

## 新しい市街地気流解析モデルの提案とその検証

### A NEW URBAN CANOPY MODEL AND ITS VERIFICATION

榎木 康太<sup>1)</sup>, 山口 敦<sup>2)</sup>, 石原 孟<sup>3)</sup>

Kota ENOKI<sup>1)</sup>, Atsushi YAMAGUCHI<sup>2)</sup>, Takeshi ISHIHARA<sup>3)</sup>

#### ABSTRACT

In this study, a new urban canopy model based on the porous media theory is proposed. Flow around two obstacles with different porosities, i.e., pine trees and a prism are simulated and compared with measurements. The simulated results showed a good agreement with measurements. The proposed model is applied to the estimation of wind speed during a typhoon to consider the effect of surrounding buildings around a meteorological station. Wind speed measured at Miyakojima Meteorological Station located in the urban area is converted to the wind speed at a distant site based on the result of the flow simulations with the proposed urban canopy model. Estimated wind speed showed a good agreement with measurements.

Key Words: Urban Canopy, Porous Media, Numerical Simulation, Typhoon

#### 1. はじめに

構造物を設計する際に、外力となる風荷重の正確な評価が安全性の観点から極めて重要である。現状の構造物の設計風速の設定には近傍の気象観測点の過去の観測データが用いられる。しかしながら観測データは測器の特性や観測所の周辺地形・環境・建物など局所的な要因の影響を強く受けている。とりわけ日本では多くの気象観測所が市街地に位置しており、観測値がこのような局所的な因子の影響を排除できていない<sup>1)</sup>。これらの影響を考慮した観測値の補正手法が安全な構造物の設計には不可欠である。

従来、建物の影響を考慮した風環境の予測手法には、粗度形状に沿った計算格子を用い粗度形状を再現した数値流体解析を用いたいわばミクロ的な手法(水平解像度:数 m～数 10cm)と大域的に建物群落の流れ場を与える影響を運動方程式において外力項としてモデル化した都市キャノピーモデル<sup>2)</sup>を用いたマクロ的な手法(水平解像度:数 10m)が用いられてきた。前者は、より高精度な解析が可能である反面、市街地中の建物の影響を厳密に評価するために膨大な計算格子が必要であり、計算時間が長くなるという欠点を持つ。一方、後者は個々の建物をまとめて群落として考慮するため計算格子数が比較的抑えられるが、あくまでも広域的な解析を対象としており、局所的な近傍建物の影響を考慮する場合には適応できない。広域的な都市群落の影響から局所的な近傍建物の影響まで考慮可能な予測手法が求められている。

そこで、本研究ではいかなる解像度でも適用可能な解析スケールに抛らない新しいキャノピーモデルを提案し、その有効性と予測精度を示す。具体的には、まず多孔質媒体理論に基づいた新しいキャノピーモデル

<sup>1)</sup>, <sup>2)</sup>, <sup>3)</sup> 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 大学院生, 助教, 教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

を提案する．次に提案したキャノピーモデルを植生および角柱周りの流れの2ケースに適用し，その精度を検証する．最後に応用として宮古島地方気象台で得られた台風0314号通過時の風観測データを基に実際の植生と都市の影響を考慮した気流解析を行い，気象台北方に位置する風観測点での風向・風速の予測を行う．

## 2. 市街地気流解析モデルの提案

### 2.1. 解析モデル

本研究では，3次元風況予測プログラム MASCOT(Microclimate Analysis System for Complex Terrain)<sup>3)</sup>を用いて気流解析を行った．本解析プログラムは質量保存則と以下に示される運動量保存則を有限体積法により数値的に解くことによって流れ場の数値解を求める．

