

# 風環境シミュレータ「Zephyrus(ゼフィルス)」の開発

片岡 浩人 木梨 智子  
川口 彰久

## Development of “Zephyrus” : A Numerical Simulator for Wind Environment

Hiroto Kataoka Satoko Kinashi  
Akihisa Kawaguchi

### Abstract

The computational fluid dynamics (CFD) has been expected by wind engineers to become the most practical tool for predicting the wind environment around buildings. To fulfill their expectations, those bothersome tasks, such as reading and modeling the shape of project buildings and their neighbours from maps or design drawings and generating a computational grid system around them, should be simplified with keeping the solution accuracy. A numerical simulator for wind environment, “Zephyrus”, has been developed to overcome these problems. It simplifies the modeling process by using commercial digital maps and the use of equi-distance Cartesian grid system makes the grid generation process straightforward. In this paper, the basic equations and numerical schemes are explained. The solution accuracy is examined by comparing numerical results with wind-tunnel measurements.

### 概要

風環境予測における数値流体計算(CFD)利用に対する期待は高い。しかし実用化のためには、予測精度を維持しつつ、計画地周辺建物のモデル化と計算格子の生成をいかに単純化するかが課題である。そこで、電子地図情報を元に計画地周辺の建物形状をモデル化し、直交等間隔格子を用いることで格子生成を単純化した、風環境シミュレータ「Zephyrus(ゼフィルス)」の開発を行った。本報告では、はじめに「Zephyrus」で用いられている基礎式ならびに数値解析手法を説明する。そして風洞実験結果と比較することによって、「Zephyrus」の予測精度の検証を行う。

## 1. はじめに

近年、都市再開発に伴い、旧来の市街地に高層建物が計画される例が増えている。計画建物による周辺への影響のうち、ビル風による風環境の変化に対しては、従来から風洞実験、机上検討、流体計算の三通りの方法により予測が行われている。風洞実験の場合、予測精度は高いものの、模型製作や実験にコストや手間がかかる。机上検討は、既往の風洞実験結果から該当する案件に最も建物形状が似た例を探し出し予測を行う方法で、コストはかからないものの予測の精度は実験に比べると劣る。流体計算の場合には、パーソナルコンピュータ(PC)の高性能化によって風洞時実験と比肩しうる精度の計算が可能となってきた。

しかし流体計算による予測には、以下の問題点がある。まず、市販の流体解析コードを用いる場合、計算条件の設定に数値流体計算に関する専門的な知識を必要とする。次に、検討対象となる建物とその周辺の建物に対して三次元のモデル化と計算格子の生成が必要である。一連の

作業は風洞実験の模型製作に相当し、数値計算による予測は、必ずしも短期間で実施で出来るわけではない。

そこで計画建物や周辺建物のモデリングから数値流体計算、風環境の評価まで、PC上で一貫して作業できる風環境シミュレータ「Zephyrus(ゼフィルス)」の開発を行った。同ソフトでは、一般の設計者でも予測が可能なように計算条件の設定を自動化し、市販の電子地図を用いて計画建物や周辺建物のモデル化を簡易化し、さらに直交等間隔格子の採用で格子生成作業を単純化した。

本報ではまず「Zephyrus」で用いられている数値解析手法を説明する。次に実在の街区に対して行った予測結果を風洞実験結果と比較し、予測精度の検証を行う。最後に樹木のモデル化に関する検証を行う。

## 2. 基礎式と計算手法

### 2.1 基礎式

対象となる流れ場を、非圧縮性の定常流れ場と仮定し、以下に示すレイノルズ平均された擬似圧縮性法による基

礎式<sup>1)</sup>を採用する。

$$\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial t} + \beta \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \langle p \rangle + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (2v_t S_{ij}) - F_i$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon + F_k$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \varepsilon) + F_\varepsilon$$

$$x_i = x, y, z \quad u_i = u, v, w$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \quad P_k = v_t \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j}$$

$$F_i = C_f a \langle u_i \rangle \sqrt{\langle u_j \rangle^2} \quad F_k = \langle u_i \rangle F_i \quad F_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{k} C_{p\varepsilon} F_k$$

$$v_t = \sigma_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \sigma_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92$$

