

(財) 東電記念科学技術研究所
研究助成成果報告書

(研究件名)

山岳地帯における社会基盤施設の耐風性能向上のための局地強
風予測システムの構築

Development of local wind prediction system for improvement of wind resistant
performance of the civil engineering structure in the mountainous region

(代表研究者)

東京大学助教授 石原 孟 Takeshi ISHIHARA

2004. 3

目次

| | |
|------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 非線形風況予測手法の開発 | 1 |
| 2.1 数値モデル | 1 |
| 2.2 複雑地形上の流れ場の予測 | 2 |
| 2.3 新しい境界処理手法の提案 | 3 |
| 3. 新しい台風シミュレーション方法の提案 | 5 |
| 3.1 台風データベースの構築 | 5 |
| 3.2 混合確率分布関数の提案 | 7 |
| 3.3 修正直交変換法の提案 | 7 |
| 4. 新しい強風予測システムの検証 | 9 |
| 4.1 竜飛ウインドパークにおける風速の予測 | 9 |
| 4.2 台風 21 号の強風特性の再現 | 10 |
| 5. まとめ | 12 |
| 参考文献 | 13 |
| 発表論文リスト | 14 |
| 解説 | 16 |

1. はじめに

日本は山国であり、送電線、橋梁、風力発電設備など、多くの社会基盤施設が山岳地帯に建設されている。社会基盤構造物は柔らかく細長いために、風に対して大変敏感である。また、近年構造物の大型化に伴い、台風による送電線鉄塔や大型風車などの倒壊事故が多く発生している^{1)~3)}。社会基盤構造物の耐風安全性を向上させるため、複雑地形における局地風の高精度予測と長い再現期間における設計風速の評価は重要である⁴⁾。本研究では複雑地形上の局地風に関する高精度予測モデルを提案すると共に、長い再現期間における設計風速の新しい評価手法を確立する。

第2章ではまず、流体力学の基礎方程式をベースとした非線形風況予測モデルを開発し、単純地形及び複雑地形を対象とした風洞実験の結果と比較することにより、その予測精度を明らかにする。そして、雑地形における新しい境界処理手法を提案し、計算領域の境界付近における流れ場の予測精度を向上される。

第3章では、過去40年間における気象台で得られた地上観測データと天気図の等圧線データを用い、台風の移動速度、移動方向、中心気圧の低下量、最大旋衡風速半径、年平均上陸数などの台風の性質を表す基本パラメータに関するデータベースを作成する。また台風シミュレーションに関しては任意地点に適応できる混合確率分布関数を提案すると共に、台風パラメータ間の相関関係と個々のパラメータの確率分布を同時に満たすことができる修正直交変換法を提案する。本研究で構築されたデータベースと新しい評価手法を用い、日本の5つの代表地点における年最大風速を評価し、観測データと比較することにより、その有効性を示す。

最後に、本研究で提案された予測システムの有用性は実測データを用いて検証する。まず1997

年の1年間における竜飛ウインドパークで得られた10分間平均風速データと比較することにより、複雑地形における局所風況の予測精度を明らかにする。そして、2002年10月1日に関東地方を直撃し、送電線鉄塔7基を倒壊させた台風21号を対象にして、本研究で構築された強風予測システムにより、茨城県水郷地区で得られた風向・風速記録を再現する。

2. 非線形風況予測手法の開発

構造物に作用する風力は風速の2~3乗に比例することから、小さな風速の予測誤差が大きな風力の予測誤差につながる。そのため社会基盤施設の計画段階においては施設の建設場所における正確な風況予測が大変重要である。しかし、現在複雑地形における局地風況を予測するために広く使われている風況予測モデルは Jackson & Hunt により提案された線形モデル (JH モデルと呼ぶ) に基づくものであり、わが国のような急峻な地形における複雑風況を精度よく予測することが困難である。過去の研究によると、JH モデルは山型地形に対して傾斜角15度を超えると50%以上の予測誤差が風下斜面で生じる。日本の山地の殆どは平均傾斜角が15度を超す急峻な山地であるため、流れの剥離を再現できる非線形モデルの開発が強く望まれる。

そこで、本研究では、剥離を伴う複雑地形上の大気乱流の高精度で予測可能な非線形モデルを開発し、任意傾斜勾配を有する急峻な地形における平均風速の高精度の予測精度を可能にする。

2.1 数値モデル

本研究で用いた基礎方程式は(1)-(4)式に示す。これらの式を数値的に解くことにより、3つの平均風速成分 u_i 、圧力 p 、乱流エネルギー k と消散率 ϵ が得られる。

$$\frac{\partial \rho_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] - \overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_j \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] - C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (4)$$

ここで、 ρ は空気密度、 μ は層流粘性係数、 μ_t は乱流粘性係数である。乱流モデルは標準 $k-\epsilon$ を用いた。

本研究で開発した非線形風況予測モデル MASCOT (Micro-climate Analysis System for Complex Terrain) は従来の線形モデルに比べ、以下の特徴を持っている^{5)~13)}。

1) 本モデルは一般座標系を採用し、任意傾斜角度をもつ地形を対応でき、また鉛直方向に不均衡間隔格子、水平方向にズームイン格子を採用することにより、必要な領域に格子を集中させることができる。

2) 離散化手法としては質量及び運動量の保存則を満足する有限体積法を用い、数値解法には安定性の高い半陰解法 SIMPLE 法を採用している。

3) 乱流モデルとしては標準 $k-\epsilon$ または修正 $k-\epsilon$ モデルを用いることにより、平均風速場のみならず、剥離を含む複雑流れ場の変動風速の標準偏差を精度よく予測することが可能である。

4) また複雑地形における局所風況を予測するため、新しい境界処理手法を開発し、境界処理が内部領域に与える影響を最小限にした。

5) 大規模線形連立方程式を高速かつ安定に解くための手法を提案し、100 万格子を用いた 10km 四方の風況予測は 1 台のコンピュータで 1 時間以内に解析することが可能である。

6) 本プログラムは標高 (50m 分解能) と地表面粗度 (100m 分解能) に関するデータベースを備えており、任意地点における緯度、経度を入力

すれば、風況解析が可能となる。

7) 更に対象領域内の 1 地点における風速・風向の時系列データ (観測または気象予測から) が得られていれば、年平均風速、平均風速の日変化や月変化、または平均風速のワイブル分布が得られる。

8) 本プログラムはグラフィック・ユーザー・インターフェイスと流れ場の可視化ツールが備えており、解析開始する前に、対象地点の標高、地表面粗度、また解析に使用される格子、観測地点や風車の位置を確認できる。更に解析結果は等値線、風速ベクトルなどの可視化ツールにより見ることも可能である。

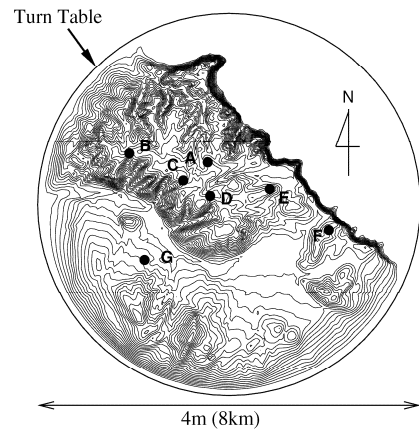


図 1 地形の等高線と測定点の配置

2.2 複雑地形上の流れ場の予測

非線形モデルの予測精度を検証するために、北海道積丹半島先端の一部を対象とした解析を行った。この場所は北海道代表的地形であり、縮尺 1/2000 の地形模型を用いた風洞実験も実施されている¹²⁾。図 1 に地形の等高線と測定点の配置を示す。この図から分かるように、測定点 B, C, D では S 風向から W 風向にかけて複雑に入り組んだ地形が広がり、谷に沿う風が大きく増速することが予測される。事実、風洞実験から、地上 40 m の高さでは 30% 以上の風速の増加が予測されている。ここでは、風洞実験で測定した代表的な地点における流れ場を解析した。