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) + F_{u,i} \quad (1)$$

ここで， $\bar{u}_i$  と  $u_i'$  は物理空間での  $i$  方向の速度成分の平均値と変動値を表わし， $\bar{p}$  は圧力， $\rho$  は流体の密度， $\mu$  は粘性係数， $F_{u,i}$  は次節で提案する都市が流れ場に与える流体力である．レイノルズ応力  $\overline{\rho u_i' u_j'}$  は線形渦粘性型モデルにより近似した．本研究では気流中の乱れの評価として，乱流エネルギーの過大生成抑制のため Launder & Kato<sup>4)</sup>によって提案された LK モデルと呼ばれる2方程式乱流モデルを用いた．乱流エネルギー  $k$  及び乱流エネルギーの散逸率  $\varepsilon$  は以下の輸送方程式を解き求める．

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \left[ \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \mu_t \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2} \right] - \rho \varepsilon + F_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} + F_\varepsilon \quad (3)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中の定数は標準  $k-\varepsilon$  モデルの値を用い  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$  とした．また， $F_k$  および  $F_\varepsilon$  は次節で述べる都市による乱流エネルギー  $k$  の生成及びその散逸率  $\varepsilon$  の生成項である．

### 2.2. 新しいキャノピーモデルの提案

代表的な既存の都市キャノピーモデル<sup>2)</sup>では抵抗力が流体に与える抵抗力を抵抗係数  $C_f$  及び単位体積中の流体部分体積当りの多孔質固体の表面積  $a$  [ $\text{m}^{-1}$ ] を用いて次のように表す．

$$F_{u,i} = -\frac{1}{2} \rho C_f a \sqrt{u_j'^2} \bar{u}_i \quad (5)$$

平岡ら<sup>2)</sup>のモデルでは構築の際に粗度要素の体積を考慮して NS 方程式の平均操作を行うため支配方程式に陽に充填率が現れ，数十 m 以下の高解像度解析では高充填率の格子点が存在する場合に破綻してしまうという問題がある．そこで，本研究では都市群内での流れを多孔質媒体中の流れとしてモデル化し，粗度要素体積を考慮せず，抵抗力のみを考慮するキャノピーモデルを採用する．単位体積中の多孔質媒体が流れに及ぼす流体力を表したものととして Burk-Plummer の式<sup>5)</sup>を用いる．

$$F_{u,i} = -\frac{C \rho}{D} \frac{\rho_r}{(1 - \rho_r)^3} \sqrt{u_j'^2} \bar{u}_i \quad (6)$$

ここで， $\rho$  は流体密度， $\rho_r$  は充填率である． $C$  は実験定数で，通常 1.75 となる． $\bar{D}$  は球状多孔質媒体の平均代表長さで，多孔質媒体の総体積  $V_{\text{Porous}}$  と流体部分に接する総表面積  $S_{\text{Porous}}$ ，及び形状に依存する定数  $C_S$  (球状多孔質媒体では 6) を用いて  $\bar{D} = C_S V_{\text{Porous}} / S_{\text{Porous}}$  と定義される．式(6)では抵抗力として球を仮定しているため，充填率が大きくなると隙間が生じ建物の抵抗力を表すには適切でない．ここで，本研究では都

市建物の抵抗体として角柱を仮定した。体積  $V$  の計算格子内に存在する建物の占有面積を  $S_B$ 、建物が流体に接する部分の総面積を  $S_S$ 、平均建物高を  $h$  とすると式(6)中のパラメータは次のように定義することができる。

$$\rho_r = \frac{hS_B}{V}, \quad \bar{D} = \frac{C_S \rho_r V}{S_S} \quad (7)$$

多孔質媒体が角柱の場合、 $C_S$  は形状に応じて様々な値をとるが、近似的に直方体の値である 6 とした。

$a$  の定義が流体部分体積  $(1 - \rho_r)V$  当りの多孔質媒体固体部分の表面積  $S_S$  であることから、式(5)と式(6)の関係式が得られる。

$$C_f = \frac{2C}{C_S} \frac{1}{(1 - \rho_r)^2}, \quad a = \frac{\rho_r}{(1 - \rho_r)} \frac{C_S}{\bar{D}} \quad (8)$$