ここで、 $\langle \rangle$  はレイノルズ平均された値、 $\beta$  は擬似圧縮性係数。(1)式の定常解が得られると、連続の式中の圧力の時間微分項が消滅し、非圧縮性が保たれる。 $F_i$ 、 $F_k$ 、 $F_\varepsilon$  はそれぞれ樹木の影響をモデル化した項<sup>2)</sup>で、各項中の $C_f$ は葉の抵抗係数、 $a$ は葉面積密度(樹冠単位体積当たりの葉の片側面積の和)、 $C_{p\varepsilon}$ は樹木による乱流エネルギー消散に関するモデル定数。

## 2.2 離散化手法

(1)式を有限体積法を用いて離散化する。各物理保存量はコントロールボリューム(CV)の中心で定義した。CV界面における流束は三次精度の風上差分により求める。

ところで建物形状を正確に再現するには、建物表面に沿って構造もしくは非構造格子を生成する必要がある。しかし、風環境予測が対象とする複数の建物に対して、短期間でこのような格子分割を行うことは、現状では不可能である。そこで計算格子は直交格子とし、水平方向に等間隔、垂直方向に不等間隔格子を用いることとする。この場合、格子形状と建物形状が一致しないため、体積積分の際にFAVOR法<sup>3)</sup>に従う。すなわちCV中に流体が占める割合(体積占有率 $P_v$ )、6個の界面の個々の面積に対する気流の出入りがある面積の割合(開口率 $P_{Ax \pm 1/2}$ 、 $P_{Ay \pm 1/2}$ 、 $P_{Az \pm 1/2}$ )を考慮する。

## 2.3 重合格子

直交等間隔格子の場合、例えば計画建物の近傍をより高精度に予測しようとする、計算領域全体の格子解像度が上がってしまう。そこで、複数の直交格子を重ね合わせ、計算領域全体と計画建物近傍で異なる格子解像度のもとで計算が出来るよう重合格子法<sup>4)</sup>を採用した。

格子間ではFig. 1に示すような双方向のネスティングを行う。すなわち詳細領域(内側の格子)の外周部では、最寄りの全体領域(外側の格子)の格子点の値から線型補間により与える。一方外側の格子では、重なり合った部分の格子点の値を内側の格子点の値から線型補間より求める。以上の操作を各繰り返し計算毎に行う。

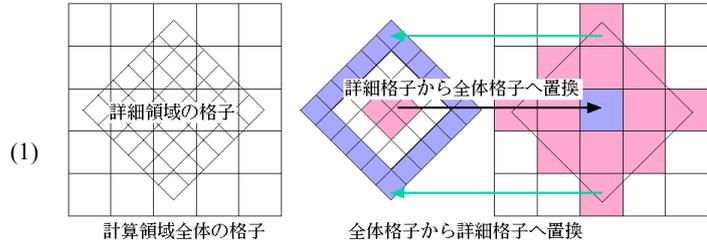


Fig. 1 重合格子  
Overlapping Grid

## 2.4 境界条件

風上境界では、建築物荷重指針<sup>5)</sup>に従って式(2)に示す流入気流分布を与える。ここで $U(z)$ は高さ $z$ [m]における絶対値風速[m/s]、 $U(z_G)$ は境界層厚さ $z_G$ における風速。べき指数 $\alpha$ と地表面粗度区分の関係をTable 1に示す。

$$U(z) = U(z_G) \times \left\{ \min(z, z_G) / z_G \right\}^\alpha$$

$$k = \left[ 0.1 \times U(z_G) \times \left\{ \min(z, z_G) / z_G \right\}^{-0.05} \right] \quad \varepsilon = \sigma_\mu^{1/2} k \frac{\partial U}{\partial z} \quad (2)$$

Table 1 流入境界条件のパラメータ

Parameters for Inflow Profiles					
粗度区分	I	II	III	IV	V
$z_G$ [m]	250	350	450	550	650
$\alpha$	0.10	0.15	0.20	0.27	0.35