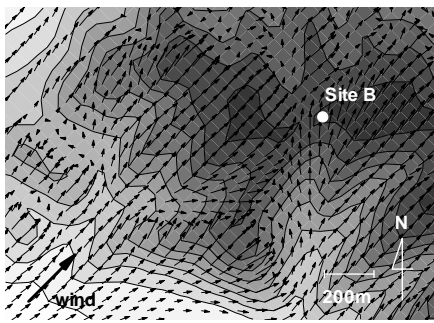


図 2 B 地点における地上 10m での風速分布

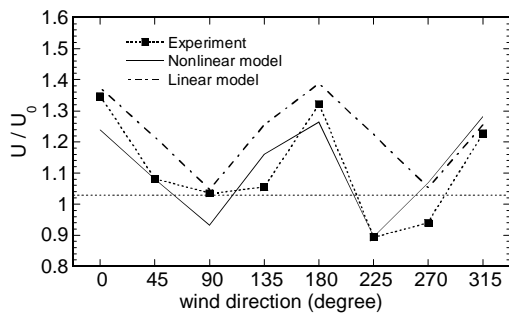


図 3 B 地点における風向別風速比

まず尾根の上に位置する B 地点について調べる。この地点の周りは複雑に入り組んだ谷があり、風向によって風速の変化が大きい。図 2 には B 地点付近における南西風向の地上 10m での風速ベクトルを示す。図中に地形の標高を記し、色の濃いところは高い標高を表す。B 地点の南には南南西向きの深い谷があり、風が南西から吹くときに、B 地点での地表面付近の風の風向は南向きに変化している。線形モデルによる予測では B 点付近の風向は地形がないときの風向とほとんど変わらず、このような風向の変化は全く見られない。

図 3 には B 地点での地上 40m における風向別風速比を示す。横軸は風向を表し、0 度は北風、180 度は南風に対応している。縦軸は風速比を表す。点線が実験値、実線は本研究で開発した非線形モデルによる予測結果、一点鎖線は線形モデルによる予測結果を示す。線形モデルは全体的に風速を過大に評価している。特に、風が南西(225 度)から吹いてくるときの過大評価が顕著である。一方、本研究で開発された非線形モデルによる予測結果は偏りがなく風洞実験の結果を再現している。

速が過大に評価されていることが分かる。

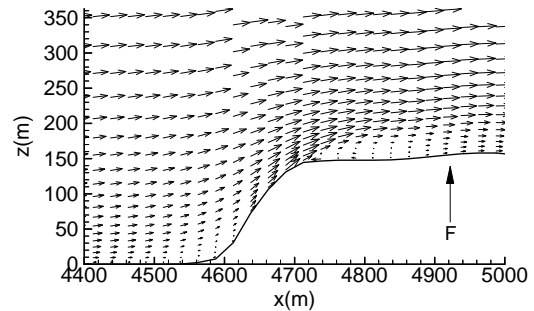


図 4 F 地点における垂直断面内の風速分布

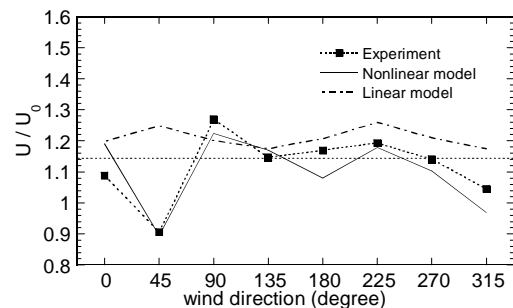


図 5 F 地点における風向別風速比

次に、線形モデルによる予測誤差が最も大きかった F 地点について調べる。図 4 には測定点 F 地点を通る鉛直断面内における風速ベクトルを示す。風が崖に直角となる北東方向から吹くときに急峻な崖の前縁から流れの剥離が起こる。このような剥離は線形モデルから全く予想されない。その結果、線形モデルによる平均風速値は風洞実験による結果より大きくなる。

図 5 には F 地点での風向別風速比を示す。B 地点と同様に線形モデルは全体的に風速を過大評価していることがわかる。特に流れの剥離が起こる北東風向では、実験値は大きな減速を示しているのに対し、線形モデルの値は他の風向とほぼ変わらない。これは線形モデルが流れの剥離を再現できないことによるものである。一方非線形モデルによる予測結果は風洞実験結果とよく一致している。

2.3 新しい境界処理手法の提案

単純地形と異なり、複雑地形上の流れを数値的に解析する場合には、連続と連なる実地形の一部を取り出して計算する必要がある。その際に、取り出した計算領域の境界をどのように処理するのか、また上流の地形の影響をどのように考慮するのが問題となる。

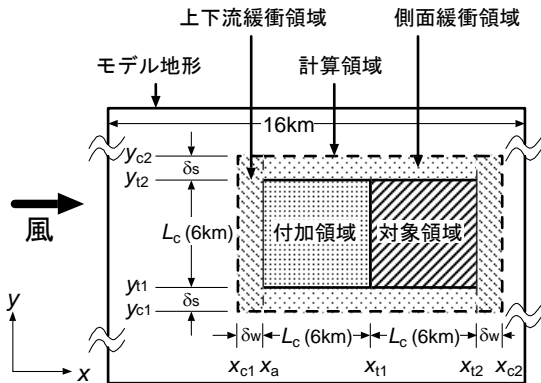


図6 解析の対象とする各領域の定義

図6には解析の対象とする各領域を示し、図中に斜線で示す正方形(一辺の長さ6km)が風況予測の対象領域、その上流に付加領域、さらにその周囲に緩衝領域がある。計算領域はこれら全ての領域を含む領域で、図に点線で示す。本研究では対象領域の中心に原点をとり、また各領域の大きさを表す記号を図6に併記した。

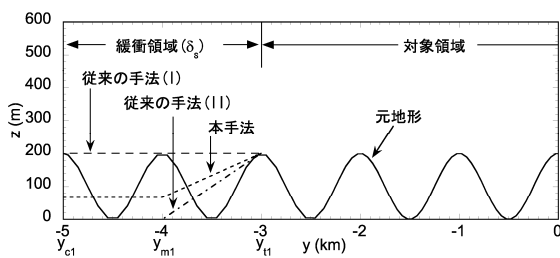


図7 各種の側面緩衝領域の比較

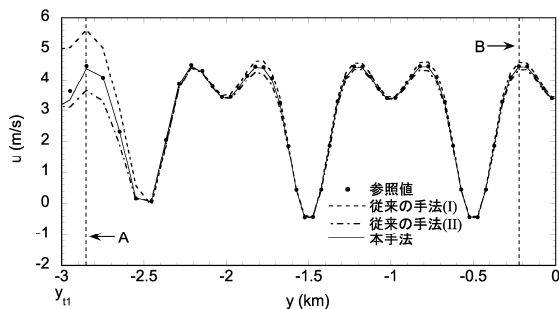


図8 高さ41mでの風速成分uの変化

図7には本研究では提案した境界処理手法と従来の研究で使われてきた境界処理手法との比較を示す。図中の実線がモデル地形、鎖線が従来の手法(I)による地形、一点鎖線が従来の手法(II)による地形を示す。また、本研究で提案する手法による地形を点線で示し、元地形と断面積が等しくなるように設定されている。