ここで、 $C$  は丸山<sup>6)</sup>の都市キャノピーの抵抗係数に関する実験結果を考慮し 1.225 とした。一般的に都市の抵抗係数は充填率が 20~30%付近で 3.0 程度<sup>6)</sup>の値をとるが、本研究のモデル(式(8))では充填率が 100%に近づくにつれ、抵抗係数が無限大になってしまう。これは式(6)が密に詰められた 1 次元カラム中の流体力を表しているためであり、実際の都市の流れは充填率が高くなると、ブロックを迂回する流れが生じ、式(6)は流体力を適切に表すことが出来ない。都市内の 3 次元流れのパターンは充填率 20~30%を境に遷移が生じるとされている<sup>7)</sup>ため、本研究では流れのパターンの変化を考慮し、流体力を以下のようにモデル化した。

$$F_{u,i} = -\rho C'_f a' \sqrt{u_j^2} \bar{u}_i, \quad \text{where } C'_f = \min(C_f, 3.0), \quad a' = \frac{\rho_r}{(1 - \rho_r + \varepsilon)} \frac{C_S}{\bar{D}} \quad (9)$$

$\varepsilon$  は  $a'$  の最大値を規定する定数で  $10^{-4}$  とした。 $\varepsilon$  により小さい値を用いても流れ場は変化しないことを確認している。また乱流エネルギーとその散逸率にかかるキャノピー項  $F_k, F_\varepsilon$  としては Green<sup>8)</sup>によって提案された多孔質媒体によるエネルギーカスケードの促進過程を考慮した以下の式を用いた。

$$F_k = \beta_p \rho C'_f a' \sqrt{u_j^2}^3 - \beta_d \rho C'_f a' \sqrt{u_j^2} k, \quad F_\varepsilon = C_{pe1} \beta_p \rho \frac{\varepsilon}{k} C'_f a' \sqrt{u_j^2}^3 - C_{pe2} \beta_d \rho C'_f a' \sqrt{u_j^2} \varepsilon \quad (10)$$

ここで、モデル定数はそれぞれ  $\beta_p = 1.0, C_{pe1} = 1.5$  とした。 $\beta_d$  と  $C_{pe2}$  に関しては通常それぞれ 4.0, 0.6~1.5 程度が用いられるが、これらの定数は充填率  $\rho_r$  の関数であると考えられるため、本研究では計算の安定性などを考慮し、以下のような値を用いた。

$$\beta_d = \begin{cases} 4.0 & (\rho_r \leq 0.4) \\ \left( \sqrt{u_j^2}^2 / k \right) \beta_p & (\rho_r > 0.4), \end{cases} \quad C_{pe2} = \begin{cases} 0.2 & (\rho_r \leq 0.4) \\ C_{pe1} & (\rho_r > 0.4) \end{cases} \quad (11)$$

次に本モデルと植生キャノピーモデルとの関係を考える。植生キャノピーモデルでは植生による流体力を

$$F_{u,i} = -\rho A C_{f,\text{tree}} \sqrt{u_j^2} \bar{u}_i \quad (12)$$

と表す。 $C_{f,\text{tree}}$  は抵抗係数、 $A$  は葉面積密度 [ $\text{m}^{-1}$ ] で樹冠体積に対する全葉面積の比である。植生キャノピーでは植生の体積を考慮しない場合が多く、 $A = S_{\text{porous}} / V = C_S \rho_r / \bar{D}$  と表されるので、式(6)、(12)から次式を得る。

$$C_{f,\text{tree}} = \frac{C}{C_S} \frac{1}{(1 - \rho_r)^3} \quad (13)$$

$C_{f,\text{tree}} < C/C_S = 0.204$  では式(13)をそのまま用い変換した場合、充填率が 0 より小さくなるため、充填率  $\rho_r$  の最小値を 0.01 とし、その時は代表長さ  $\bar{D}$ 、すなわち、葉面積密度  $A$  を修正し等価的な抵抗力を表すこととした。既存の植生キャノピーのパラメータ  $C_{f,\text{tree}}$ 、 $A$  を本研究のモデルに変換すると、式は次のようになる。

$$\rho_r = \max \left( 0.01, 1.0 - \sqrt[3]{\frac{C}{C_S C_{f,\text{tree}}}} \right), \quad \bar{D} = \frac{C_S \rho_r}{A'}, \quad \text{where } A' = \begin{cases} A & (\rho_r > 0.01) \\ C_{f,\text{tree}} A / 0.21 & (\rho_r = 0.01) \end{cases} \quad (14)$$