流出境界では、特性の方法<sup>6)</sup>により境界の値を求める。建物表面ならびに地表面では、滑面での対数則を用いた。計算領域の高さ方向の大きさは、全体領域ならびに詳細領域ともに同じ大きさとし、上空境界でfree-slipとした。

## 3. 計算精度の検証

ここではZephyrusによる予測精度の検証として行った、風洞実験結果との比較<sup>2)</sup>例と、樹木のモデル化とそのモデルパラメータの検証結果について述べる。

### 3.1 計算例 1

3.1.1 三次元モデルの生成 Fig. 2に計算領域を示す。河川に沿った工場地帯で、その隣には低層建物主体の街区がある。計算領域全体(1st Grid)の大きさは880m×880m、詳細領域(2nd Grid)の大きさは400m×275m。計画建物は詳細領域の工場敷地内の中央に位置し、高さ87m。

周辺建物の高さは、地図データ中にある建物の階数情報をもとに、階高3.5mを一律にかけることで求めた。階数の情報がない建物については、全て二階建てとみなして、高さを設定した。

一方計画建物の入力は、以下の手順で行った。まず配置計画図をスキャナーで読み取り、ディスプレイ上で大きさや向きが合うように地図データと重ね合わせる。次に、建物の外形をマウスクリックにより抽出。最後に建物高さを入力する。

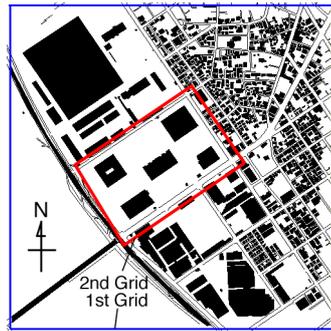


Fig. 2 計算領域  
Computational Domain

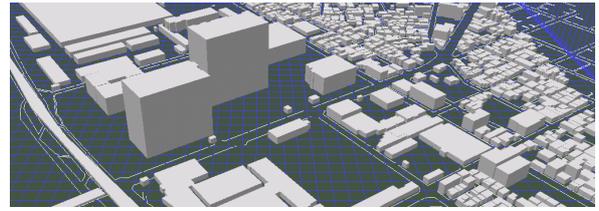


Fig. 3 計算モデル  
Computational Model



Photo 1 風洞実験模型(scale:1/400)  
Model for Wind-tunnel experiment

Fig. 3に以上の操作によって作られた街区の3次元イメージを、Photo 1に同じ地域を対象とした風洞実験の模型をそれぞれ示す。

### 3.1.2 格子分割

ここでは詳細領域の水平格子解像度5mに固定し、全体領域を40, 20, 10mの三通りの格子解像度で離散化した。高さ方向の領域は150mとし、不等間隔に30個の格子に分割(最小格子幅1m)分割した。Fig. 4に各格子解像度における体積占有率の分布を示す。格子解像度が上がるに従って、工場敷地内や周辺街区の建物形状が再現されていくのがわかる。

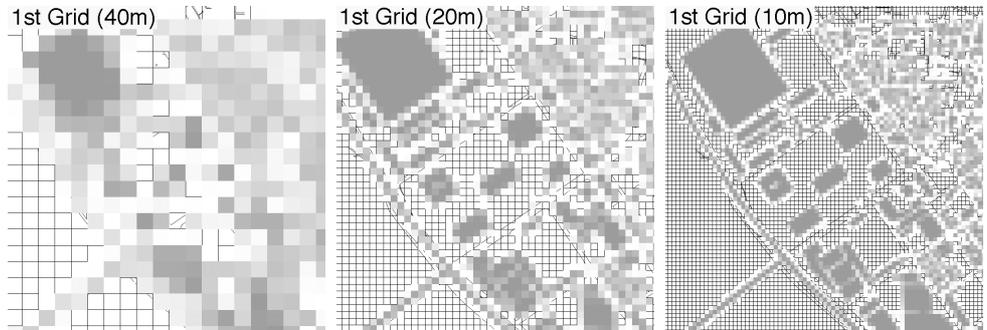


Fig. 4 体積占有率の分布  
Distribution of Volume Fraction

### 3.1.3 計算結果

計算は粗度区分III, 16風向で行った。風向きENEの時の全体領域内の風速分布を、解像度別にFig. 5に示す。工場敷地外の街区で解像度の増加に伴って低層建物による風速の低下が再現されている。

