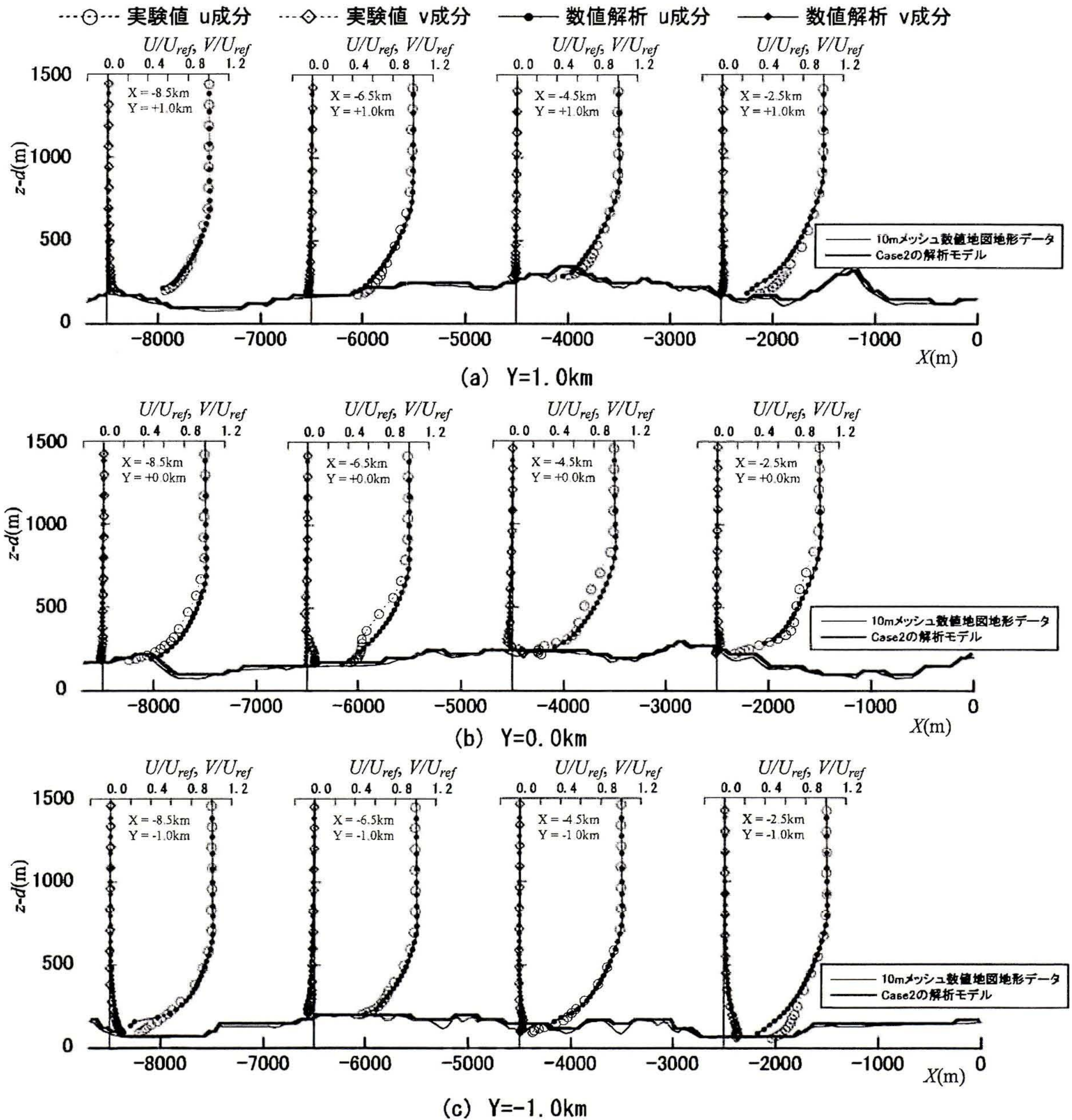


図7 Case2の u, v 成分の解析結果と実験結果の比較

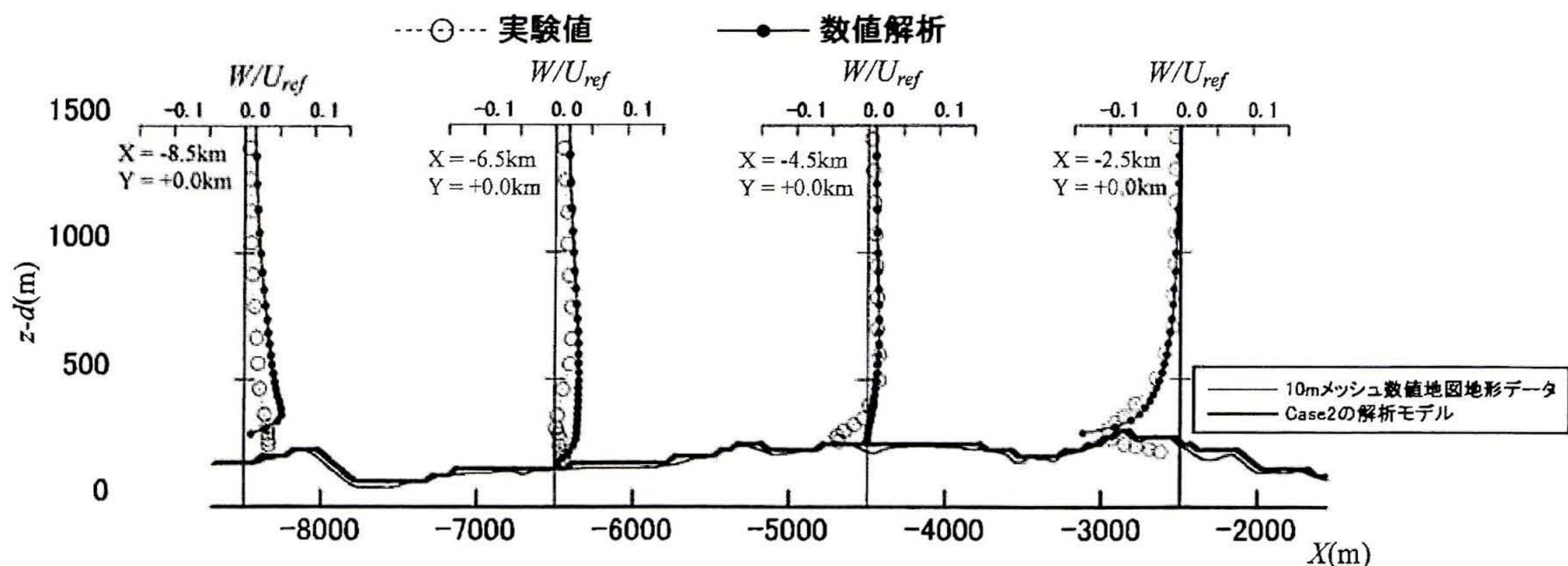


図 8 Case2 の w 成分の解析結果と実験結果の比較 ($Y=0\text{km}$)

除き定性的傾向は一致した結果が得られている。

図 8 に、中央部($Y=0\text{km}$)における w 成分の実験結果と解析結果の比較を示す。 w 成分の解析結果は、地表面付近において実験値と異なるもののその差異は小さい。

5. まとめ

数値流体解析による複雑地形周りの予測精度検証のために、縮尺 1/2500 で神奈川県小平海岸から津久井湖までの地形を風洞全体にモデル化した風洞実験及びこれを対象とした標準 $k-\varepsilon$ モデルによる数値流体解析を行った。本研究では、広域の流れの予測を想定した場合と、この結果を初期値として地表面付近の流れの予測を想定した場合の 2 ケースについて解析範囲及び格子間隔を変えた解析を行い、それぞれ実験結果との比較を行った。

本研究より、標準 $k-\varepsilon$ モデルによる解析結果は、実験結果と比べて起伏の激しい地形の後流域において鉛直方向の風速分布がやや異なる部分が有ること及び地上付近で風速がやや小さめとなる部分が有ることが明らかとなった。

謝辞

本研究は、文部科学省・神奈川大学学術フロンティア推進事業「災害リスク軽減を目的としたソフト・ハード融合型リスクマネジメントシステムの構築に関する研究(平成 17-21 年)、研究代表者荏本孝久教授」の一部として行ったものである。また、本研究を行うに当たり、神戸大学中山昭彦教授に貴重なご意見を頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 建築物荷重指針・同解説, 日本建築学会, 2004 年
- 2) 村上周三, 持田灯, 加藤信介, 木村敦子, 局所風況モデルシステム LAWEPS の開発と検証, ながれ 22 (2003) 375-386
- 3) 石原孟, 非線形風況予測モデル MASCOT の開発と実用化, ながれ 22 (2003) 387-396