以上のように本研究のモデルは、粗度要素がその計算格子に占める割合である充填率と格子内の粗度要素の代表長さのみで抵抗力を表現可能であるため、抵抗体や解析スケールによらず適応する。

### 3. キャノピーモデルの検証

本研究で提案したキャノピーモデルによって参考文献<sup>9)</sup>に準じ低充填率の樹木, 高充填率である 2:1:1 角柱周りの流れを解析し, 検証を行った. 両解析で使用した詳細な流入風, 計算格子, 境界条件については参考文献<sup>9)</sup>を参照していただきたい.

#### 3.1. 樹木を通過する流れ

図 1 に示した断面の黒松を対象に 2 次元解析を行った. 解析条件は参考文献<sup>9)</sup>に準じた. 黒松の抵抗係数, 葉面積密度はそれぞれ 0.8, 1.17 であり本研究のモデル変数に式(14)を用いて換算すると代表長さ  $\bar{D} = 1.86$ , 充填率  $\rho_r = 0.36$  となる. 3 次元超音波風速計が設置された移動型観測塔によって  $z/H = 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0$  の位置で測定された平均風速および乱流エネルギーと解析の結果を比較した. 代表的な平均風速の鉛直分布を図 2 に示す. 植生の直後では風速は過大評価の傾向があるが全体として十分な予測精度があることが示された. 一方, 乱流エネルギーに関しては特に  $z/H = 3 \sim 5$  の後方領域で過小評価の傾向にあった.

なお, 標準  $k-\epsilon$  モデルと LK モデルの差異は殆ど認められなかった.

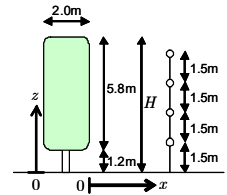


図 1. 解析対象の黒松断面と観測塔の概要

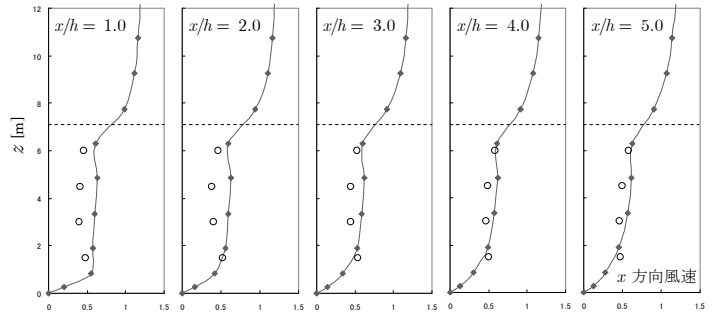


図 2. 樹木背後の流れ場

○:観測値, ◆:予測値, 樹木高の流入風(5.3m/s)で無次元化. 破線:樹木高.

#### 3.2. 2:1:1 角柱周りの流れ

提案したキャノピーモデルによって縦:幅:奥行比が 2:1:1 の角柱周りの流れ場の 3 次元解析を行い, 前節同様, 文献<sup>9)</sup>に示した風洞実験の結果と比較した.  $1.68\text{m}(x) \times 1.1\text{m}(y) \times 0.9\text{m}(z)$  の計算領域内で角柱が位置する格子に充填率 100%を設定し, 計算した結果を図 3 に示す. 標準  $k-\epsilon$  モデルの計算結果も併せて示した. 図 3 から角柱近傍と後流領域で風洞実験結果とすこし違う箇所があるものの, 全体的によく一致することが分かる. LK モデルでは淀み点付近の乱流エネルギーの生成が抑制され角柱近傍で標準  $k-\epsilon$  モデルよりも観測値に近い. 本研究で提案したキャノピーモデルを用いる場合には, 複雑な計算格子を用いなくとも, 複雑な計算格子を用いる従来の気流解析手法と同じ精度で予測できることが分かる.