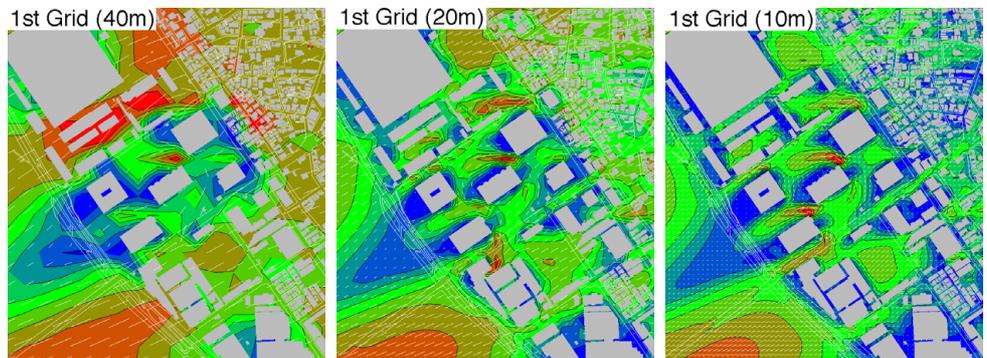


Fig. 5 地上3.5mにおける風速分布 風向: ENE  
Wind Velocity Distribution

次に同領域を対象とした風洞実験結果(模型縮尺1/400)との比較を行った。詳細領域内に設けた75点の評価点×16風向の風速比(最寄りの気象観測所の風速に対する風速の比)の相関をFig. 6に示す。

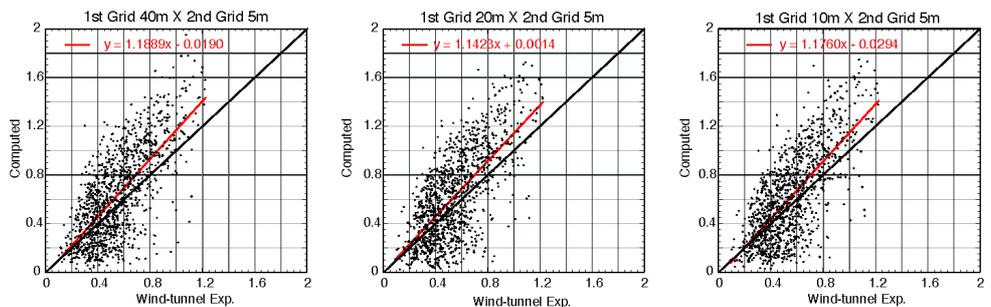


Fig. 6 風洞実験結果と数値計算結果の風速の比較 (75点×16風向)  
Correlation between Wind-tunnel Experiments and Computed Results

図より、全体領域の格子解像度にかかわらず、計算結果が実験値より15~20%程度大きく評価されること、また結果のバラつきにも大きな変化が見られないといった傾向がある。格子解像度による差が見られないのは、評価点の風速が工場敷地内の建物に支配され、周辺街区から流入風の性状が多少変わっても、格子間隔5mで計算される敷地内の風速分布には大きな影響を与えないことが原因と考える。

一方風速比0.5以下の低風速では、計算値が実験値を下回るポイントが多い。これはサーミスタ風速計がスカラー風速の平均値を測定するのに対して、計算では平均速度ベクトル場から風速を求めている事に起因する。

### 3.2 計算例 2

次に、市街地再開発の計算例を示す。Fig. 7に計算対象となるモデルを、Fig. 8に格子分割図を示す。計画建物はFig. 7中央の高さ約130mと64mの高層棟で、周辺を密集した中層建築物で囲まれている。建物モデルの生成方法は3.1の例に同じ。

領域の大きさを 全体(1st Grid) 800m × 800m, 詳細(2nd Grid)は215m × 240mに設定。今回は全体領域の水平格子解像度20mに固定して、詳細領域のみ5, 2.5mの二通りの解像度で離散化した。高さ方向の領域は200mとし、不等間隔に35個の格子に分割(最小格子幅1m)分割。