図8に、各境界処理手法を用いて求めた地表面から41mの高さにおける平均風速の風直角方向(y方向)の変化を示す。黒丸は参照値、鎖線は従来の手法(I)、一点鎖線は従来の手法(II)、実線は今回提案した境界処理手法により計算した平均風速を示す。境界処理手法によって、対象領域内の平均風速が大きく異なる。従来の手法(I)を用いたケースでは風速が参照値に比べ過大に評価されている。一方、従来の手法(II)を用いたケースでは風速が過小に評価されている。これは緩衝領域上の流量が過小または過大に評価されているためである。それに対し、今回提案した境界処理手法により計算した平均風速は参照値とほぼ同じ値を示す。この傾向は他の高さにおいても見られる。

図9にはA地点(図8)での平均風速の鉛直分布を示す。鉛直方向全域にわたって、上で述べたような傾向が見られ、また高さが高くなるにつれて、参照値との差が小さくなるものの、従来の手法による平均風速の過大または過小評価は200mの高さでも見られる。本研究で提案された手法により計算された平均風速は参照値との差が小さいことが分かる。

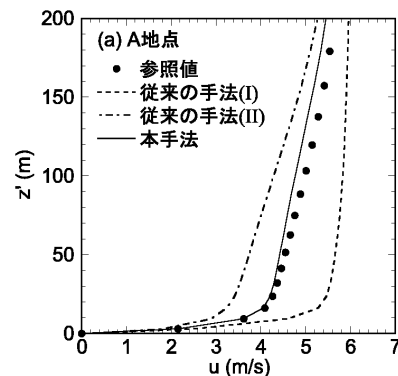


図9 A地点での平均風速の鉛直分布

3. 新しい台風シミュレーション方法の提案

近年構造物の大型化に伴い、構造物の耐風安全性の向上や耐風設計の合理化のために長い再現期間の設計風速が必要となる。現在日本における風観測は最長 70 年間しかないため、長い再現期間（例えば、1000 年）に対する年最大風速の算定は外挿になってしまう問題がある。この問題を解決するために、台風シミュレーションによる設計風速の評価手法が提案されてきた。

台風シミュレーションでは①まず過去の台風観測データにより、台風の年発生数 λ 、最接近距離 d_{min} 、進行方向 θ 、進行速度 C 、中心気圧低下量 ΔP 、最大旋衡風速半径 R_m の6つのパラメータの確率分布を求める。次に、②各パラメータの確率分布に従い、人工的に台風を発生させる。そして、③発生された台風の気圧場から上空風を求め、地表面の粗度や地形の効果を考慮して地上風に変換し、地上風の年最大風速を求める。最後に、④シミュレートした数千年～数万年間の年最大風速を大き順に並び、年最大風速の確率分布を求め、任意再現期間の風速を算出する。

台風時の上空風は、発生された台風の経路、移動速度、気圧場に依存するため、個々の台風パラメータの確率分布を正確に再現するだけでなく、台風パラメータ間の相関関係の再現も重要である。また台風パラメータの確率分布及び台風パラメータ間の相関関係を正確に求めるための精度の高い台風データベースも必要である。

そこで、本研究では、まず台風の性質を表す基本パラメータ（台風の移動方向、移動速度、中心気圧の低下量、最大旋衡風速半径、年平均上陸数など）に関する新しいデータベースを作成した。そして、台風シミュレーションに関しては任意地点に適応できる混合確率分布関数を提案すると共に、台風パラメータ間の相関関係と個々のパラメータの確率分布を同時に満たすことができる修正直交変換法を提案した。最後にこれらの新しい手

法を取り入れ、台風シミュレーションプログラム MOST (Monte-Carlo Simulation for Typhoon) を完成した。本研究では台風シミュレーション手法の再現精度を検証ために、最終的に台風パラメータにより算出される風速値を用いた比較検討を行った。

3.1 台風データベースの構築

台風気圧場同定の際には従来の気圧の地上観測データに加え、天気図の等圧線情報を利用することにより、気圧場同定の成功率は従来の 13%から 66%へ向上した。これにより、日本を含む東アジアをカバーできる台風データベース TDB (Typhoon Data Base) の作成を可能にした。

表1 台風に関する観測データ

| | 観測期間 (year) | 時間間隔 (hour) | 気圧精度 (hPa) |
|------------|------------------------|----------------|---------------|
| 台風経路データ | 1951-2000 | ≤6 | 5 |
| 気圧の地上観測データ | 1961-1990 1991-2000 | 3 1 | 0.1 |
| 天気図 | 1951-2000 | 12 | 5 |

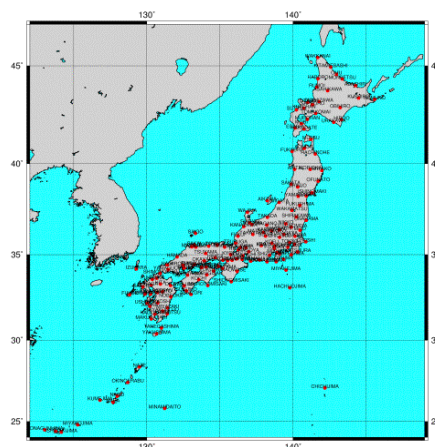


図10 気圧の地上観測地点

表1には今回の台風データベースの作成に使用した観測データの一覧を示す。3種類のデータの中には台風経路データと気圧の地上観測データは

気象庁によりデジタル化されたものを使用した。台風経路データの時間間隔は 1991 年以前には 6 時間、1991 年以降は台風が日本に近い場合に 3 時間となっている。また気圧の地上観測データは 1961–1990 年までは 3 時間、1991 年以後は 1 時間となっている。図 10 には気圧の地上観測地点を示す。一方、天気図はこれまでにデジタル化されたものがなく、本研究では 1951 年～2000 年までの 1297 個の台風を含む天気図 16364 枚を収集し、中心位置、等圧線データをデジタル化し使用した。

図 11 には天気図データを利用して気圧場を (5) 式により同定した一例を示す。中心気圧は台風経路データから得られるため、ここでは R_m と P_∞ を観測データから同定することとなる。

$$P(r) = P_c + D_p \times \exp\left(-\frac{R_m}{r}\right) \quad (5)$$

$$D_p = P_\infty - P_c$$

天気図データを使用しない場合には気圧の地上観測データ (赤四角) のみを使用するため、台風が日本に上陸するまでの気圧場を精度よく同定することが不可能である。一方、天気図データ (青丸) を加えると、台風中心付近のデータ数が増え、気圧場の同定が可能となった。

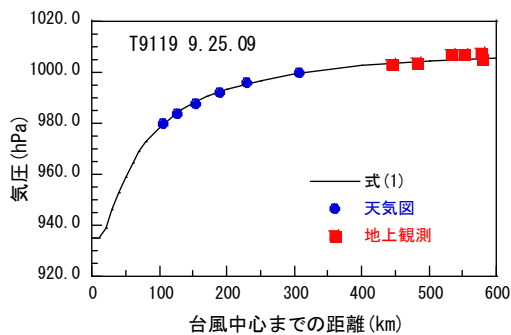


図 11 気圧場の同定

そして、本データベースにより作成した台風特性マップを示す。マップ化した範囲は北緯 23～45°，東経 123～147° とし、分解能は南北方向 40'，東西方向 1° とした。ただし、台風通過頻度の少ない北西部は非表示とした。

