複数開口を有する室を対象とした風の乱れによる換気効果に関する研究
（その 9）風洞実験による CFD 解析の精度検証
Ventilation Effect of External Wind Turbulence for a Room with Multiple Openings
(Part 9) Accuracy Verification of CFD by Wind Tunnel

○藤田 拓也（大阪市立大学）　小林 知広（大阪市立大学）
梅宮 典子（大阪市立大学）　堂本 浩規（大阪市立大学）
Takuya FUJITA*[1] Tomohiro KOBAYASHI*[1] Noriko UMEMIYA*[1] Hiroki Domoto*[1]
*[1] Osaka City University

General prediction method of wind-forced ventilation rate, orifice equation, cannnot take into account phenomena, mixing and pulsation, caused by airflow turbulence, for example a room with multiple openings of the same wind pressure coefficient (C_P). This work aims to understand ventilation effect due to turbulence for a room with multiple openings of minute ΔC_P. This paper presents measurement of wind speed around model by wind tunnel test, and accuracy verification of CFD reproducing wind tunnel test. The target is wind speed around model, C_P value, and Purging Flow Rate (PFR).

1. はじめに

2 開口を有する室の風力換気量は一般的にオリフィス式に基づいて算定され、開口間に風圧係数差がない条件では換気量が 0 と算定されるが、実際には乱れにより換気が行われる。乱れの換気効果に関する研究はこれまでにも見られ、そのメカニズムは脈動現象と開口部での混合現象と言われている [1-3]。単一開口を対象とした乱れの換気についてはこれまでにも研究例が比較的多く見られるが [4-5]、複数開口で風圧係数差が微小な場合での換気効果は未だ不明な点も多い。筆者らは既報 [6] で LES による CFD 解析を行い、開口を変更して 0.1 程度未満の微小な風圧係数差では換気量は風圧係数差には依存しないことを示し、当該条件での簡易予測式の提案を行なった。しかしこれらの解析は風洞実験との比較による精度検証に欠けていた。そこで本報では、既報 [7] で実施した風洞実験による 1). 換気量測定、2). 風圧係数測定に加え、新たに 3). 壁面近傍風速の測定を行い、実験を再現した CFD 解析を実施することで、これらの 3 項目について解析精度の検証を行った結果について報告する。

2. 風洞実験概要

2.1 モデル周辺気流の測定

既報 [7] 同様、実験は測定胴高さ 1,200 mm、幅 1,500 mm のエッフェル型風洞で行った。風洞床上 800 mm にピトー管を設置し、この位置で風速 10 m/s に設定した。**Fig.1** に I 型熱線流速計（日本カノマックス、0251R-T5 型 φ 5μm タングステン）により測定（1.0 kHz, 60 s）したアプローチフローのプロファイルを示す。風洞床面に 1 辺 200mm のシールドモデルを設置し、その壁面近傍風速を測定した。測定には前述の I 型熱線流速計を用いて室モデル側方の測定を行う。測定点は主流方向に 20 mm 間隔、側面からの法線方向に 10 mm 間隔で計 220 点設定し、床上高さ 100 mm で統一した（**Fig.2**）。またプローブはワイヤーが側壁面に直交する向きにアームで固定し、アームはトラバーサーに取り付けて各点 1 kHz, 60 s で測定した。