粗度区分をIVとし、16風向で計算を行った。風向きSWの時の詳細領域内の地上3.5mの風速分布をFig. 9に示す。格子解像度の増加に伴って、計画建物間や路地上の風速の高い領域が広がり、かつ風速が増加している。

さらに計算例1と同様に、風洞実験結果(模型縮尺1/500)と、地上3.5mの風速比の比較を行った。評価点は詳細領域内に位置するの70点。相関をFig. 10に示す。

Fig. 9に示したように、路地や建物の間では解像度が低い場合、これらの隙間を通過する気流を再現することができない。そのため今回は、詳細領域の格子解像度を上げることで、計算結果と実験結果の相関が改善されている。

### 3.3 樹木モデルの検証

ビルの建設によって風環境が悪化することが予測された場合には、防風対策を施して歩行者等への風の影響を

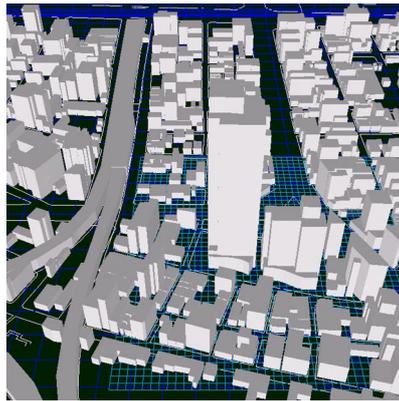


Fig. 7 市街地の計算モデル  
Model for Urban Area

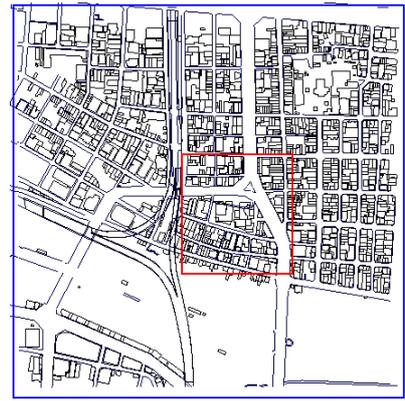


Fig. 8 市街地の計算領域  
Domain for Urban Area

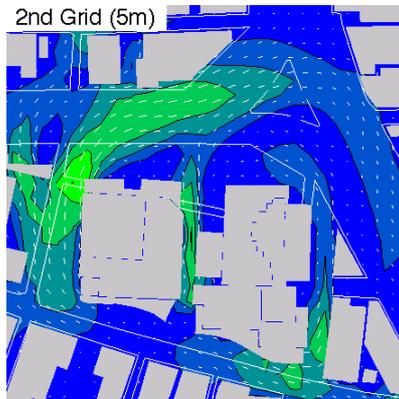


Fig. 9 地上3.5mにおける風速分布 風向：SW  
Wind Velocity Distribution

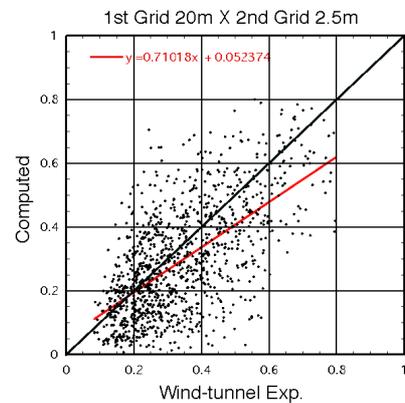
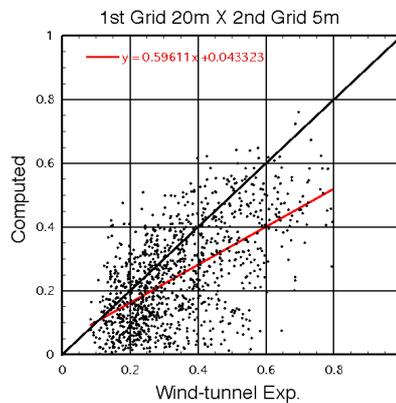


