

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

Evaluation of maximum wind speed during typhoon 0314 using wind tunnel test and numerical simulation

石原孟*, 山口敦**, 高原景滋***, 銘苅壮宏***, 新城文博****

Takeshi ISHIHARA, Atsushi YAMAGUCHI, Keiji TAKAHARA, Takehiro MEKARU and Fumihiro SHINJO

*工博, 東京大学助教授, 工学系研究科総合研究機構 (〒113-8656 東京都文京区弥生 2-11-16)

**工修, 東京大学助手, 工学系研究科総合研究機構 (〒113-8656 東京都文京区弥生 2-11-16)

***グループリーダー, 主任, 沖縄電力株式会社研究開発部 (〒901-2602 沖縄県浦添市牧港 5-2-1)

****常務理事, 南西地域産業活性化センター (〒900-0015 那覇市久茂地 3-15-9)

Maximum wind speed at Miyakojima Island during typhoon 0314 was investigated by means of wind tunnel test and numerical simulation. Following results were obtained. 1) Wind speed measured at Miyakojima Meteorological Station was affected by surrounding buildings, causing remarkable decrease of wind speed. 2) Wind speed over flat terrain was estimated to be 49.6m/s for the northerly wind. 3) Wind speed estimated by numerical simulation at Okinawa Electric Power Company Miyakojima Branch Office shows good agreement with the observation with the bias of 0.38m/s and the standard error of 0.19m/s. 4) Maximum wind speed at the turbine site was estimated to be 60m/s, which is as 1.5 times large as the observed wind speed at the meteorological station.

Key Words : Wind Tunnel Test, Numerical Simulation, Typhoon, Maximum Wind Speed

キーワード : 風洞実験, 気流解析, 台風, 最大風速

1. はじめに

2003 年 9 月 11 日未明, 台風 14 号は沖縄県宮古地方を直撃し, 死者 1 人, 負傷者 84 人, 全壊(13 棟), 半壊(45 棟), 一部損壊の住宅 139 棟など大きな被害をもたらした。象徴的な被害としては沖縄電力株式会社所有の 6 基の風力発電用風車のうち 3 基が倒壊し, 残る 3 基もブレードの折損などの被害を受けた。これらの被害原因解明のためには, 風車設置地点での正確な強風の推定が不可欠である。宮古島地方気象台の観測によると, 最大瞬間風速は 74.1m/s (10 分間平均 38.4m/s) であり, 気象官署観測史上 7 番目に大きい値であった。しかし, 宮古島地方気象台は島の市街地に位置するため, 観測された風速は市街地や近傍建物の影響を受けており, 実際の風車設置地点における風速を下回っている可能性がある。従って, 宮古島地方気象台で得られた台風 14 号通過時の風観測データを基に気象台近傍の建物の影響を考慮に入れた上で風車設置地点における風向・風速を評価する必要がある。

一般に風観測データに基づき, 周辺地点の風向・風速を推定するためには風洞実験^{1)~7)}あるいは気流解析^{8)~17)}が用いられる。風洞実験は建物及び植生を忠実に再現できるため, 気象台近傍の建物が風観測データに与える影響を厳密

に評価することが可能である。ただし, 水面のような地表面粗度の小さい地域では模型縮尺の制約のため, 風洞で再現することが難しい。一方, 気流解析は水面を含む風車サイト周辺の地表面粗度及び地形の影響を容易に評価できる。ただし, 数値解析により市街地中の建物の影響を厳密に評価するためには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。

そこで, 本研究では風洞実験, 気流解析それぞれの長所を生かし, 風洞実験及び気流解析によるハイブリッドな評価手法を提案し, 風車建設地点の強風を推定した。具体的には, まず気象台周辺の建物が風速に与える影響を風洞実験により評価し, 台風 14 号到来時に観測された風向・風速を平坦な地形上(標高が海面と同じ高さ, 地表面粗度が一樣)の風向・風速に変換する。次に, 気流解析により風車建設地点近傍の地形及び地表面粗度が風車設置地点での風速に与える影響を評価する。最後に平坦な地形上の風向・風速記録をもとに風車建設地点の風速を評価する。また, 本評価手法の有効性を検証するために, 本手法により推定された風向・風速を沖縄電力宮古支店で得られた台風 14 号時の風向・風速と比較し, 予測精度の評価を行う。

2. 台風 14 号と被害の概要

2003 年 9 月 4 日に西太平洋の赤道付近で発生した台風 14 号は北西に進路をとり、9 月 11 日未明に沖縄県宮古島を直撃した。台風はその後、進路を北北西に変え、韓国南部においても甚大な被害をもたらした後日本海を北上し、9 月 14 日にオホーツク海東部で消滅した。図 1 には台風 14 号の進路を、図 2 に台風が宮古島を直撃した 9 月 11 日午前 3 時の天気図を示す。また、宮古島を直撃した 9 月 11 日未明における台風の位置、進行方向、移動速度、中心気圧の一覧を表 1 に示すが、当時の中心気圧は約 910hPa であり、非常に強い台風であったことがわかる。

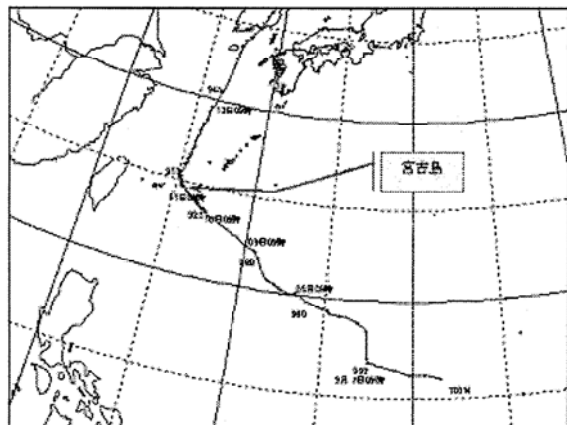


図-1 台風 14 号の進路

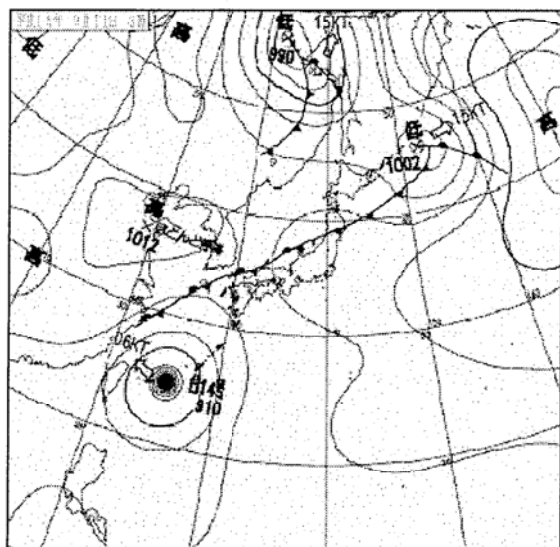


図-2 地上天気図(9 月 11 日 03 時)