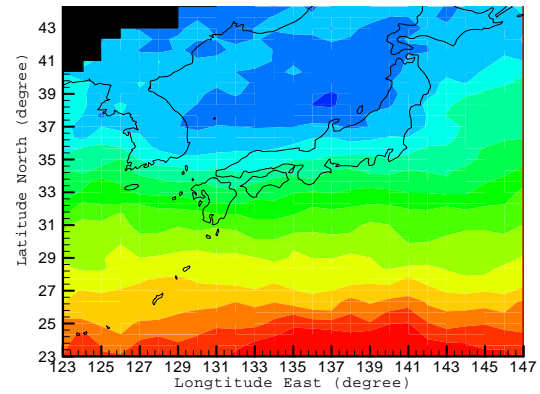


図 12 中心気圧低下量 D_p

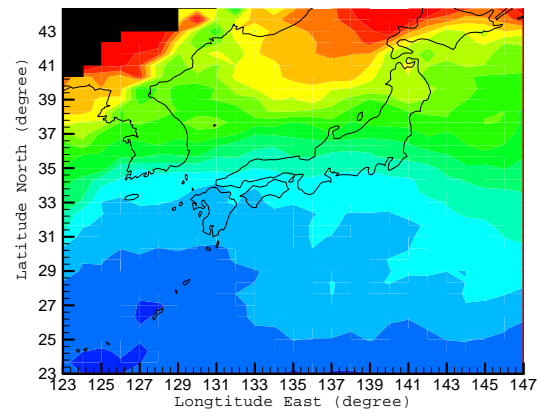


図 13 最大旋衡半径 R_m

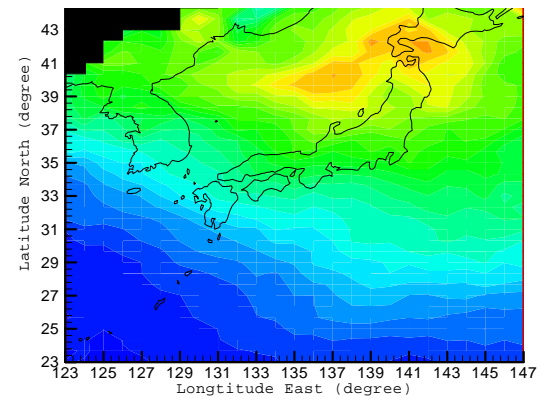


図 14 移動速度 C

図 12 と図 13 には中心気圧低下量と最大旋衡風速半径の分布を示す。中心気圧低下量は北へ行くほど値が小さくなり、一方、最大旋衡風速半径は北ほど値が大きくなる。つまり台風が北へ行くほど弱くなり、規模が大きくなっている。また中心気圧低下量の減少は太平洋側より、日本海側の方が大きいことが分かる。図 14 には台風の移動速度を示す。北東ほど、移動速度の値が大きくなり、

台風が加速していることが分かる。台風の加速は太平洋側よりも日本海側の方が顕著である。

3.2 混合確率分布関数の提案

従来日本で行われてきた台風シミュレーションでは年発生数 λ はポアソン分布、最接近距離 d_{\min} は一様分布、進行方向 θ は正規分布、進行速度 C 、中心気圧低下量 ΔP 、最大風速半径 R_m は対数正規分布が使用されてきた。中心気圧低下量の確率分布の近似式としては日本では対数正規分布が用いられているのに対して、アメリカではワイブル分布が推奨されている。

そこで、本研究では対数正規分布とワイブル分布との組み合わせによる混合確率分布関数 MPDF (Mixed Probabilistic Distribution Function) を提案する。この確率分布は次式により表させる。

$$MPDF = a \times \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln x}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln x}}{\sigma_{\ln x}}\right)^2\right] + (1-a) \times \frac{k}{C} \left(\frac{x}{C}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{C}\right)^k\right) \quad (6)$$

ここで、 a は混合パラメータであり、0はワイブル分布、1は対数正規分布を表す。このパラメータは最小二乗法により求められる。

この混合確率分布を千葉と那覇气象台に適用すると、千葉では $a=1$ 、すなわち、対数正規分布となり、一方、那覇では $a=0.2$ 、ワイブル分布に近い分布となった。これは千葉と那覇における強い台風の襲来頻度の違いによるものである。千葉では強い台風がまれにしか来ないのに対して、那覇では強い台風がよく襲来する。このように気候的に異なる地域に対して、単一の確率分布により精度のよい近似が困難であり、普遍性的な確率分布の提案が必要であることが分かる。

図15には日本全国をカバーする5地点(那覇、宮崎、大阪、千葉、仙台)に混合確率分布関数を適用し得られた混合パラメータの値を示す。南から北に行くにしたがって、混合パラメータ a の値

は約0.2から単調に増加し、北緯34度を超えると1に漸近する。すなわち、気圧低下量 ΔP の分布はワイブル分布から対数正規分布に移行していることが分かる。これは強い台風の襲来頻度が南から北へ行くに従って減少していくことに対応している。混合確率分布は中心気圧低下量のみならず、最大旋衡風速半径と移動速度 C にも適用でき、よい近似精度が得られている。特に移動速度における混合パラメータは中心気圧低下量と反対な傾向を示し、南から北へ行くに従って、混合パラメータが減少することがわかる。これは台風の移動速度が北へ行くにしたがって速くなっていることに対応している。

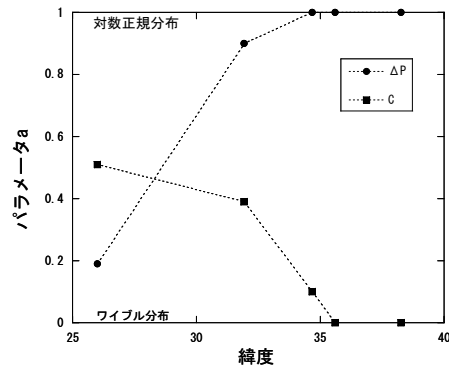


図15 混合パラメータ a の緯度による変化

新しく提案した混合確率分布の効果性を確認するために、台風パラメータの観測値より算定された上空風の年最大風速と観測値を近似した確率分布に従い発生した台風パラメータにより求められた上空風の年最大風速と比較した。その結果、従来の手法による長い再現期間の年最大風速の過大評価は本研究で提案した混合確率分布により大きく改善された。なお、千葉においては移動速度の確率分布における混合確率分布の適用が年最大風速の再現期待値に最も大きな影響を与えた。

3.3 修正直交変換法の提案

千葉气象台を中心とし、半径500km以内に通過した台風のパラメータ間の相関係数を求めると、パラメータによって0.3を超える相関係数が見ら

れる。例えば、 ΔP と d_{\min} との間に正の相関が見られた。これは千葉気象台に対して右側に通過する台風が強いことを示し、太平洋側に通過した台風と比べると、上陸側に通過した台風の方が上陸に伴い減衰していることに対応している。このような相関を無視すると陸側を通過した台風の強さが過大に評価され、年最大風速の過大評価につながる。従って、モンテカルロシミュレーションにより台風を作り出す時、台風パラメータの確率分布を正しく再現するだけでなく、パラメータ間の相関関係も忠実に再現する必要がある。