Fig. 10 風洞実験結果と数値計算結果の風速の比較 (70点×16風向)  
Correlation between Wind-tunnel Experiments and Computed Results

緩和する。主な防風対策は、計画建物周辺への植栽である。そこで「Zephyrus(ゼフィルス)」では、マウス操作により、任意の位置に樹木を設定が可能とした。また、樹木の高さ、樹冠直径を変えることで、樹木の形状を変えることができる。作成された樹木は、(1)式に示した樹木モデルによって数値的に扱われる。ここでは、樹木モデルのパラメータの影響について検証を行う。

加藤・持田<sup>2)</sup>は、大橋<sup>7)</sup>が行った樹木模型を用いた風洞実験結果をターゲットとして、モデル定数 $C_{pe}$ の最適

化を行っている。それによると、葉面積密度は樹木モデルの値をそのまま用いて  $a=18.0$ 、葉の抵抗係数を  $C_f=0.8$  に固定して、 $C_{pe}$  のみ値を変えて実験結果と比較したところ、最適値が1.5~2.0の範囲であることを示した。

一方、神山ら<sup>8)</sup>は複数の種類の樹木の苗木の葉面積密度を調べるとともに、風洞内に設置して、抵抗係数と気流分布の測定を行っている。その結果、Table 1に示すような値を得た。また大橋ら<sup>9)</sup>は、同実験のうちサザンカの場合を対象とした数値計算を行い、 $a$  に関しては実測をもとに樹冠内部の分布を考慮し、 $C_f$  を実験結果から0.55とおくことで、風速分の良い一致を得ている。

以上、加藤・持田ら<sup>2)</sup>と大橋ら<sup>9)</sup>の計算により、(1)式よる樹木のモデル化の妥当性が示されている。しかし実際の予測では、抵抗係数の値や葉面積密度の分布を事前に知ることはできない。そこでモデル定数  $C_{pe}$  を2.0に固定し、葉面積密度  $a$  と、抵抗係数  $C_f$  の違いによる周辺気流への影響を確認した。

計算領域をFig. 11のように設定する。領域内には高さ10m、樹冠の直径7.0mの樹木一本を置く。計算格子は水平方向の分解能が2m、高さ方向には0~4mが1m刻み、4~10mが2m刻み、10m~100mが5m刻みとした。流入気流は粗度区分1の気流分布(上空の風速=1.7)。樹木のパラメータは  $C_{pe}$  のみ2.0に固定し、 $a$  を1.5, 5.0, 18.0,  $C_f$  を0.2, 0.5, 0.8の条件で計算を行った。地上1.5mの水平断面内の風速分布をFig. 12に、樹冠の中央を通る風向き中心断面上的の風速分布Fig. 13にそれぞれ示す。

Fig. 12の地上1.5mの水平断面内では、速度欠損が抵抗

Table 2 樹木の葉面積密度と抵抗係数<sup>8)</sup>

樹種	葉面積密度 [1/m]	抵抗係数
タブ	2.87	0.3-0.4
キンモクセイ	3.12	0.5-0.6
サザンカ	5.11	0.35
ドウダンツツジ	8.84	0.2
カイヅカイブキ	13.36	0.26

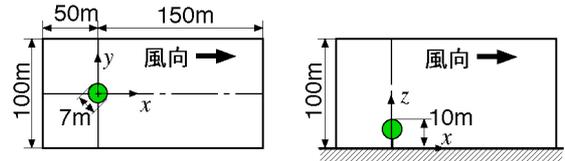


Fig. 11 樹木モデル検証用の計算領域  
Domain for Tree Model Computation

係数や葉面積密度に比例する。しかし中心断面上の風速分布Fig. 13をみると、パラメータの違いによる影響は地表付近に限られ、樹冠中央から上空ではほぼ同一の分布となっている。また、水平断面内の分布より、樹木による防風効果はいずれのケースも風横方向に10m、すなわち樹木高さ程度の範囲となった。