宮古島中央部の平良市街地の南端に宮古島地方気象台が設置されている(図-3)。図-4 に宮古島地方気象台の測風塔の写真を示すが、気象台庁舎の近傍にあり、風向によっては庁舎の影響を大きく受けていることが予想される。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-5 に宮古島地方気象台で観測された毎 10 秒の最大瞬間風速と、最低風速を示す。通常、気象台における風速の観測データとして利用可能なデータは、毎正時での 10 分平

均風速であるが、台風時のように短時間に風速が急激に変化する場合においては、時間分解能が十分であるとは言えない。本研究では、台風による強風の時間変化をより高精度に再現するために、宮古島地方気象台における台風到来時の全サンプリングデータを基に全 10 分間の平均風速を求め、以下の解析に用いた。また、風向に関しても通常の気象台のデータは 16 風向の分解能しか持っていないが、本研究で対象とした宮古島地方気象台のように市街地内の観測地点においては、風向のわずかな違いにより周辺地物の影響が大きく異なることが予想される。そこで本研究では、風向に関しても全サンプリングデータより算出し、より細かい分解能の風向を求めた。

表-1 9 月 11 日未明の台風 14 号の位置、進行方向、移動速度、中心気圧

時刻	緯度 (deg)	経度 (deg)	進行方向 (deg)	移動速度 (km/h)	中心気圧 (hPa)
0:00	24.5	125.7	132.3	15.11	915
1:00	24.5	125.5	143.7	13.43	915
2:00	24.7	125.5	143.5	13.45	910
3:00	24.7	125.4	159.8	11.78	910
4:00	24.8	125.4	132.2	12.10	910
5:00	24.9	125.4	132.3	15.11	915

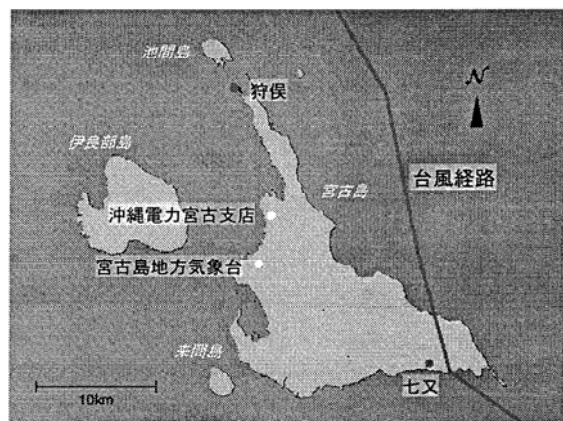


図-3 台風 14 号の経路、風車設置地点、宮古島地方気象台、沖縄電力宮古支店の位置

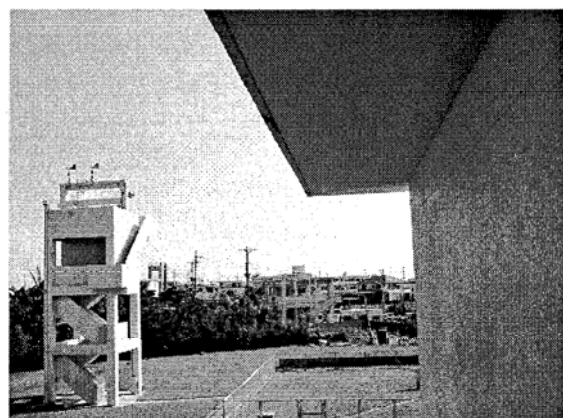


図-4 宮古島地方気象台の測風塔(左)と庁舎

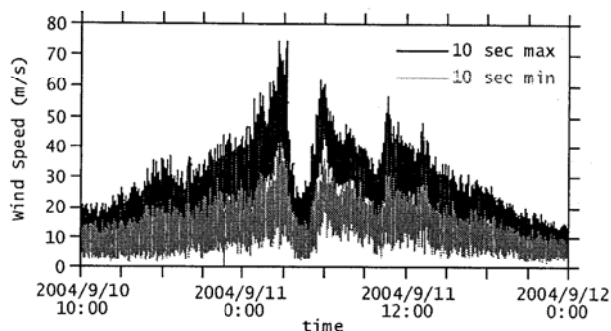


図-5 宮古島地方気象台における毎10秒の最大風速と最低風速

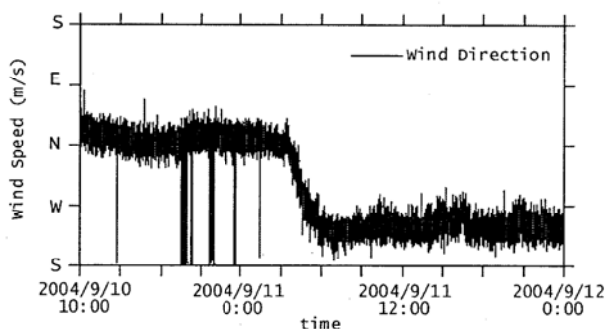


図-6 宮古島地方気象台における毎10秒の最大風速時の風向

島の北端の狩俣地区と南岸の七又地区には沖縄電力株式会社の風力発電実証設備が設置されており(図-3), 狩俣地区には4基, 七又地区には2基の風車が設置されている。台風14号によりこれら6基の風車が全て被害を受けた。本研究では, これらのサイトを対象に最大風速の推定を行った。

一方, 市街地北端の沖縄電力株式会社宮古支店(図-3)においても風速計が設置されており, 強風により風速計が故障する9月11日午前2時30分以前の風速・風向が記録されている。本研究では提案した手法の検証のため, この観測データを用いた。

3. 風洞実験

本研究では宮古島地方気象台周辺の市街地の影響を評価するため, 縮尺 1/1000 の模型を作成し, 気象台測風塔地点において平均風速及び, 乱れ強さの鉛直分布の測定を行った。

3.1 風洞実験の概要

(1) 風洞実験装置

実験は図-7 に示す東京大学風工学実験室の強風シミュレーション風洞を使用した。風洞の測定部は長さ 11m, 幅 1.5m, 高さ 1.8m である。模型を設置するターンテーブルの直径は 1.4m であり, 風洞風速は 6m/s に設定し, 平均風