従来から台風パラメータ間の相関を考慮する手法は提案されてきた。例えば、Vickery は気圧低下量と移動速度は緯度 φ の関数、最大旋衡風速半径は気圧低下量の関数として表している。Vickery らの手法には幾つかの問題がある。この手法によりシミュレートされた R_m の確率分布は目標とした確率分布と一致しない。これは相関を考慮するために R_m の平均値を変化させたことによるものである。つまり、Vickery 手法は台風パラメータの確率分布と相関が同時に再現していないことがわかる。またこの手法では、二つの台風パラメータ間の相関しか再現できないという制約もある。

本研究では、台風パラメータ間の相関関係と確率分布を同時に満足するために、修正直交変換法 MOD(Modified Orthogonal Decomposition)を提案する。この手法は以下の三つのステップからなる。

1) 独立パラメータへの直交変換

台風を記述するパラメータとしては気圧低下量 ΔP 、最大旋衡風速半径 R_m 、進行速度 C 、進行方向 θ 、最接近距離 d_{\min} がある。これらの台風パラメータから構成されるベクトルは次式により表す。

$$\{x_i\}^T = \{\ln(\Delta P), \ln(R_m), \ln(C), \theta, d_{\min}\} \quad (7)$$

台風パラメータ間の相関行列を S とし、固有値 λ_k と固有ベクトル ϕ_k の関係は以下ようになる。

$$[S - \lambda_k E]\{\phi\}_k = 0 \quad (8)$$

相関をもつ台風パラメータの観測データ x_i から無相関の独立パラメータ z_i に式(6)のように変換することができる。

$$\{z_i\} = [\phi]\{x_i\} \quad (9)$$

このように得られた独立パラメータ z_i は正規分布と一様分布からなる混合確率分布関数により近似する。

2) 相関の持つ台風パラメータへの逆変換

次に、推定された確率分布に従って、所定年数分の台風に関する独立パラメータ z_i' を発生し、固有ベクトルの逆行列をかけて相関を持つ台風パラメータに逆変換する。

$$\{x_i\} = [\phi]^{-1}\{z_i\} \quad (10)$$

このように再現した台風パラメータから求められた相関係数は観測データから直接に求められた相関係数と良く一致していることがわかる。ただし、このように発生した台風パラメータの確率分布は目標とした確率分布と完全に一致していない。

3) 目標とした確率分布への修正

この問題を解決するために、逆変換された台風パラメータに微小修正を加えることにした。逆変換された台風パラメータと目標とした確率モデルにより発生した値を同時に昇順で並べ、逆変換された台風パラメータは目標とする確率モデルにより発生した値に合うように修正する。この補正は相関関係を考慮して決定されたパラメータの組みに対し、微小修正を加えるだけなので、パラメータ間の相関係数にはほとんど影響を与えないことが分かる。

最後に台風パラメータの観測値を用いて本手法の有効性を検証した。図 16 には千葉気象台における再現期間と上空風の関係を示す。従来の手法に比べ、本研究に提案した手法により求められた年最大風速は観測データをよく再現していることが分かる。また図 17 に示すように本手法による

求めた那覇、宮崎、大阪、千葉、仙台での上空風の年最大風速の50年再現期待値は北へ行くにつれ単調に減少する結果を得た。この結果は台風が北上するにつれ、弱くなっていくことに対応している。それに対して、台風パラメータの確率分布並びにパラメータ間の相関関係を同時に再現していない従来の手法により求められた年最大風速の50年再現期待値は、北緯34度を越えると、再び大きくなるような不自然の結果となった。

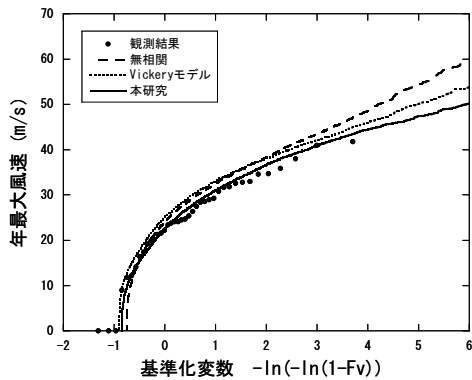


図16 千葉における上空風の年最大風速

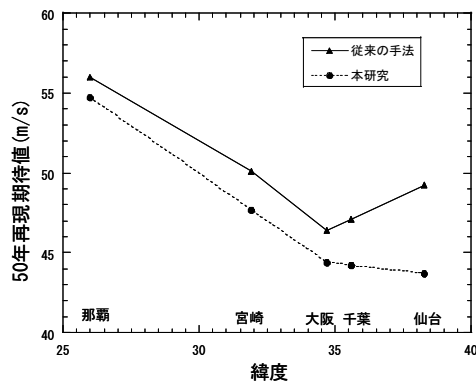


図17 年最大風速の50年再現期待値

4. 新しい強風予測システムの検証

4.1 竜飛ウインドパーにおける風速の予測

まず青森県の竜飛岬を対象とした解析例を紹介する。竜飛岬には東北電力(株)の集合型風力発電基地があり、11台の風車が設置されている。図18には竜飛ウインドパーク内の風車の配置を示す。風車1~10号機のナセルの上に風車型風向風速計が設置されており、風速・風向の10分平均値が観測されている。この例ではウインドパー

クから1km離れた灯台で得られた風向・風速データを参照観測データとして用いた。

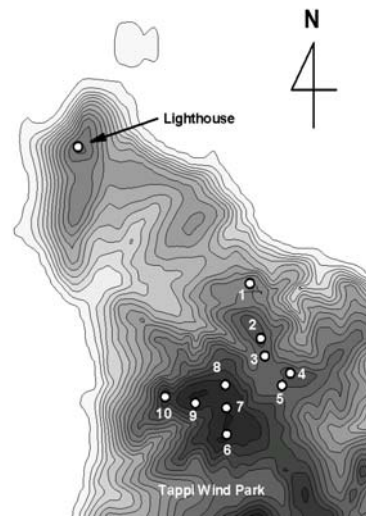


図18 竜飛ウインドパーク内の風車の配置

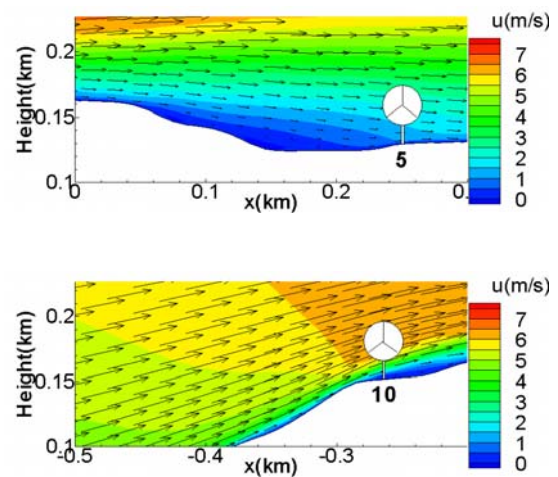


図19 E-W断面内の平均風速ベクトル(上:5号機 下:10号機)

複雑地形が平均風速場に与える影響を調べるために、5号機と10号機の位置におけるE-W断面内の平均風速ベクトルを図19に示す。5号機は山頂の窪んだ地点に位置しているため、風車高さでの風速が大きく減少している。一方10号機は上り斜面の増速場所に位置しているため、風車高さにおける平均風速が大きくなっている。