#### 4. まとめ

風環境シミュレータ「Zephyrus(ゼフィルス)」の開発を行った。同ソフトによる予測結果と、風洞実験結果を比

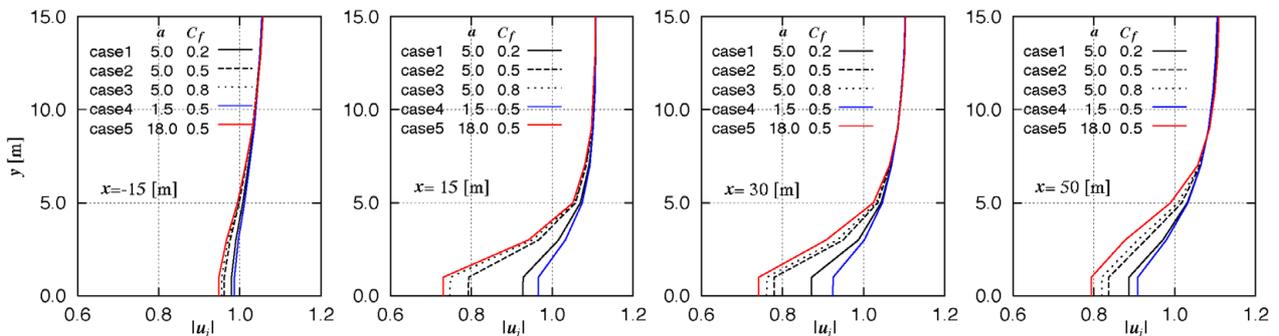


Fig. 12 地上1.5mの水平断面内の風速分布 ( $z=1.5m$ )  
Wind Velocity Distribution along Horizontal Plane

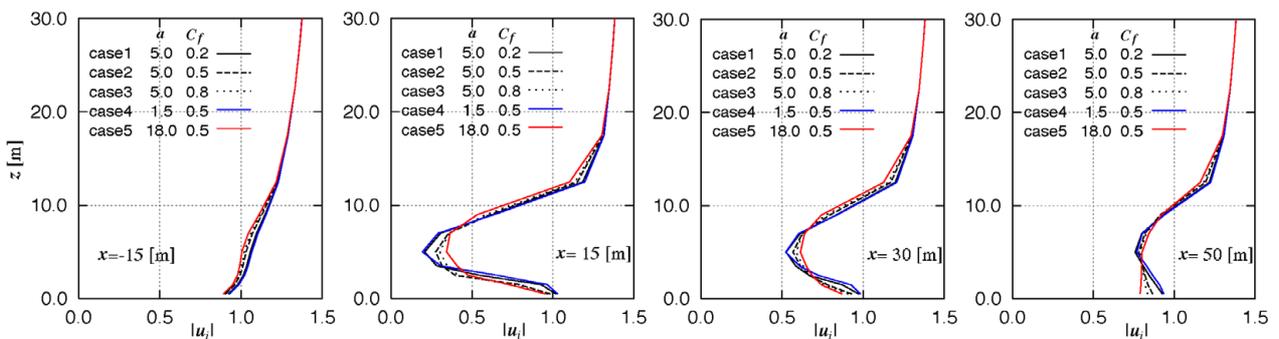


Fig. 13 中心断面上の風速分布 ( $y=0m$ )  
Wind Velocity Distribution along Vertical Plane

較したところ、以下の知見を得た。

- ・低層住宅地に囲まれた工場敷地内の計画では、風環境が敷地内の建物によって支配されるため、周辺街区の格子解像度は予測精度に大した影響を及ぼさない。
- ・中層建物で囲まれた都市再開発計画を対象とした予測では、詳細領域の格子解像度が予測結果を支配する。これは建物の間や路地といった狭い空間を吹き抜ける気流の再現性に格子解像度が影響するからである。
- ・樹木のモデル化を行い、葉面積密度や抵抗係数の値が単体樹木周辺の風速分布に与える影響について検証を行った。その結果、樹冠中央より上空では、風速分布に各パラメータの影響はみられないが、地上付近では、抵抗係数や葉面積密度に比例して、防風効果が現れる。
- ・市販の電子住宅地図データを読み込んで、計画地周辺の建物形状を作成した。この方法により、対象となる地域の地図データさえあれば、瞬時に街区の三次元モデル化が可能である。ただし、建物高さに関する情報が、必ずしも十分ではないので、今後のデータの充実に期待したい。