速及び, 乱れの測定を行った。

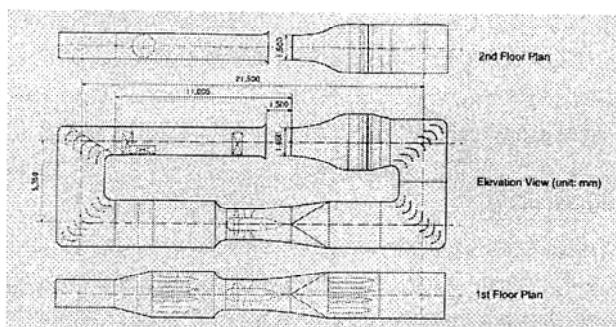


図-7 強風シミュレーション風洞の平面と断面図

気流は X 型熱線プローブにより測定した。X 型熱線プローブは定温度型熱線風速計に接続されている。ローパスフィルタで高周波数の信号をカットし, センサインターフェース測定機器 (A/D 変換器内蔵) を用い, 実験データを PC に取り込んだ。本実験ではサンプリング周波数を 1000Hz, ローパスフィルタを 500Hz に設定した。

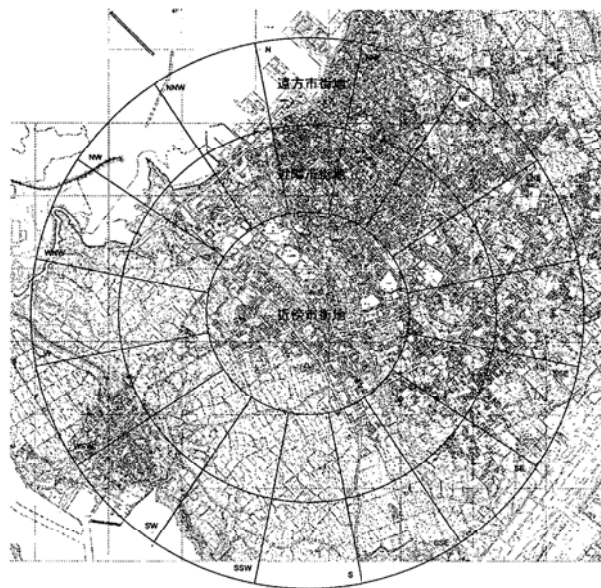


図-8 モデル化した市街地の範囲

(2) 風洞模型

風洞模型の作成に際しては, 周辺の建物及び地物の影響が適切に考慮されるように模型化する範囲を決定する必要がある。図-8 に宮古島地方気象台周辺の地図と, 模型化した範囲を示す。最も内側の円の中心が気象台の位置に相当する。本研究ではまず, 平良市の 2500 分の 1 都市計画図に基づき, 気象台の測風塔(測定高さ 13.5m)を中心とする半径 700m 以内のすべての建物を再現した近傍市街地模型を作成した。建物の高さはゼンリン電子地図帳により決定し, また気象台近傍の建物は現地調査の結果に基づき忠

実に再現した。更に気象台の周辺の植生は航空写真により再現した。図-9には作成した近傍市街地模型の全景を示し、南西方向に8階建てと4階建ての県営団地の建物が見られる。これらの建物の存在は気象台における風観測結果に大きな影響を与える。

近傍模型の上流側には、気象台からの距離 700m から 1320m までの近隣市街地の模型を設置した。さらに、最も強い風速が記録された北風および南西風の実験に際しては、気象台からの距離 1320m~2140m までの遠方市街地の模型も上流側に設置し、海までの全ての地物の影響を考慮した。図-10には風洞実験の全景を示す。手前に近傍市街地の模型、その上流側に近隣市街地の模型、さらに上流にスパイヤが設置されているのがわかる。

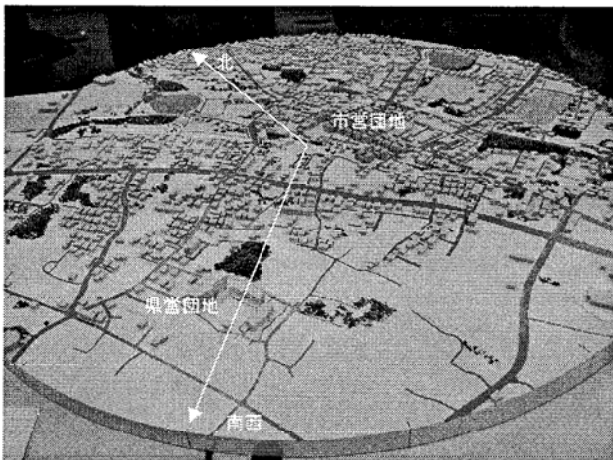


図-9 気象台周辺建物模型

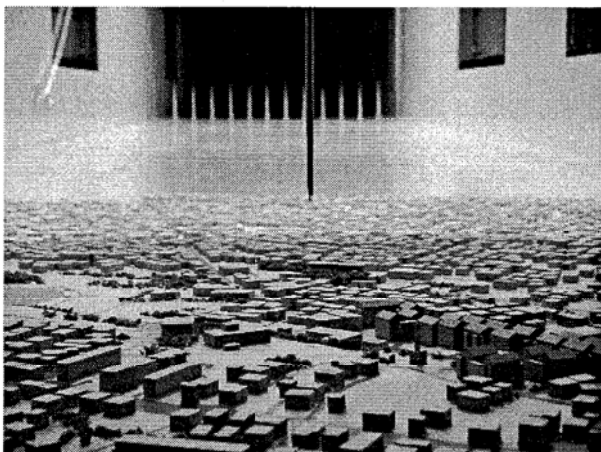


図-10 風洞実験の全景

(3) 測定風向と測定高度

実験風向は 22.5 度おきの 16 方位に加え、最大風速を記録した北風向(N)及び吹き返し最大風速を記録した南西風向(SW)の両側各 12.5 度の 4 風向を追加し、計 20 風向の計測を行った。測定高さは実スケールで 5, 10, 13.5, 20, 30, 40, 50, 60m の 8 点とし、気象台での風観測高さ(13.5m)も含まれている。実験を行った風向と、それぞれの風向について市街地の再現範囲を表-2 にまとめる。

表-2 実験風向と風向別の市街地の再現範囲

風向角 (deg)	記号	近傍 市街地	近隣 市街地	遠方 市街地
0	N	○	○	○
11.25		○	○	○
22.5	NNE	○	○	○
45	NE	○	○	
67.5	ENE	○	○	
90	E	○	○	
112.5	ESE	○	○	
135	SE	○	○	
157.5	SSE	○	○	
180	S	○	○	
202.5	SSW	○	○	
213.75		○	○	
225	SW	○	○	○
236.5		○	○	○
247.5	WSW	○	○	○
270	W	○	○	
292.5	WNW	○	○	
315	NW	○	○	
337.5	NNW	○	○	
248.75		○	○	