図20には年平均風速の予測結果を示す。図中の黒四角は局地風モデルによる予測結果、黒三角

は従来の線形モデルの予測結果を表す。局地風モデルによる予測値が観測値とよく一致しているのに対して、線形モデル WAsP は 2~5 号機の年平均風速を過大に評価している。2~5 号機では山頂のやや低い場所に位置するため、主風向 W に対して上流側の地形の影響を受け、風速が減少している。従来の線形モデルではこのような風速の減少を再現できない。10 機平均では線形モデル WAsP の予測誤差が 14.2%であるのに対して、非線形モデルである MASCOT は 4.9%となる。非線形モデルによる予測精度は格段に向上していることが分かる。

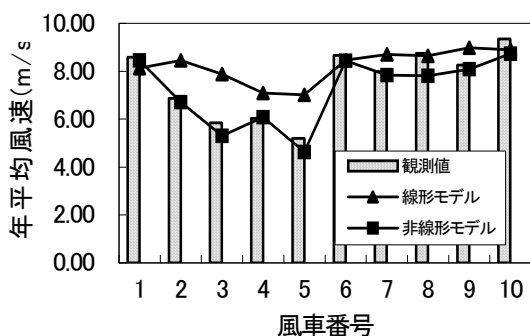


図 20 年平均風速の予測値と観測値との比較

4.2 台風 21 号の強風特性の再現

最後に、2003 年 10 月 1 日に関東に上陸した台風 21 号を対象に台風シミュレーションを行い、台風 21 号による送電鉄塔被害が発生した水郷地区の強風特性並びに鉄塔倒壊現場周辺の強風分布を明らかにすると共に、現地観測から得られた強風データと比較することにより、台風接近時の本システムの予測精度を明らかにする。

図 21 には台風経路図を示し、図中の数字は日時と台風の中心気圧を表す。送電鉄塔が倒壊した 10 月 1 日夜 9 時 27 分ごろには台風 21 号の中心は災害発生地点の左側に位置し、その約 10 分前に災害発生地点に最も接近していることが分かる。

台風 21 号が関東地方に上陸した台風として戦

後最大級であり、しかも移動速度（関東地方では時速 60~75km）が非常に速かった。また今回の災害発生地点は台風進路の右側に位置し(図 21)、速い移動速度が上乘せされ、倒壊した鉄塔付近の風は非常に強かったと思われる。

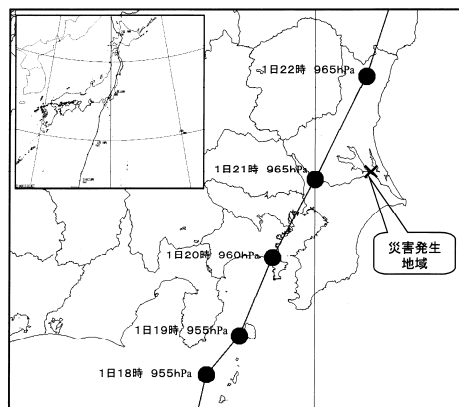


図 21 台風経路図

国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦工事事務所の風観測データを調査した結果、鉄塔が倒壊したと見られる 9 時 27 分前後では現場付近の風が最も強かったことが分かった。例えば、北浦釜谷沖観測所(以下、地点は図 22 を参照)では 9 時 20 分に 10 分間の平均風速 29.5m/s (南南東風向)、霞ヶ浦湖心観測所では 9 時 40 分に 10 分間の平均風速 28.5m/s (南南西風向) を観測している (いずれも高さ約 10m での測定)。また香取線 19 号鉄塔の隣にある鹿島線鉄塔上(鰯川)に設置された東京電力の風速計 (高さ約 70m) では 9 時 20 分までの 10 分間に最大瞬間風速 56.7m/s (南南東風向) を観測した。

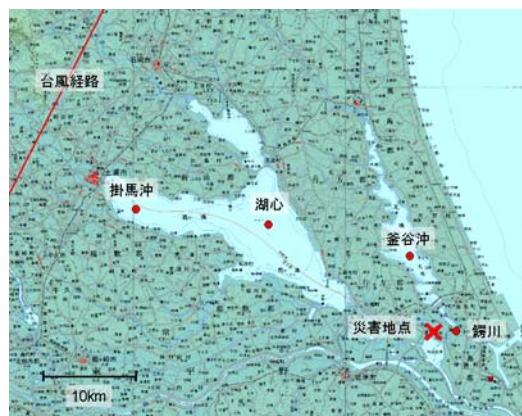


図 22 観測点の位置

台風 21 号接近時の強風特性を詳しく調べるために、前節に述べた台風モデルにより地上風を求めた。台風シミュレーションに必要なパラメータ（台風の中心位置、中心気圧、移動速度、最大旋衡風速半径、中心気圧差）は気象官署で観測された気圧データから非線形最小二乗法により同定した。また各観測地点における風向別粗度は国土数値情報の 100m メッシュ土地利用データを粗度長に変換し求めた。その際には観測地点を中心に半径 8km までの上流側の地表面粗度を考慮した。図 23 にはシミュレーションの例を示す。図中のプロットは観測値、実線はシミュレーション結果を表す。

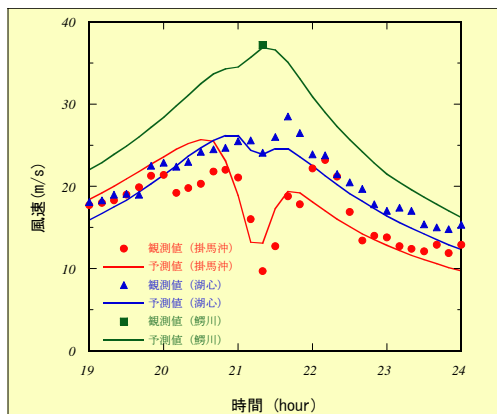


図 23 シミュレーションの例

まず台風の経路に近い掛馬沖観測点では台風の接近に伴い風速が増大し、21 時を過ぎた時点で一度小さくなり、その後再び増大している。台風シミュレーションはこの傾向を捕らえている。一方、湖心観測点では台風の経路からすこし離れているため、台風の接近に伴う風速の急な減少はほとんど見られず、シミュレーションの結果も観測値とよく一致している。また災害発生地点に最も近い鰐川観測点では鉄塔倒壊時刻の前後に風速が最大となり、10 分平均風速は 37m/s を超えている。台風シミュレーションの結果はここでも観測値とよく一致している。鉄塔が倒壊した時刻と見られる 9 時 27 分前後では現場付近の風が最も強かったことが分かる。

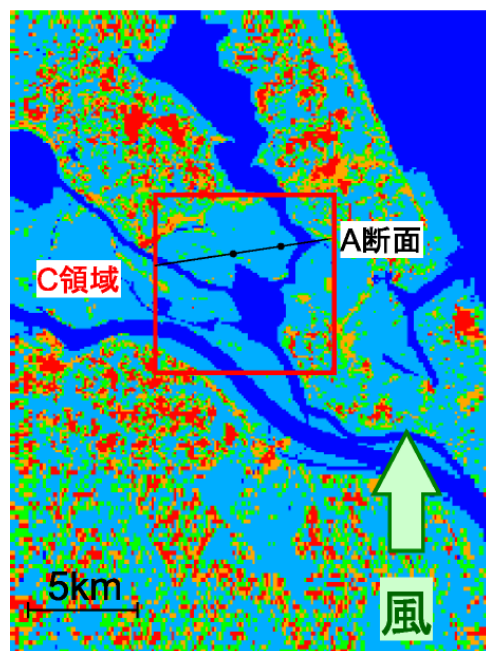


図 24 解析領域内の地表面粗度

次に、鉄塔倒壊現場周辺の強風分布を求めるため、初年度に開発した風況予測モデルを用いた。予測災害発生地点を含む現場周辺の地表面粗度を求めるために、国土数値情報の 100m メッシュ土地利用データを用い、土地利用から地表面粗度への変換を行った。また標高は国土地理院の 50m メッシュの数値標高データを用いた。解析の対象領域は鉄塔倒壊地点を中心に 20km 四方の範囲とした。水平方向の格子は 100m とし、鉛直方向は地表面に最も近い格子の高さを 5m とし、それより上は 1.1 倍の拡大率をもつ不等間隔格子とした。