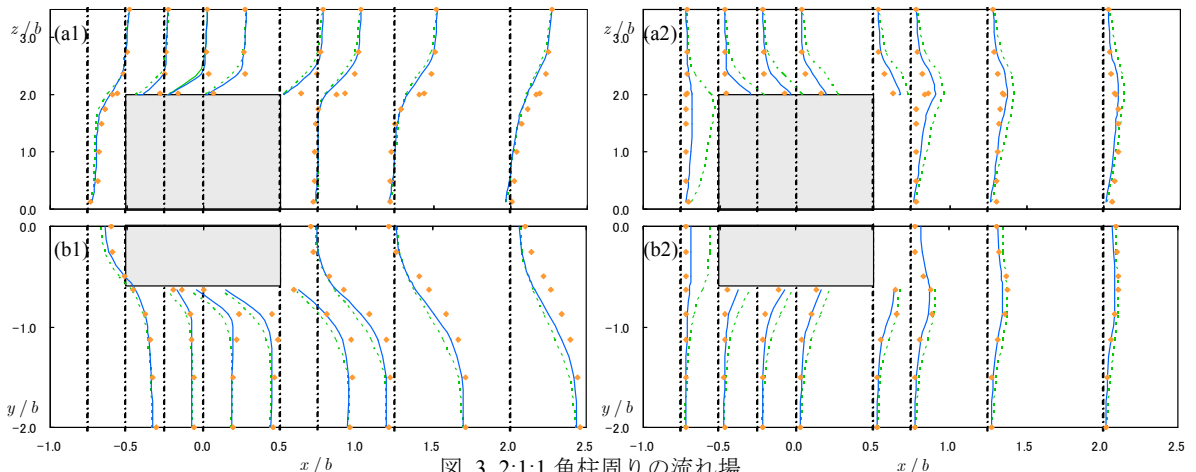


図 3. 2:1:1 角柱周りの流れ場

(a1)  $y/b = 0$  平面主流方向風速, (a2) 同平面乱流エネルギー, (b1)  $z/b = 1.25$  平面主流方向風速, (b2) 同平面乱流エネルギー. 観測値:点, 標準  $k-\epsilon$ :破線, LK:実線. 一点破線は各測定点の原点を, 灰色の領域は高充填率領域を示す. なお各軸は角柱の幅  $b = 0.08$  で規格化した. 高充填率領域の解析値は省略した.

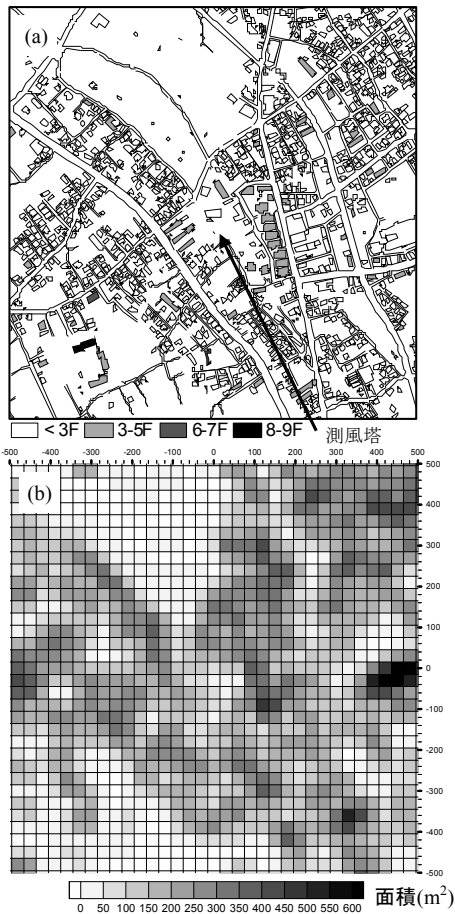
#### 4. 数値解析を利用した強風の推定

本研究では台風 0314 号が宮古島を通過する際の気象台の観測値をもとに提案したキャノピーモデルを用いた気流解析で得られた風向・風速比によって平坦地形風速に換算し気象台の北方に位置する沖縄電力(株)宮古支店における風速を推定した。