(4) 大気境界層の再現

本研究ではターンテーブルの中心位置より 7.3m 上流側にスパイヤを設置し、平坦な地形上の大気境界層を再現した。

図-11 はターンテーブルの中心位置で測定した平均風速(a)及び乱れ強さの鉛直分布(b)を示す。黒丸は実験値、実線はべき関数によりフィッティングした曲線を表す。平均風速及び乱れ強さのべき指数はそれぞれ 0.13 と -0.20 となり、平坦な地形上の大気境界層を再現していることが分かる。

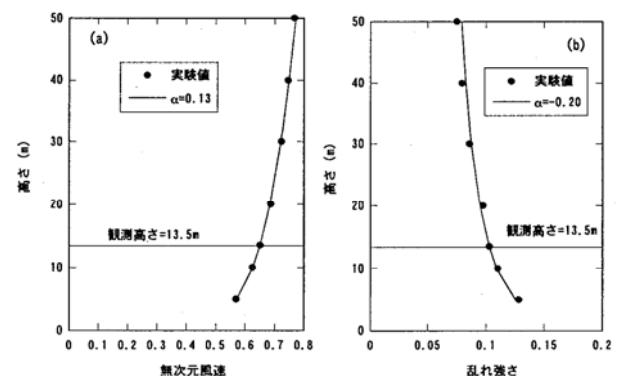


図-11 ターンテーブルの中心位置における平均風速及び乱れ強さの鉛直分布

3.2 風洞実験結果

(1) 風速の鉛直分布

図-12 には最大風速及び吹き返し最大風速を記録した北風及び南西風の時の平均風速(a)及び乱れ強さ(b)の鉛直分布を示す。測定された平均風速は風洞風速(上空風速相

当)で無次元化し、縦軸は実スケールの高さを使用した。また比較のために、平坦な地形上の平均風速の鉛直分布も併記した。北風の場合には平均風速の欠損が大きく、また高度が低くなる程風速の欠損が大きくなっている。これは宮古島の市街地が気象台の北側に集中していることによるものであり、密集している市街地の建物が大きな抵抗となり、地面に近い部分の風速を大きく減少させている。一方、南西風の場合には平均風速の欠損が10m以下の高さにおいては北風の場合より少ないが、それより高い高度では反対に北風の場合よりも大きくなっている。図-9から分かるように、気象台の南西側には県営団地があり、その影響で地上10mより高い高度での平均風速が大きく減少している。乱れ強さについては市街地の影響により平坦な地形に比べ大きい値となっており、平均風速の欠損が大きい場所では乱れ強さも大きいことが分かる。

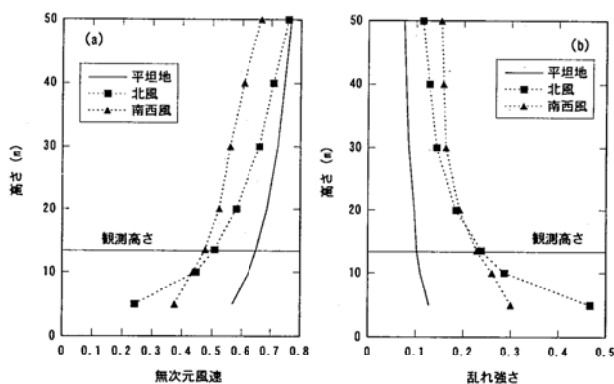


図-12 気象台測風塔位置における北風と南西風時の平均風速(a)及び乱れ強さ(b)の鉛直分布

(2) 風向別の市街地の影響の評価

気象台周辺市街地が台風14号時の風観測記録に与える影響を明らかにするために、市街地模型を設置した場合と設置していない場合の風観測高さでの風速比を求め、図-13に示した。いずれの風向においても風速比の値が1より小さく、市街地の影響により平均風速が平坦な地形上の風速より減少している。特に、風速の減少が顕著に見られた東風向(0.62)及び北北西から西北西にかけての風向の時、測風塔の上流には市営団地及び気象台庁舎があり、これらの建物の存在が気象台で観測された平均風速に大きな影響を与えることが分かる。また、南西風向から西南西風向にかけて風向をわずか11.25度変化させるだけで、風速比は0.73から0.85に大きく変化する。図-9から分かるように、この風向は県営団地による増速域にあたり、これにより風速が周りの風向より大きくなっている。また台風14号時に最大風速が記録された北風における風速比は0.78となっており、平坦な地形上の風に比べ、平均風速が約2割程小さいことが分かる。図-14には風観測高さでの乱れ強さの風向による変化を示すが、風速比が大きく減少している風向では乱れ強さが大きな値となっていることが分かる。

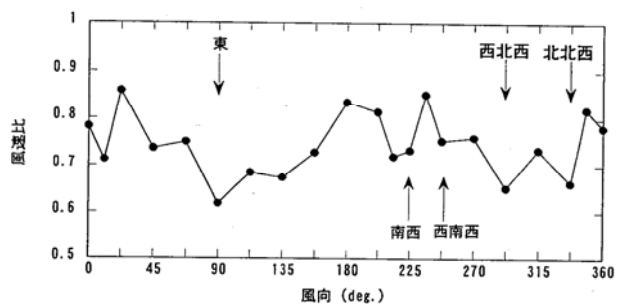


図-13 風速比の風向による変化(風観測高さ13.5m)

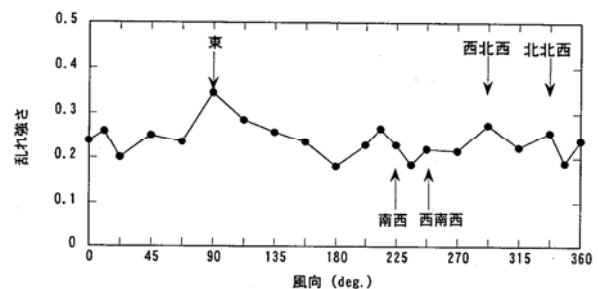


図-14 乱れ強さの風向による変化(風観測高さ13.5m)