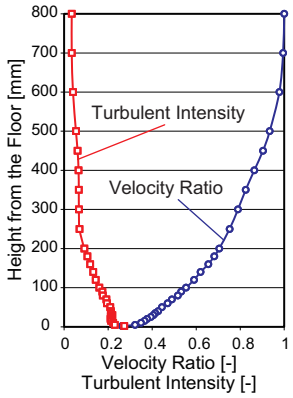


Fig.1 Approaching Flow

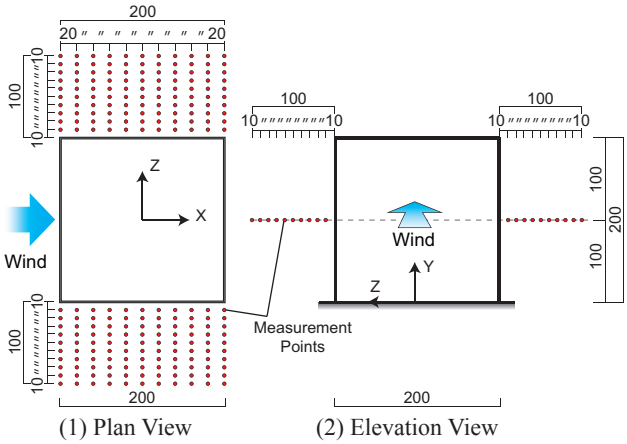


Fig.2 Measurement Points of vicinity wind of side wall

3. CFD 解析概要

3.1 解析領域及び解析条件

風洞を再現して解析領域は高さ 1,200 mm、幅 1,500 mm とし、外寸一辺 200 mm の立方体室モデルを配置した。既報 [7] の換気量測定を再現した解析を行うため、開口を有する室モデルを対象として壁圧 2.0 mm、側面での対面開口条件である 3 条件（**Fig.3**）

を対象とした。なお、条件名は既報[7]と同様とした。**Fig.4** に解析領域およびメッシュレイアウトの一例を示す。壁面近傍風速と風圧係数の検証には、実験で用いたシールドモデルを再現した解析を行う。本報では風洞実験を再現したため、開口を有する室モデル、シールドモデルを対象とした計算共に既報[6, 8]と比較して解析領域のサイズは異なるが、室モデル周辺のメッシュレイアウトは同様とした。なお、既報と比較すると流入境界の風速プロファイルが異なっており、本報では実験を再現した境界条件とした。

既報[6, 8]同様 LES による解析を行う。標準 k-ε モデル (SKE) の結果を初期条件とし、計算時間間隔を 1/2000 [s]、計算開始後の 2,000 time step(=1.0 s) を SKE から LES への移行期間とみなして結果を破棄し、その後の 10.0 s を本計算とした。流入境界は **Fig.1** のアプローチフローを用いて Smirnov ら[9]の手法により変動風を与えた。**Table 1** に CFD の解析概要をまとめて示す。

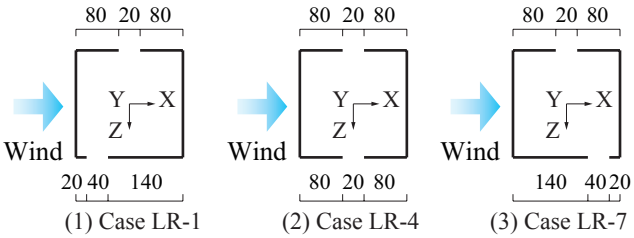


Fig.3 Studied Cases for Flow Rate Verification

4. 結果と考察

4.1 壁面近傍風速の精度検証

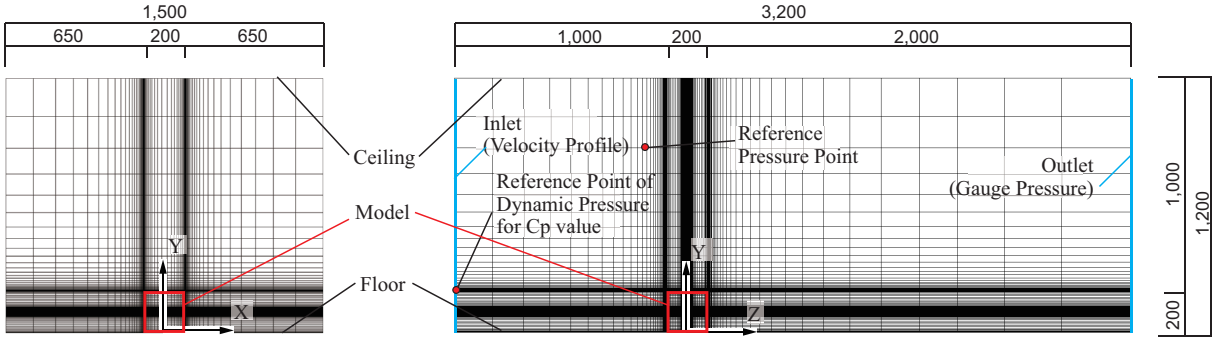
実験では I 型熱線プローブをワイヤーが Z 軸と平行になるよう設置して測定を行なった。本報では LES の結果から実験値を再現したスカラー風速の時間平均値（$V_{LES\text{-}hotwire}$）を算出して実験値と比較する。(1) 式に示す通り LES の瞬時 GS 風速のうちワイヤーに直交する 2 成分（v_x, v_y）の合成ベクトルを算出してその時間平均値を $V_{LES\text{-}hotwire}$ とした。

$$V_{LES\text{-}hotwire} = \overline{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}^{\,t} \qquad \text{...(1)}$$