##### 4.1. 観測塔周辺の様子と台風 0314 号通過時の観測値

宮古島地方気象台では9月11日午前3時12分に最大瞬間風速 74.1m/s が記録された。このときの風向は北風であった。

図 4(a)に宮古島地方気象台の測風塔を中心とした周辺の様子を示す。気象台は市街地に位置し観測値が建物の影響を大きく受けていることが予想される。本研究では、石原ら<sup>10)</sup>によって示された台風到来時の全サンプリングデータを基に求められた 10 分間平均風速を以下の解析に用いた。



##### 4.2. 気流解析条件

気象庁宮古島地方気象台、沖縄電力宮古支店周辺とも同じ条件で気流解析を行った。標高、土地利用はそれぞれ国土地理院数値地図 50m メッシュ、国土交通省国土数値情報「KS-202-1」を用いた。解析領域は水平方向 10.3km×7.3km、鉛直方向 1.5km とし、16 方位の解析を行った。解析には 26 万点の計算格子を使用し、水平方向、鉛直方向最小メッシュをそれぞれ 30m、1m とした。

本研究では建物の位置、形状および建物高を(株)ゼンリン発行の住宅地図データベース「Zmap-TOWN2」から読み取った。同地図では 3 階以上の建物の階数が収録されている。建物の相当階高を 3.0m とし、建物高に換算した。また 3 階未満の建物に関しては 2 階建と仮定した。図 4 には本研究で用いたデータから計算格子ごとに提案したキャノピーモデルのパラメータを抽出した例を示す。

図 4. 都市キャノピーモデルパラメータの抽出(株)ゼンリン「ZmapTOWN2」を元に作成した地方気象台測風塔を中心とした 1km×1km の範囲の建物階数分布図(a)と同電子地図から抽出した各計算格子内(30m×30m)の建物占有面積の水平分布図(b)

##### 4.3. 平坦地風速への変換

本研究ではまず宮古島気象台で観測された風速・風向を仮想的な平坦地の風速・風向へ変換した。その変換係数を表 1 に示す。表 1 は気流解析の流入風(13.5m)と各サイト地点の風速との風速比・風向偏角を求めたものである。気象台観測風速と解析による気象台地点の風速比の逆数との積から求めた平坦地形上風速、気象台の観測風向と解析による気象台地点

表 1. 各解析サイトにおける風速比・風向偏角

サイト名(観測高)	宮古地方気象台(13.5m)		沖縄電力宮古支店(22m)	
流入風向	N	NNE	N	NNE
風速比	0.76	0.74	1.01	1.09
風向偏角(°)	+3.5	+0.61	+0.69	+1.01