- 4) 中山昭彦, 複雑地形のシミュレーション例と今後の課題, ながれ 22 (2003) 397-403
- 5) 内田孝紀, 大屋裕二, 風況シミュレータ RIAM-COMPACT の開発—風況精査とリアルタイムシミュレーション—, ながれ 22 (2003) 417-428
- 6) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三, 複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証, 土木学会論文集 No.731(2003)195-211
- 7) 服部康男, 奥田慎也, 石川智巳, 加藤央之, 送電設備の風荷重・風応答評価技術, 電中研レビュー N0.48 (2003) 39-43
- 8) Hirt, C.W., Volume-fraction techniques : powerful tools for wind engineering, J. Wind Engineering, No.52(1992.8)333-344
- 9) Tsehg, Y.H., Ferziger, J.H., A ghost-cell immersed boundary method for flow in complex geometry, J. comput. Phys. Vol.193 (2003) 593-623,
- 10) 千秋雅信, 中山昭彦:一般座標を用いた流れの計算における IBM 法の適用, 応用力学会論文集, Vol.8 (2003) 919-927
- 11) Yamaguchi, A., Ishihara, T., Fujino, Y., Experimental study of the wind flow in a coastal region of Japan, JWEIA 91 (2003) 247-264
- 12) 大熊武司, 丸川比佐夫, 宮下康一, 市街地を対象とした乱流境界層の風洞実験による基礎的研究, 風工学シンポジウム(1986) 61-66
- 13) Counihan, J., Adiabatic Atmospheric Boundary Layers, Atmospheric Environment, 9 (1975) 871-905