Fig.5 に左側面近傍の平均風速の分布を実験値・解析値ともに示す。室モデル中央部付近で速度勾配を若干過大評価する傾向があるものの、概して平均風速分布は実験値と良く一致する傾向の結果が得られた

Table 1 Summary of CFD Analysis

Turbulence Model		Large Eddy Simulation
CFD Code		Fluent 17.0
Algorithm		Implicit method(SIMPLE)
Discretization Scheme for Advection Term		Central Differencing
Time Step		0.0005 [s]
Main Calculation Term		20,000 time step (=10 [s])
Boundary Condition	Inlet	1/5 Power law (Smirnov's method)
	Outlet	Gauge Pressure : 0 [Pa]
	Walls	Two Layer Model of Linear-Log Law
Total Number of Cells	Sealed Model	349,411 (Previous Grid)
	Open Model	1,753,350 (Case LR-1) 1,192,100 (Case LR-4) 1,753,350 (Case LR-7)



(1) YZ Cross-Section (2) XY Cross-Section

Fig.4 Computational Domain and Example of Mesh Layout (Case LR-4)

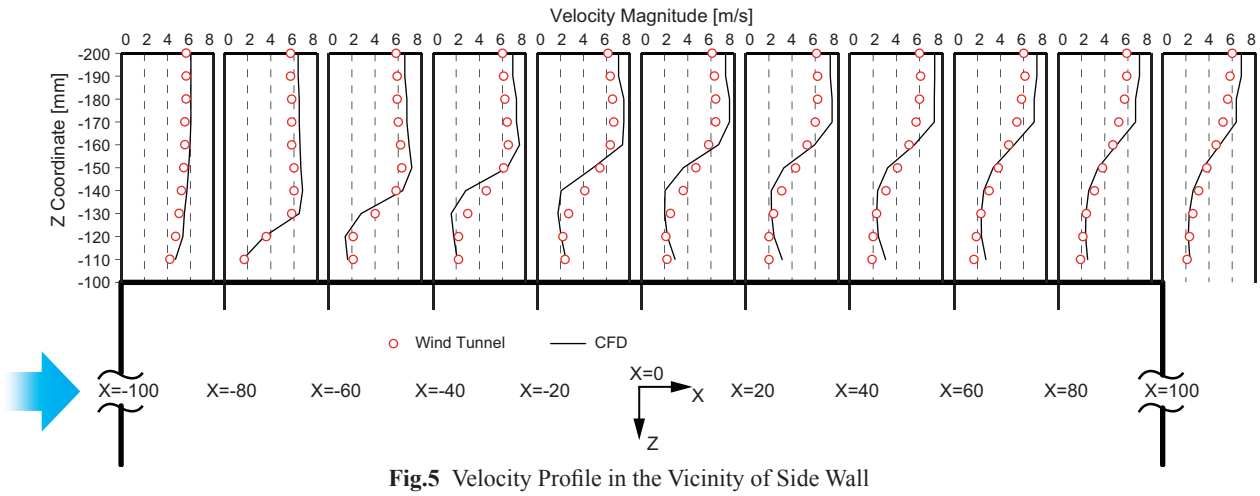


Fig.5 Velocity Profile in the Vicinity of Side Wall

と言える。**Fig.6** に (X, Y, Z)=(0, 100, -110) における風速のパワースペクトルを示す。ここではスペクトルを Parzen ウィンドウ [10] により平滑化した結果を示している。実験値・解析値ともに 1.0 ～ 10 Hz でパワーが最大となった。また、実験値は概ねコルモゴロフの -5/3 乗の傾きに沿ってパワーが落ちている様子が分かる。一方、解析値はパワーの落ち始めは -5/3 乗の傾きに沿って落ちるが、高周波で大きく落ちる結果となった。このため当該解析及び既報 [6,8] の解析では、室モデル平均風速分布の解析精度に大きな問題はないものの周波数特性の精度には向上の余地がある可能性と課題が示されたと言える。