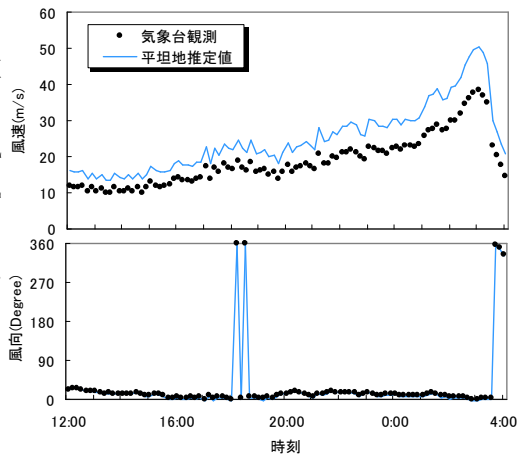


図 5. 平坦地風速に変換された気象台観測値

の風向偏角との差から求めた平坦地形上風向をそれぞれ図 5(上, 下)に示した。

#### 4.4. 宮古支店における最大風速の推定

表 1 に示した気流解析により求めた宮古支店地点における風向別風速比と風向偏角を基に、平坦な地形上（高さ 13.5 m）の風速・風向記録から、宮古支店観測高さにおける風向・風速の時間変化を求めた結果を図 6 に示す。その際には宮古支店で得られた風速を平坦な地形上の風速と気流解析から得られた風速比との積、風向を平坦な地形上の風向と気流解析から得られた風向偏角との和から求めた。風速・風向とも観測値とよく一致していることが分かる。平均風速の予測誤差（10 日 12:00 から 11 日 2:30 まで）はバイアス 0.34m/s、標準誤差が 2.57m/s である。なお、宮古支店の風観測に使われている風向風速計の測定範囲は 0~60m/s となっているため、最大瞬間風速が 70m/s を超えている 11 日 2:40 から 3:00（風速計故障）までのデータを取り除いた。

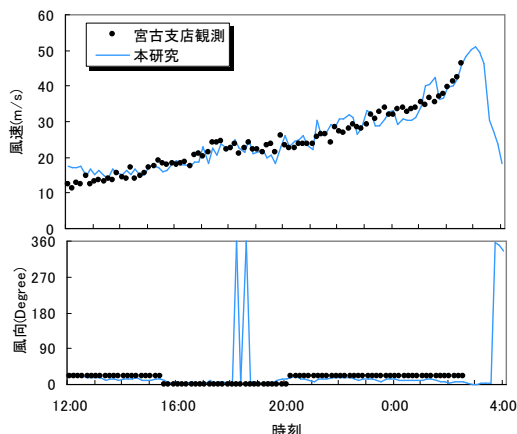


図 6. 宮古支店における観測と本手法による推定値の時系列比較(上: 風速, 下: 風向)

#### 5. まとめ

本研究では新しい市街地気流解析モデルを提案し、次の結論を得た。

- 1) 多孔質媒体理論に基づき植生および都市キャノピーともに適応可能なキャノピーモデルを提案した。
- 2) 充填率の大きく異なる植生と建物周りの気流解析を行い、現地観測および風洞実験と比較することにより、本研究で提案したモデルの予測精度を検証した。
- 3) 宮古島地方気象台及び沖縄電力宮古島支店を対象に、実際の植生および都市キャノピーを考慮した気流解析を行い、台風 0314 号の時に観測された風速・風向記録と比較することにより、その有効性を示した。

#### 参考文献

- 1) 石原 孟ら, 日本各地の年最大風速データベースの構築と測器補正, 日本風工学会誌, No.92, 2002.7.
- 2) 平岡 久司, 丸山 敬, 中村 泰人, 桂 順治, 植物群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究 (その 1) 乱流モデルの作成, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 406 号, 1989.12.
- 3) 石原 孟, 非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化, 日本流体力学会誌, 第 22 巻, 第 2 号, pp.387-396, 2003.
- 4) Launder et al., Modeling flow-induced oscillations in turbulent flow around a square cylinder, ASME Fluid Engineering conference, 1993.
- 5) Burke, S.P, Plummer, W.B., Gas Flow through Packed Columns, Industrial and engineering chemistry, vol.20, No.11, p.p.1196-1200, 1928.11.
- 6) 丸山 敬, 市街地上空における耐風設計用気流性状の予測に関する研究, 学位論文, 1993.
- 7) 孟 岩, 老川 進, 建物群落内外における流れ場の乱流特性と組織運動, 日本風工学会誌, No.75, 1998.4.
- 8) Green, S.R., Modeling Turbulent Air Flow in a Stand of Widely Spaced Trees, PHOENICS Journal Computational Fluid Dynamics and its Applications, 5, pp.294-312, 1992.
- 9) 市街地風況予測のための流体数値解析ガイドブック, 日本建築学会, 2007.
- 10) 石原 孟, 山口 敦, 高原 景滋, 銘苺 壮宏, 新城 文博, 風洞実験と気流解析に基づく台風 0314 号の最大風速の推定, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.51A, 2005.3.