(3) 平坦な地形上の平均風速への変換

平坦な地形上の風向は気象台で観測された風向と風洞実験から得られた風向偏角との差、平坦な地形上の風速は気象台で観測された風速と風洞実験から得られた風速比の逆数との積から求めた。ここで用いた10分間平均風向・風速データは宮古島地方気象台で観測された10秒間平均風向・風速データにより作成されたもので、通常公表されている16方位(22.5度間隔)の風向データより分解能が高く、連続的な風向データにより風速の変換が可能である。図-15には変換された平坦な地形上の風速記録、図-16には風向記録を示す。この図から分かるように、11日3時に気象台で記録された最大風速38.4m/sは平坦な地形上に変換した場合に49.6m/s(北風、1.4度)となる。また11日6時10分に記録された吹き返し最大風速37.1m/sは45.5m/s(南西風、232.7度)となる。ちなみに通常気象台で公表されている16方位の風向を用いて変換すると、吹き返し風の最大風速は50.7m/sとなり、1割以上過大に評価されてしまう。16方位の風向を用いる場合には232.7度の風向を南西に分類され、南西風の風速比を使用されるため、図-13により内挿から求められた風速比に比べ小さくなり、平坦な地形上の風速が過大に評価されたる。

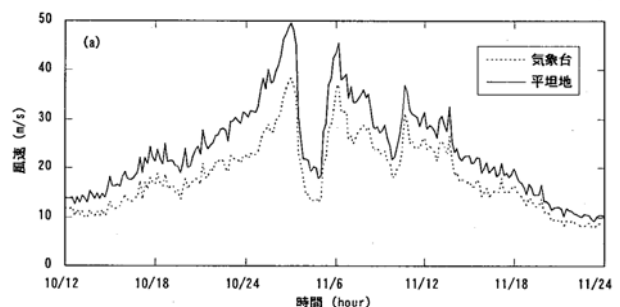


図-15 平坦な地形に変換された風速記録

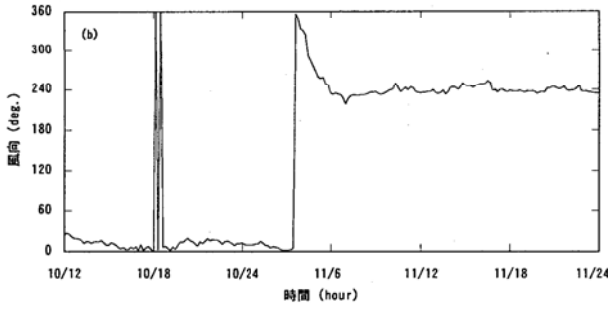


図-16 平坦な地形に変換された風向記録

4. 気流解析による最大風速の推定

本章では狩俣及び七又における風車設置地点での風速を評価するため、風車設置地点を含む宮古島北端の狩俣及び南東部の七又の各地点における周辺地形と地表面粗度を再現した3次元数値モデルを作成し、前章で求めた平坦な地形上の平均風速の時系列を風車建設地点での平均風速の時系列に変換する。また、本予測手法の精度を検証するために、気象台の北側に位置する沖縄電力宮古支店を対象とした気流解析も同時に行い、観測値と比較した。

4.1 解析モデルと解析条件

本研究では、3次元風況予測プログラム MASCOT (Microclimate Analysis System for Complex Terrain) ^{19)~21)}を用いて気流解析を行った。本解析プログラムは流体力学の基礎方程式である質量保存の式と運動量保存の式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。流体運動は以下のような連続の式と運動量保存の式により記述される。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j') \quad (2)$$

ここで、 $\bar{u}_i$ と $\bar{u}_i'$ は物理空間での x_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、 ρ は流体の密度、 μ は粘性係数である。レイノルズ応力 $-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j'$ は線形渦粘性型モデルにより近似すると、次のようになる。

$$\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' = \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

μ_t は乱流粘性係数であり、乱流エネルギー k と乱流エネルギー散逸率 ε により、次式のように表す。

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

本解析では気流中の乱れを評価するため k - ε 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 ε は以下の輸送方程式を解くことにより求める。

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中の定数は標準 k - ε 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。

本解析は沖縄電力宮古支店周辺、狩俣周辺、七又周辺の3ケースとも同じ解析条件で行った。流入風としては、風洞実験により得られた平均風速及び乱れの鉛直分布を与え、地表面の境界条件として与える標高および土地利用は国土地理院発行の数値地図 50m メッシュ(標高)、北海道地図(株)発行の 10m メッシュ標高データ、および国土交通省発行の国土数値情報「KS-202-1」(1/10 細分区画土地利用データ)を用いた。解析領域は水平方向に $9.4\text{km} \times 6.4\text{km}$ 、鉛直方向に 1.5km とし、16 方位の解析を行った。計算格子は非等間隔の格子を採用し、対象地点周辺及び地面近くの計算格子間隔を細かくすることにより計算精度の向上を図る。解析に用いた計算格子は風方向に 131 点、風直角方向に 98 点、鉛直方向に 33 点の合計 36 万点の格子を使用した。水平方向の最小メッシュは 10m または 20m とし、鉛直方向の最小メッシュは 3m と設定した。

4.2 大気境界層の再現

本解析では風洞と同様にまず平坦地形上の大気境界層を再現した。風洞実験により得られた平均風速及び乱れの鉛直分布を解析領域の中心位置より 6km 上流側に設定し、解析領域の中心地点における平均風速及び乱れ強さの鉛直分布を求めた。図-17 には解析対象領域の中心地点で得られた平均風速及び乱れ強さの鉛直分布と風洞実験結果との比較を示す。黒丸は実験値、実線は気流解析結果を表す。平均風速及び乱れ強さとも予測結果と実験値と一致し、平坦な地形上の大気境界層を気流解析プログラムにより再現できたことが分かる。

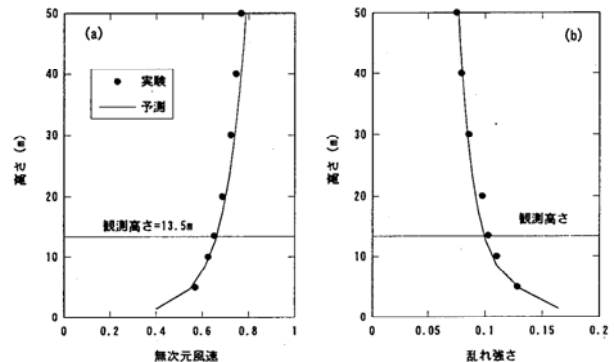


図-17 解析対象地点の中心位置における平均風速及び乱れ強さの鉛直分布の比較

4.3 本予測手法の精度検証

本予測手法の有効性を示すために、まず気象台の北側に

位置する沖縄電力宮古支店における台風 14 号が通過した時の風向・風速の時間変化を予測し、台風 14 号の時に観測された風向・風速記録（地上 22m、図-18(a)の黒点）と比較した。図-18 には宮古支店周辺の計算格子、標高及び地表面粗度を示し、図中の円は計算格子を密に配置している領域を表す。また図中のコンターラインは標高（5m 間隔）、塗りつぶしコンターは地表面粗度（図-18(b)）を示す。青は水面（海、湖）、薄いグレーは粗度の小さい地域（荒地、畑）、濃いグレーは粗度の大きい地域（市街地や森）を表している。