4.2 風圧係数の精度検証

Fig.7 に風圧係数の時間平均値の分布を実験値・解析値をともに示す。実験値は既報 [7] の風洞実験で得られた値である。風上側の風圧係数の解析結果は実験と非常によく一致しており、後面は解析結果が負圧をやや過大評価しているが傾向は概ね一致している。しかし、左側面については実験と解析で誤差が比較的大きく、分布の傾向も異なる結果となった。これは前項で示されたメッシュの解像度不足に起因する可能性があると言え、精度向上のための検討が必要と言える。

4.3 換気量の精度検証

換気量は風洞実験と同様、濃度に基づき次式で定義される Purging Flow Rate（PFR）で評価する。

$$PFR = \frac{q_p}{C_r}[\mathrm{m}^3/\mathrm{s}] \qquad ...(2)$$

q_p は単位時間あたりに対象領域内で発生する汚染物量 [個 /s]、C_r は対象領域内の平均濃度 [m^{-3}] である。本報では 1/2000 s ごとに Particle を発生させて、対象領域内（-95<x<95, 5<y<195, -95<z<95）の室内粒子個数濃度から PFR を算出する。粒子発生点は既報 [7] のトレーサーガス実験と同位置の 4 点から粒子を発生させて再現した（**Fig.8**）。PFR は実験では定常濃度から算出したが、LES では総計算時間が 10.0 s と実験と比較して短いために定常濃度に至らない可能性を考慮し、以下の非定常の汚染質濃度予測式を用いて CFD 解析の汚染質濃度と予測濃度の差の二乗和が最小となるような換気回数 n を同定することで PFR(=nV) を算出した。

$$C_r(t) = \frac{q_p}{nV}\left(1 - e^{-nt}\right) \qquad ...(3)$$

Fig.9 に各条件における粒子個数濃度の時間推移を示す。ここで、実線は (3) 式に基づいて同定された換気回数 n に基づく回帰曲線を示す。また、**Fig.10** に既報 [7] の実験及び本報の解析で得られた換気回数 n を示す。この結果から、換気量については CFD 解析は実験と比較的よく一致したと言える。既報 [6] で微小な風圧係数差の範囲では換気量は風圧係数差には依存せずに乱れの性状が支配的と示唆されているが、本報の LES では室モデル周辺の平均的な気流場の解析精度が比較的高いことから換気量の解析精度も比較的高くなったと考えられる。

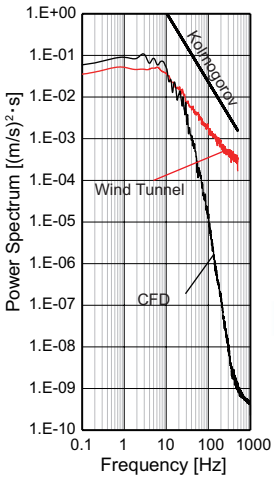


Fig.6 Power Spectrum

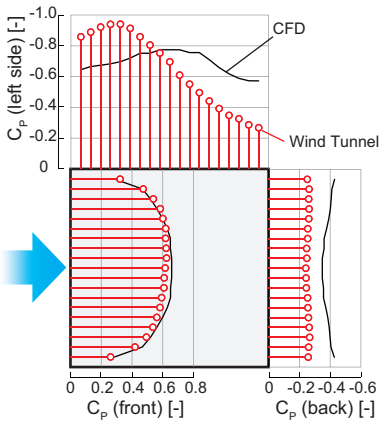
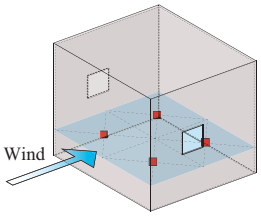


Fig.7 Cp Distribution (Plan View)



	Coordinate		
	X	Y	Z
Point 1	-50	50	-50
Point 2	-50	50	50
Point 3	50	50	-50
Point 4	50	50	50

Particle Generation Point [mm]