図 24 には鉄塔倒壊現場周辺の地表面粗度を示す。図中の青い部分は地表面粗度の小さい水面や水田、赤い部分は地表面粗度の大きい都市域や森林を表している。図中の黒丸は倒壊した香取線 6 基の鉄塔の両端にある 20 号鉄塔と 25 号鉄塔を示す。この図から分かるように、鉄塔倒壊地点の南側には湖があり、更なる風上側には利根川がある。周辺地域に比べ、災害発生地点での風上、風下ともに粗度は小さく、その影響で風が増速した可能性がある。

災害発生地点での風速分布を詳しく見るために、

倒壊した鉄塔を含む断面内 (図 24 の中の A 断面) の風速分布を図 25 に示した. 図中の風速は上空風により無次元化されており, 色が赤い程風速が高い. 周辺地域に比べ, 鉄塔倒壊地点での風は, 風上側に湖が存在することによって, 1 割程度強くなっていることが分かる.

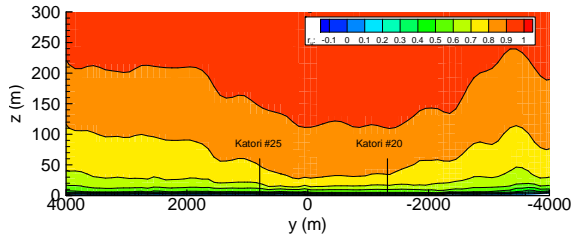


図 25 A 断面内の平均風速の分布

鉄塔倒壊地点付近での増速の様子を面的に見るために, 地上高さ 70m の面内における平均風速分布を求め, 図 26 に示した. 領域は図 24 の赤線の正方形で示した C 領域に対応している. 平均風速の変化は風方向には小さく, 風直角方向に大きいことが分かる. 図 24 から分かるように, 災害発生日点の風上側には湖のほか, 河川や水田など地表面粗度の小さい領域が広がっている. その結果, 周辺地域に比べ, 災害発生日点での風速が高くなり, 風の通り道が形成されていると考えられる.

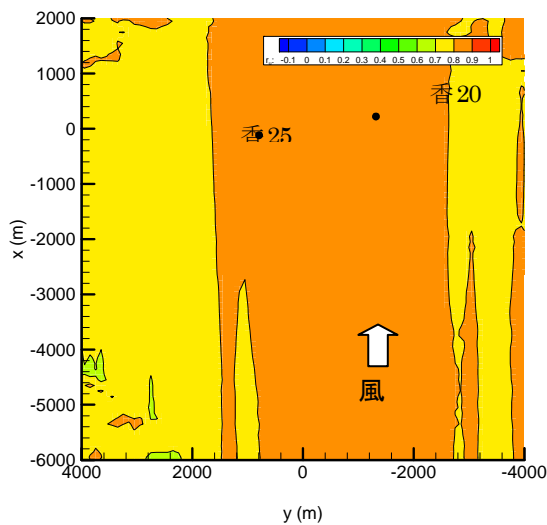


図 26 地上高さ 70m での平均風速の分布

5. まとめ

本研究から以下の結論が得られた.

- 1) 本研究では流体力学の基礎方程式をベースとした非線形風況予測モデルを開発し, 従来の線形モデルに比べ, 風洞実験の結果と良い一致を示した. 線形モデルは傾斜角度が 10 度を越えると, 風速を過大に評価する傾向がある. これは線形モデルが流れの剥離を再現できないことによるものである.
- 2) 複雑地形上の流れ場における剥離及び風向の急変は, 非線形モデルにより再現されるが, 線形モデルでは再現することができない.
- 3) 本研究では複雑地形における新しい境界処理手法を提案し, 従来の手法に比べ, 計算領域の境界付近における流れ場の予測精度を大幅に向上させた.
- 4) 過去 40 年間における气象台で得られた地上観測データと天気図の等圧線データを用い, 台風の移動速度, 移動方向, 中心気圧の低下量, 最大旋衡風速半径, 年平均上陸数などの台風の性質を表す基本パラメータに関するデータベースを作成した.
- 5) 台風パラメータに関して任意地点に適応できる混合確率分布関数を提案すると共に, 台風パラメータ間の相関関係と個々のパラメータの確率分布を同時に満たすことができる修正直交変換法を提案した.
- 6) 本研究で構築されたデータベースと手法により求められた日本の 5 つの代表地点における年最大風速は観測データとよく一致した. それに対して, 従来の手法では長い再現期間における年最大風速が過大に評価されることが分かった.
- 7) 本研究で提案された予測システムの有用性と

精度を検証するため、1997年の1年間における竜飛ウインドパークで得られた10分間平均風速データと比較した。非線形モデルにより予測された年平均風速は竜飛ウインドパーク内の10の観測地点においてよい一致した結果が得られ、10地点における予測誤差の平均値は4.9%である。それに対して、線形モデルによる予測誤差は14.2%である。