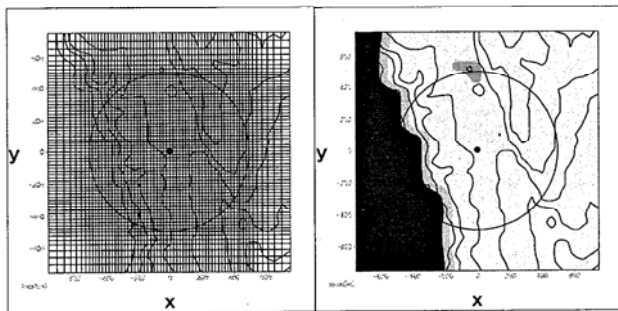


図-18 宮古支店周辺の解析領域(a)標高と計算格子、(b)標高と地表面粗度

図-19 には気流解析により求めた風向別風速比を示す。この風速比は気流解析から得られた沖縄電力宮古支店における観測高さ 22m の平均風速と気流解析から得られた平坦な地形上高さ 13.5m の平均風速との比を表す。北西から南南西風向にかけて、1 より大きくなっていることが分かる。これは宮古支店の西側が海に隣接していることによるものである。

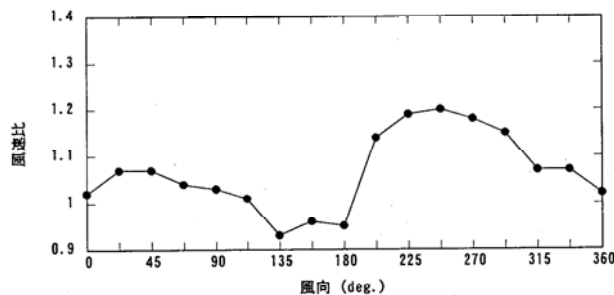


図-19 宮古支店での風速比の風向による変化

気流解析により求めた風向別風速比と風向偏角を基に、平坦な地形上（高さ 13.5m）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、図-20 と図-21 に示す。その際には宮古支店での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。これらの図から、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）はバイアスが 0.38m/s、

標準誤差が 0.19m/s である。平均風速は南西風の時に最大となっており、宮古支店の西側が海に隣接していることに対応している。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。

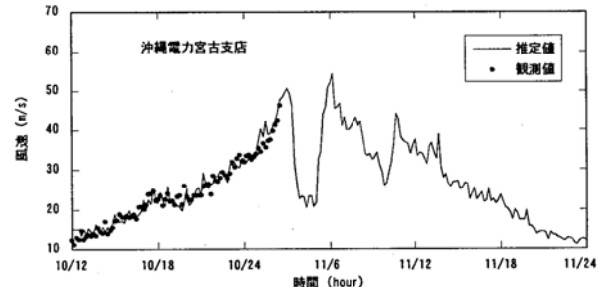


図-20 平均風速の時間変化の推定値と観測値との比較

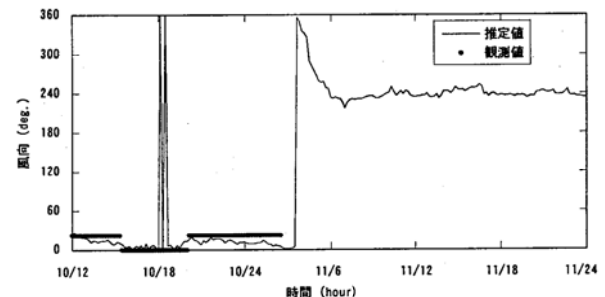


図-21 風向の時間変化の推定値と観測値との比較

4.4 風車設置地点における強風の推定

風車設置地点の周辺地形及び地表面粗度が平均風速を与える影響を明らかにするために、3 次元数値モデルにより、狩俣及び七又における風車設置地点での風車ハブ高さの最大風速、乱れ強さ及び瞬間最大風速を予測した。表-3 には各風車設置地点の風車ハブ高さ（地上から）と標高を示す。

表-3 各風車のハブ高さと標高

	ハブ高さ (m)	標高 (m)
狩俣 3 号機	36	7.5
狩俣 4 号機	36	6.2
狩俣 5 号機	36	7.4
狩俣 6 号機	46	9.2
七又 1 号機	44	32.9
七又 2 号機	35.3	34.4

(1) 狩俣サイトにおける風速の評価

前節で述べた沖縄電力宮古支店と同様の手法により、狩俣サイトにおける風車設置地点での風速を評価した。狩俣周辺の地形と地表面粗度を図-22 に示す。図中の黒点は北からそれぞれ狩俣 6 号機、狩俣 3、4、5 号機を表す。

図-23 には気流解析により求めた風向別風速比を示す。この風速比は気流解析から得られた狩俣サイトにおける風車ハブ高さ（狩俣 3、4、5 号機は 36m、狩俣 6 号機は

46m)の平均風速と気流解析から得られた平坦な地形上高さ13.5mの平均風速との比を表し、いずれの風向も1より大きい値を示す。これは風車ハブ高さが気象台の風観測高さ13.5mより高いことや狩俣サイトが海に近いことによるものである。狩俣サイトは南東から北西に伸びている関係で、北東から東また南西から西にかけて陸の影響が少なく、狩俣3, 4, 5号機と狩俣6号機の風速比は近い値となっている。

気流解析により求めた風向別風速比を基に、平坦な地形上(高さ13.5m)の風速記録から、狩俣サイトにおける風車ハブ高さでの風速を求め、図-24に示す。平均風速は北風の時に最大となっていることが分かる。