Fig.8 Schematic and Coordinate of Particle Generation Points

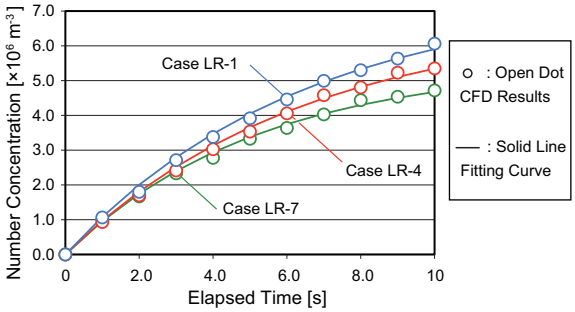


Fig.9 Time Variation of the Number Concentration

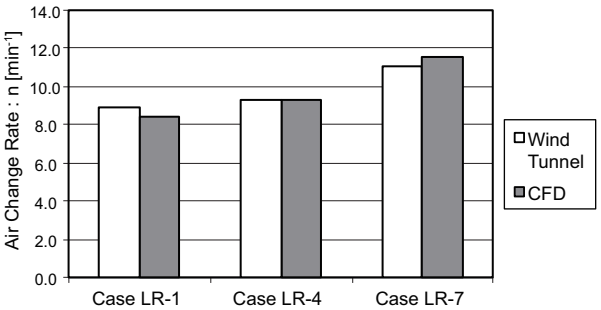
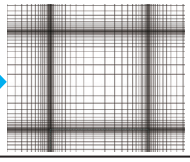
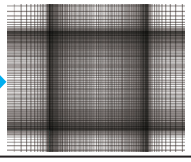


Fig.10 Air Change Rate based on PFR

5. 解析精度向上のための検討

本報の検討で解像度不足の可能性が示されたため、格子数を増加させた解析を実施して精度向上の可能性を検討する。**Table 2** に室モデル周辺の格子配置を示す。**Fig.11** に左側面周辺の平均風速の分布、**Fig.12** に (X, Y, Z)=(0, 100, -110) におけるパワースペクトルを示す。モデル周辺風速の分布はさらに実験結果に近づき、パワースペクトルはより高周波まで実験値に近づく結果となった。**Fig.13** に風圧係数の分布を示す。前面、後面は非常によく一致し、左側面も実験値と同様の傾向を示し、精度が向上したと言える。若干の差異が出た原因として、メッシュ間隔を細かくしたことによりクーラン数が 1 以下を満たさない領域が出現し、精度が不十分となった可能性が考えられるため、計算時間間隔の検討も今後必要である。

Table 2 Details of Mesh Layout around Room Model

	Previous Grid	Refined Grid
Total Number of Cells	349,411	1,966,720
Mesh Layout around Model (Plan View)		

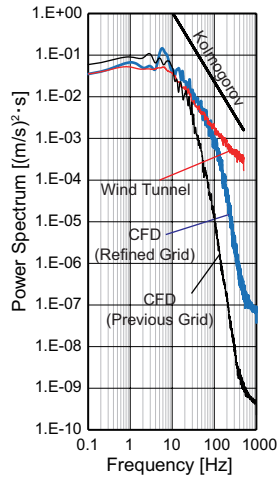


Fig.12 Power Spectrum

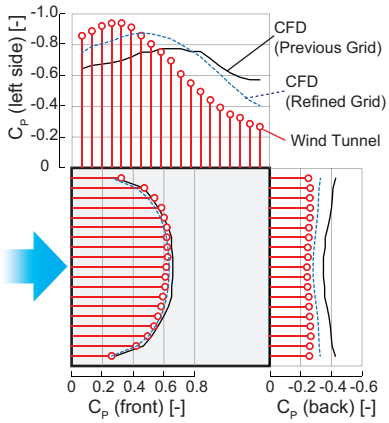


Fig.13 Cp Distribution (Plan View)

6. まとめ

本報では風洞実験によりモデル周辺風速測定を行い、換気量・風圧測定とともに実験を再現した CFD 解析により精度検証を行った。その結果、従来のメッシュレイアウトでは換気量と室モデル周辺風速は一定の精度を有するものの、風圧の解析精度は不十分で、格子解像度を高めることで実験結果に近づき、今後のさらなる精度向上の可能性が示された。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費（挑戦的萌芽研究，課題番号 JP16K14347, 研究代表者；小林知広）の助成を受けた。