## 5. 謝辞

「Zephyrus(ゼフィルス)」の開発に際して、(株)CSK 製造・流通・サービスシステム事業本部石川義高氏の多大な協力を得た。末筆ながら、謝意を表する。

## 参考文献

- 1) Chorin, A. J. : A Numerical method for solving incompressible viscous flow problems, J. Comp. Physics, Vol. 2, pp. 12~26, (1967)
- 2) 加藤, 持田, 吉野, 村上 : Canopyモデルを組み込んだk-εモデルによる単独樹木周辺の風速分布の予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp. 929~930, (2001.9)
- 3) Hirt, C. W. : Volume-fraction techniques : powerful tools for wind engineering, J. Wind Engineering, No. 52, pp. 333~344, (1992.8)
- 4) 諏訪, 藤井, 湯浅, 佐野 : 重合格子法を用いた建築物周辺気流の数値解析, 日本建築学会計画系論文集, No. 488, pp. 43~52, (1996.10)
- 5) 日本建築学会 : 建築物荷重指針・同解説, (1993)
- 6) 片岡, 水野 : 擬似圧縮性法による物体周りの剥離流れの数値解析, 日本建築学会計画系論文集, No. 504, pp. 63~70, (1998.2)
- 7) 大橋 : 樹木模型周辺の気流分布に関する風洞実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(環境II), pp. 575~576, (1996.9)
- 8) 神山・成田・大橋 : 樹木の抵抗係数に関する風洞実験 その1 樹種および気流の違いによる比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集(環境II), pp. 521~522,

(1999.9)

- 9) 大橋・神山・成田 : 樹木の抵抗係数に関する風洞実験 その2 抵抗係数の算出と数値シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集(環境II), pp. 523~524, (1999.9)

## Appendix 「Zephyrus(ゼフィルス)」の概要

### 主な機能

- ・電子住宅地図データの読み込みと、建物のモデル化
- ・メッシュ標高データの読み込みと、地形のモデル化
- ・計算領域内の建物の追加と削除
- ・樹木の追加と形状変更
- ・等間隔直交格子とFAVOR法に基づく格子生成
- ・重合格子による格子解像度と計算時間の両立
- ・粗度区分と風向以外の境界条件は自動設定
- ・16風向計算時は最寄りの気象官署のデータ(風向別頻度ならびにワイブルパラメータ, 全国のデータを完備)を用いて、風環境評価を計算
- ・建設前後や植栽前後といった異なる計算結果同士の比較を行い、風速増加率や風環境評価結果の変化を算出
- ・風速ベクトル, 風速ならびに風環境評価結果のコンタ一図
- ・計算結果の水平断面ならびに鉛直断面表示
- ・地形に起伏がある場合には、等標高面上での表示
- ・アイソメトリック表示, パースペクティブ表示
- ・風向別(2風向以上解析時), 計算格子別(重合格子使用時)の表示
- ・ポイント指定による評価地点の設定
- ・評価地点での評価結果の表示
- ・モデル図, ならびに各種結果のEPSファイル出力
- ・モデル生成から計算ならびに結果表示に至る一連の作業をプロジェクトとして管理
- ・プロジェクト単位でディレクトリが生成され、必要なファイルはそこに格納

### 動作環境

#### 必須条件

- ・Intel(もしくはその互換)CPUで、OpenGLグラフィックスライブラリが動作するグラフィックスボードを搭載し、Windows NT4.0 Service Pack 3以降が動作するPC
- ・MapInfo Professional(地図情報ソフト)が利用でき、風環境評価の対象地域の同ソフト対応ゼンリン住宅地図が閲覧できる環境
- ・高速なCPUほど計算時間が短縮

#### 推奨条件

- ・1Gbyte以上のディスク空き容量
- ・128Mbyte以上のメモリ
- ・OpenGL対応のグラフィックスアクセラレータ
- ・Post Script 対応のプリンタもしくは対応のアプリケーション