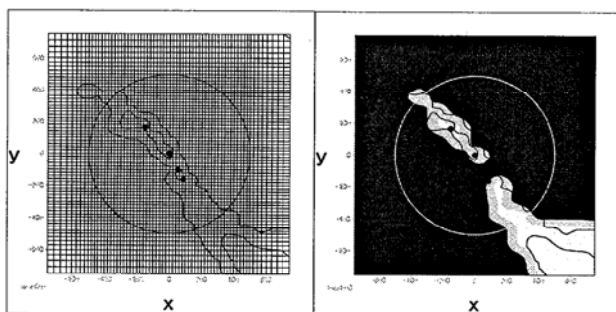


図-22 狩俣サイト周辺の解析領域 (a)標高と計算格子, (b)標高と地表面粗度

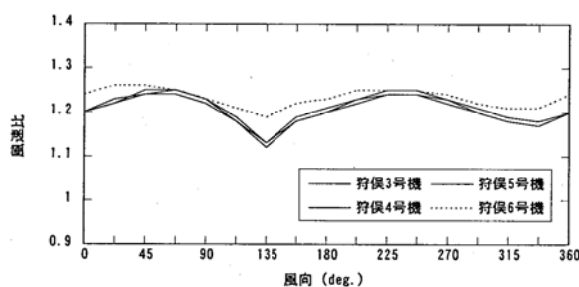


図-23 狩俣サイトでの風速比の風向による変化

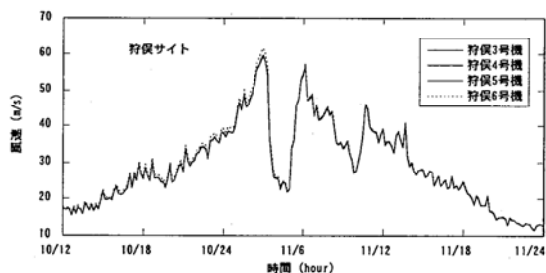


図-24 狩俣サイトにおける平均風速の時間変化

(2) 七又サイトにおける風速の評価

最後に、七又サイトにおける風車設置地点での風速を評価した。狩俣周辺の地形と地表面粗度を図-25に示す。図中の黒点は西からそれぞれ七又1号機、2号機を表す。図-26には気流解析により求めた風向別風速比を示す。この風速比は気流解析から得られた狩俣サイトにおける風車

ハブ高さ(七又1号機は44m, 七又2号機は35.3m)の平均風速と気流解析から得られた平坦な地形上高さ13.5mの平均風速との比を表し、いずれの風向も1より大きい値を示す。風速比が南風の時に特に大きくなる理由は七又サイトの南側が海に近いことによるものである。

気流解析により求めた風向別風速比を基に、平坦な地形上(高さ13.5m)の風速記録から、七又サイトにおける風車ハブ高さでの風速を求め、図-27に示す。

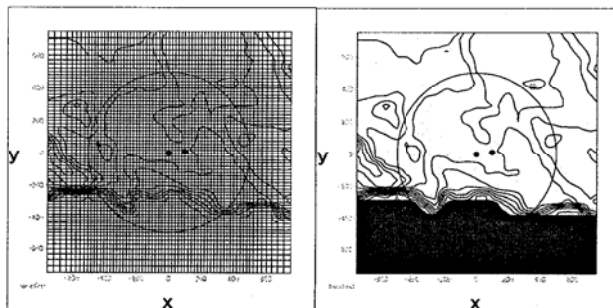


図-25 七又サイト周辺の解析領域 (a)標高と計算格子, (b)標高と地表面粗度

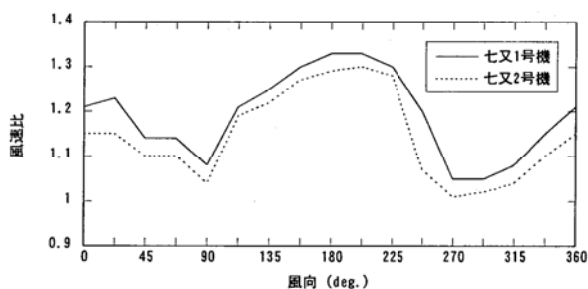


図-26 七又サイトでの風速比の風向による変化

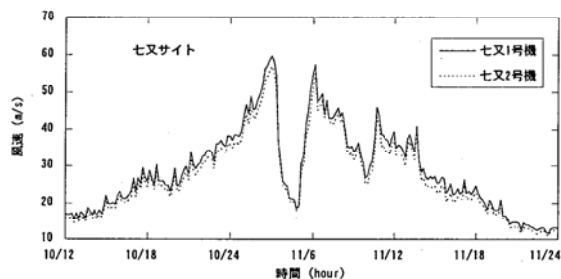


図-27 七又サイトにおける平均風速の時間変化

4.5 狩俣及び七又サイトにおける最大瞬間風速の推定

表4には狩俣及び七又サイトの風車設置地点におけるハブ高さでの平均風速の最大値を示す。これらの最大風速は北風に対応している。同じハブ高さをもつ狩俣3, 4, 5号機の最大風速は標高の違いによりわずかに異なる。

この表から、台風14号が通過した際に、狩俣及び七又における風車設置地点での最大風速は気象台で観測された最大風速38.4m/sより1.5倍以上高く、60m/sに達していることが分かる。

平均風速から瞬間風速に変換するには瞬間風速の評価時間を予め定める必要がある。ここで、気象台の最大瞬間風速の観測に用いたデータサンプリングの間隔 0.25 秒に合わせ、瞬間風速の評価時間を 0.25 秒とした。平均風速と瞬間風速との関係は式(7)により表す。

$$U(t) = g(t) \times U = (1 + p(t) \times I) \times U \quad (7)$$

ここで、 $U(t)$ は評価時間 t 秒の瞬間風速、 U は 10 分間平均風速、 $g(t)$ は評価時間 t 秒のガストファクタである。評価時間 t 秒のピークファクタ $p(t)$ ²²⁾ と 10 分間の乱れ強さ I は次式により算出する。

$$p(t) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{600}{t} \right) \quad (8)$$

$$I = \sqrt{I_u^2 + I_B^2} \quad (9)$$

評価時間を 0.25 秒と設定した場合に、ピークファクタの値は 3.8916 となる。また本研究ではバックグラウンドの乱れ強さ I_B は観測結果に基づき 10% と設定した。ウインドシアーにより作られた乱れ強さ I_u は 3 次元気流解析結果の値を用いた。

各風車のハブ高さでの乱れ強さと瞬間最大風速を表 4 にあわせて示す。台風 14 号の時の 10 分間平均風速により推定された最大瞬間風速は狩俣及び七又サイトとも 90m/s に達しており、航空自衛隊宮古島分屯基地の観測タワー（地上 13m）で記録された最大瞬間風速 86.6m/s を超えていることが分かる。

表 4 各風車のハブ高さにおける平均風速、風向、乱れ強度及び最大瞬間風速

	最大風速 (m/s)	風 向	乱れ強さ I (%)	最大瞬間風速 (m/s)
狩俣 3 号機	59.7	北	12.12	87.9
狩俣 4 号機	59.2	北	12.18	87.3
狩俣 5 号機	59.4	北	12.21	87.6
狩俣 6 号機	61.5	北	12.03	90.3
七又 1 号機	59.8	北	13.28	90.7
七又 2 号機	35.3	北	13.83	87.4