参考文献

1) F. Haghighat, J. Rao, and P. Fazio : The Influence of Turbulent Wind on Air Change Rates - A Modeling Approach, *Building and Environment*, Vol.26, No2, pp.95-109, 1991
2) F. Haghighat, H. Brohus, and J. Rao : Modelling air infiltration due to wind fluctuations - a review, *Building and Environment*, Vol.35, pp.377-385, 2000
3) 楢崎正也，山中俊夫，樋口祥明：風の乱れを考慮した換気設計法に関する研究 第 1 報 風の乱れによる換気効果とそのメカニズム，空気調和・衛生工学会論文集，pp25-34, 1989.2
4) T. Yamanaka, H. Kotani, K. Iwamoto, and M. Kato : Natural, Wind-Forced Ventilation caused by Turbulence in a Room with a Single Opening, International Journal of Ventilation, Vol. 5, No.1, pp.179-187, 2006.6
5) 河野良坪，加藤信介，大岡龍三，高橋岳生：横風時における片側開口居室の換気量予測 片壁面上のみに開口を有する居室の換気性状に関する研究（その 3），日本建築学会環境系論文集 第 73 巻 第 626 号，pp437-443, 2008.4
6) 小林知広，梅宮典子，藤田拓也：複数開口を有する室を対象とした風の乱れによる換気効果に関する研究（その 6）微小な風圧係数差での換気量の簡易予測手法の検討，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，第 4 巻，pp.41-44, 2017.9
7) 藤田拓也，小林知広，LIM Eunsu, 梅宮典子：複数開口を有する室を対象とした風の乱れによる換気効果に関する研究（その 7）風洞実験による換気量評価，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，第 4 巻，pp.45-48, 2017.9
8) 大野真斗，小林知広，近本智行，梅宮典子：複数開口を有する室を対象とした風の乱れによる換気効果に関する研究（その 1）LES を用いた単一開口と複数開口の比較，空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集，pp.313-316, 2014.3
9) A. Smirnov, S. Shi, I. Celik : Random Flow Generation Technique for Large Eddy Simulations and Particle-Dynamics Modeling, *Journal of Fluids Engineering*, Vol.123, Issue2, pp359-371, 2001.6
10) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994
11) M. Sandberg and D. Etheridge : BUILDING VENTILATION - Theoryand Measurement, John Wiley & Sons Ltd, 1996

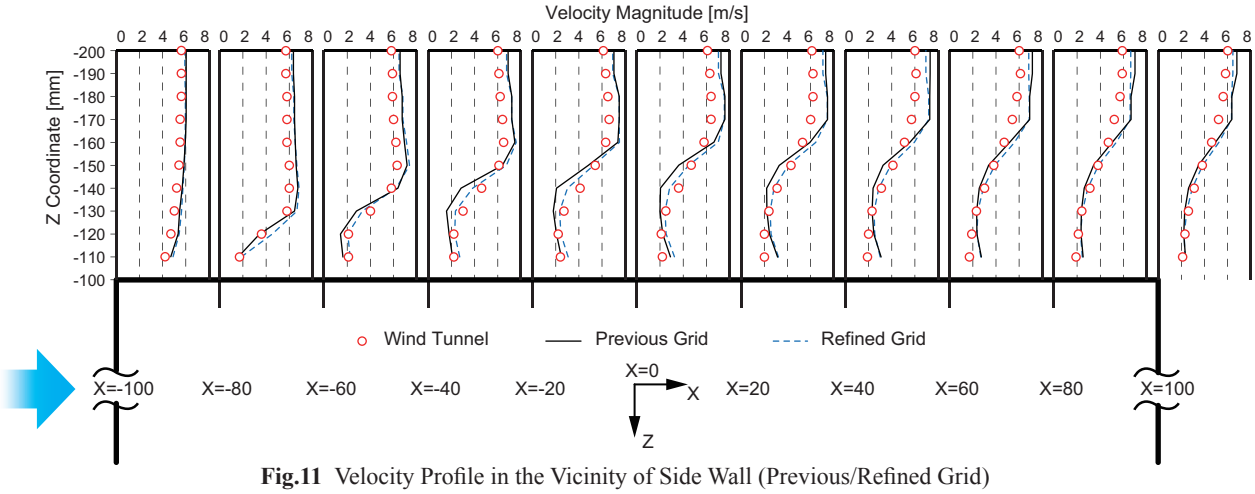


Fig.11 Velocity Profile in the Vicinity of Side Wall (Previous/Refined Grid)