5. まとめ

本研究は、2003 年台風 14 号襲来時の宮古島を対象とし、風洞実験と気流解析の併用による強風評価手法を提案し、風力発電設備設置場所における強風を推定した。まず、宮古島市街地模型を用いた風洞実験により、宮古島地方気象台近傍の建物及び近隣市街地が風向・風速記録に与える影響を明らかにし、気象台における風向・風速記録を平坦な地形上の風向・風速に変換した。次に地形・地表面粗度を再現した数値モデルを用いた 3 次元気流解析を実施し、沖縄電力宮古支店における風速の観測データを用いて本手法の有効性を検証するとともに、狩俣及び七又の風車設置地点での平均風速と乱れ強さを推定した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 宮古島地方気象台近傍建物のうち、東側にある市営団地及び気象台庁舎が風観測記録に与える影響が大きく、風速の値が平坦地形上のそれより 3-4 割小さくなる。一方、近隣市街地の中では南西側にある県営団地は風観測記録に大きな影響を与え、南西風の風速減小は市街地が集中している北風より大きくなる。
- 2) 風洞実験から得られた風向別風速比より、気象台の風向・風速記録を平坦な地形上の風向・風速記録に変換することができた。10 分間平均の最大風速 38.4m/s が平坦な地形上に変換された場合に 49.6m/s（北風、1.4 度）となり、吹き返し最大風速 37.1m/s が 45.5m/s（南西風、232.7 度）となる。また通常気象台で公表されている 16 方位の風向を用いて変換すると、吹き返し風の最大風速は 50.7m/s となり、1 割以上過大に評価されてしまう。
- 3) 平坦な地形上の大気境界層は気流解析プログラムにより精度よく再現できる。また沖縄電力宮古支店の周辺地形及び地表面粗度を再現した気流解析により求められた台風 14 号の時の風向・風速の時間変化は観測記録とよく一致し、平均風速の誤差はバイアスが 0.38m/s、標準誤差が 0.19m/s である。
- 4) 台風 14 号が通過した際の狩俣及び七又における風車設置地点での最大風速は気象台で観測された最大風速 38.4m/s より 1.5 倍も高く、60m/s に達している。また 10 分間平均風速により推定された最大瞬間風速は狩俣及び七又サイトとも 90m/s に達していることが分かった。

付録

付表 1 には土地利用と粗度長との関係を示す。本研究ではこの表に従い、各種土地利用を粗度長に変換し、壁面せん断力の境界条件として数値解析に取り込んだ¹⁸⁾。

付表 1 土地利用と粗度長との関係

	土地利用区分	粗度長(m)
1	田	0.03
2	畑	0.1
3	果樹園	0.2
4	その他の樹木畑	0.1
5	森林	0.8
6	荒地	0.03
7	建物用地[A]	1.0
8	建物用地[B]	0.4
9	幹線交通用地	0.1
10	その他の用地	0.03
11	湖沼	0.0002
12	河川敷[A]	0.001
13	河川敷[B]	0.001
14	海浜	0.03
15	海水域	0.0002

謝辞

本研究に際し、宮古島地方気象台には貴重な観測データを提供して頂いた。また同気象台の棚原聡氏には観測データの取り扱いについて丁寧に指導して頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 平井滋登, 大橋治一, 楠原栄樹, 本多明弘: 多島海における風の特性について, 一来島海峡に関する実験的研究, 第12回風工学シンポジウム論文集, pp.25-30, 1992.
- 2) 楠原栄樹, 大橋治一: 多島海に建設される来島大橋に作用する気流特性について, 土木学会第47回年次学術講演会概要集, 1992.
- 3) 本田明弘, 深堀清二, 今金真一: 地形乱流中における斜張橋のガスト応答に関する研究, 第15回風工学シンポジウム論文集, pp.383-388, 1998.
- 4) 加藤真規子, 花房龍男, 久郷直樹: 複雑地形における乱流統計量の分布について(風洞実験), 第8回風工学シンポジウム論文集, pp.39-46, 1984.
- 5) 土谷学, 近藤宏二, 眞田早敏: 設計風速に及ぼす局所地形の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1999.
- 6) 眞田早敏, 近藤宏二, 土谷学: 2次元地形周りの風速のパワースペクトル特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1999.
- 7) Yamaguchi, A., Ishihara, T. and Fujino, Y.: Experimental study of the wind flow in a coastal region of Japan, J. Wind Eng. Indust. Aerodyn., Vol.91, pp.247-264, 2003.
- 8) 佐藤沢, 田村哲朗, 桑原邦郎: 鐘状丘陵周辺非定常流れのシミュレーション結果に対する定量的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.267-268, 1994.
- 9) 串岡清則, 斎藤通, 本田明弘: 複雑地形まわり流れへの流動解析の適用, 第13回風工学シンポジウム, pp.579-584, 1994.
- 10) 山口敏, 清水仁, 樫山和男: 地形風大規模解析のための並列有限要素解析システム, 第12回数値流体力学シンポジウム, pp.535-536, 1998.
- 11) Hewer, F. E.: Non-linear numerical model predictions of flow over an isolated hill of moderate slope, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 87, pp. 381-408, 1998.
- 12) Maurizi, A., Palma, J. M. L. M. and Castro, F. A.: Numerical simulation of the atmospheric flow in a mountainous region of the north of Portugal, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 74-76, pp. 219-228, 1998.
- 13) 中山昭彦, 岸修士郎: ラージ・エディター・シミュレーションによる実地形上気流の予測, 応用力学論文集, Vol.3, pp.737-744, 2000.
- 14) Lun, Y. F., Mochida, A., Murakami, S., Yoshino, H. and Shirasawa, T.: Numerical simulation of flow over topographic features by revised k-ε models, J. of Wind Engineering, No. 89, pp.205-208, 2001.
- 15) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三: 複雑地形における風況の測定と予測, 風力エネルギー, Vol. 26, No. 1, pp. 63-66, 2002.
- 16) 飯塚悟, 近藤裕昭: 各種 SGS モデルによる山岳地上流れの LES, 日本流体力学会年会 2002, pp. 338-339, 2002.
- 17) 内田孝紀, 大屋裕二: ネストグリッドを用いた複雑地形上の風況予測シミュレーション, 日本風工学会論文集, No. 92, pp. 135-144, 2002.
- 18) 石原孟, 日比一喜: 急峻な山を越える乱流場の数値予測, 日本風工学会論文集, No.83, pp.175-188, 2000.
- 19) 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.
- 20) 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/I-63, pp.195-221, 2003.
- 21) MASCOT Basic ユーザーズマニュアル, Ver. 1.0, 2004.
- 22) Ishizaki, H.: Wind Profiles, Turbulence Intensities and Gust Factors for Design in Typhoon-prone Regions, J. Wind Eng. And Ind. Aerodyn., vol.13, pp.55-66, 1983.

(2004年9月17日受付)