- 8) 2002年10月1日に関東地方を直撃し、送電線鉄塔7基を倒壊させた台風21号の時の強風

を調べた。本研究で構築された強風予測システムは茨城県水郷地区で得られた風向・風速記録をよく再現し、送電線鉄塔倒壊地点周辺の風速分布を明らかにした。

謝辞

本研究課題に対する（財）東電記念科学技術研究所の研究助成に対して深謝の意を表す。

参考文献

- [1] 日本風工学会風災害研究会：強風災害の変遷と教訓，2000.
- [2] 石原孟，山口敦，由田秀俊，藤野陽三：台風 0221 による送電鉄塔の被害と水郷地区の強風分布特性，日本風工学会誌，93 号，pp.23-34，2002.
- [3] 石原孟，山口敦，藤野陽三：2003 年台風 14 号による風力発電設備の被害とシミュレーションによる強風の推定，土木学会誌，Vol.88，pp.45-48，Dec.，2003.
- [4] 石原孟：風の予測，橋梁と基礎，Vol.36，No. 8，pp. 151-153，2002.
- [5] T. Ishihara, Y. Fujino, K. Hibi : A wind tunnel study of separated flow over a two-dimensional ridge and a circular hill, J. of Wind Engineering, No.89, pp573-576, 2001.
- [6] T. Ishihara : Measurements and predictions of local wind field in complex terrain, J. of Wind Engineering, No.89, pp.245-248, 2001.
- [7] A. Yamaguchi, T. Ishihara, Y. Fujino : Experimental and numerical study of the wind flow in a coastal region of north of Japan, J. of Wind Engineering, No.89, pp.209-212, 2001.
- [8] 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，日本流体力学会年会 2001 講演論文集，pp.603-604，2001.
- [9] T. Ishihara, K. Hibi : Numerical study of turbulent wake flow behind a three-dimensional steep hill, Wind and Structures, Vol.5, No.2-4, pp.317-328, 2002.
- [10] T. Ishihara, A. Yamaguchi and Y. Fujino : A Nonlinear model for predictions of turbulent flow over steep terrain, Proc. of The World Wind Energy Conference and Exhibition, VB3.4, pp.1-4, 2002.
- [11] 山口敦，石原孟，藤野陽三：地形風の数値予測のための領域設定と境界処理，第 17 回風工学シンポジウム論文集，pp.143-148，2002.
- [12] A.Yamaguchi, T. Ishihara, Y. Fujino : Experimental study of the wind flow in a coastal region of Japan, J. of Wind Eng. Indus. Aerodyn., Vol.91, pp.247-264, 2003.
- [13] 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.
- [14] 石原孟，由田秀俊，久保悠也，藤野陽三：設計基本風速の新しい評価手法の提案と測器補正，第 17 回風工学シンポジウム論文集，pp. 7-12，2002.
- [15] 石原孟，日比一喜，加藤央之，大竹和夫，松井正宏：日本各地の年最大風速データベースの構築と測器の補正，日本風工学会誌，No. 92，pp. 5-54，2002.
- [16] M. Matsui, T. Ishihara and K. Hibi: Directional characteristics of probability distribution of extreme wind speeds by means of typhoon simulation, J. of Wind Engineering, No.89, pp.349-352, 2001.
- [17] 石原孟，ホタイホーム，チョンチャーリョン，藤野陽三：台風シミュレーションのための混合確率分布関数と修正直交変換法の提案，第 18 回風工学シンポジウム論文集，2004.
- [18] 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.

発表論文リスト

本研究に関連した発表論文は以下のとおりです。

| 題 目 | 発表者名 | 論文誌・学協会誌・講演集 などの名称・巻号など |
|--|--|--|
| 複雑地形における風況の 測定と予測 | 石原孟 山口敦 藤野陽三 | 日本流体力学会年会 2001 講演論文 集, pp.603-604, 2001 |
| A wind tunnel study of separated flow over a two-dimensional ridge and a circular hill | T. Ishihara Y. Fujino K. Hibi | J. of Wind Engineering, No.89 pp.573-576, 2001 |
| Experimental and numerical study of the wind flow in a coastal region of north of Japan, | A. Yamaguchi T. Ishihara Y. Fujino | J. of Wind Engineering, No.89 pp.209-212, 2001. |
| Directional characteristics of probability distribution of extreme wind speeds by means of typhoon simulation | M. Matsui T. Ishihara K. Hibi | J. of Wind Engineering, No.89 pp.349-352, 2001. |
| 非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその応 用 | 石原孟 山口敦 藤野陽三 日比一喜 | 風力エネルギー, Vol.26, No.4, pp.2-6, 2002. |
| Numerical study of turbulent wake flow behind a three dimensional steep hill | T. Ishihara K. Hibi | J. of Wind and Structures, Vol.5, No.2-4, pp.317-328, 2002. |

| 題 目 | 発表者名 | 論文誌・学協会誌・講演集 などの名称・巻号など |
|--|--|---|
| 地形風の数值予測のための 領域設定と境界処理 | 山口敦 石原孟 藤野陽三 | 第 17 回風工学シンポジウム論文集, pp.143-148, 2002 |
| 台風 0221 による送電鉄塔 の被害と水郷地区の強風 分布特性 | 石原孟 山口敦 由田秀俊 藤野陽三 | 日本風工学会誌, 93 号, pp.23-34, 2002 |
| A Nonlinear model for predictions of turbulent flow over steep terrain | T. Ishihara A. Yamaguchi Y. Fujino | Proc. of The World Wind Energy Conference and Exhibition, VB3.4 , pp.1-4, 2002. |
| 設計基本風速の新しい評 価手法の提案と測器補正 | 石原孟 由田秀俊 久保悠也 藤野陽三 | 第 17 回風工学シンポジウム論文集, pp.7-12, 2002. |
| 日本各地の年最大風速デ ータベースの構築と測器 の補正 | 石原孟 日比一喜 加藤央之 大竹和夫 松井正宏 | 日本風工学会誌, No.92, pp. 5-54, 2002. |
| A nonlinear model MASCOT : development and application, | T. Ishihara A. Yamaguchi Y. Fujino | Proc. of 2003 European Energy Conference and Exhibition, T1.8, pp1-7, 2003. |

| 題 目 | 発表者名 | 論文誌・学協会誌・講演集 などの名称・巻号など |
|--|-----------------------------|--|
| 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 | 石原孟 山口敦 藤野陽三 | 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.195-221, 2003. |
| 非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化 | 石原孟 | 日本流体力学会誌, 第 22 巻, 第 2 号, pp.387-396, 2003. |
| 2003 年台風 14 号による風力発電設備の被害とシミュレーションによる強風の推定 | 石原孟 山口敦 藤野陽三 | 土木学会誌, Vol.88, pp.45-48, Dec., 2003. |
| 新しい風況精査手法の提案と実測による検証 | 石原孟 山口敦 藤野陽三 鵜野伊津志 | 風力エネルギー, Vol.27, No.4, pp.4-7, 2003. |
| 台風における新しい確率モデルの提案 その 1 ミックスモデルの提案 | 石原孟 ホタイホーム 藤野陽三 | 第 59 回土木学会年次学術講演会論文集, 2004. |
| 台風における新しい確率モデルの提案 その 2 修正直交変換法の提案 | ホタイホーム 石原孟 藤野陽三 | 第 59 回土木学会年次学術講演会論文集, 2004. |

解 説

社会基盤施設に及ぼす強風の影響は施設設計と運用面から重要な問題となっている。特に台風時の強風は送電線鉄塔や橋などの社会基盤施設の安全性に大きな影響を及ぼす。21世紀は高度情報化社会と言われており、利便性・効率性・集積性が高まると同時に、台風災害に対する脆弱性も増している。例え短時間であっても、社会基盤施設の機能停止はその地域にとどまらず、社会全体に甚大な波及的影響をもたらす。

社会基盤構造物は柔らかく細長いため、風に対して大変敏感である。近年構造物の大型化に伴い、台風による送電線鉄塔や大型風車などの倒壊事故が多く発生している。これに加えて、日本は山国であり、送電線、橋梁、風力発電設備など、多くの社会基盤施設が山岳地帯に建設されている。山岳地帯における台風時の風速・風向を正確に予測できれば、社会基盤施設の信頼度向上に繋がる。本研究では複雑地形上の局地風に関する高精度予測モデルを提案すると共に、施設設置地点の気候及び地理的条件を考慮できる新しい台風シミュレーション手法を確立し、山岳地帯における社会基盤施設の耐風性能向上のための局地強風予測システムを実現した。

構造物に作用する風力は風速の2～3乗に比例することから、小さな風速の予測誤差が大きな風力の予測誤差につながる。そのため社会基盤施設の計画段階においては施設の建設場所における正確な風況予測が大変重要である。しかし、現在複雑地形における局地風況を予測するために広く使われている風況予測モデルは Jackson & Hunt により提案された線形モデルに基づくものであり、わが国のような急峻な地形における複雑風況を精度よく予測することが困難である。過去の研究によると、JHモデルは山型地形に対して傾斜角15度を超えると50%以上の予測誤差が風下斜面で生じる。日本の山地の殆どは平均傾斜角が15度を超す急峻な山地であるため、流れの剥離を再現できる非線形モデルの開発が強く望まれる。

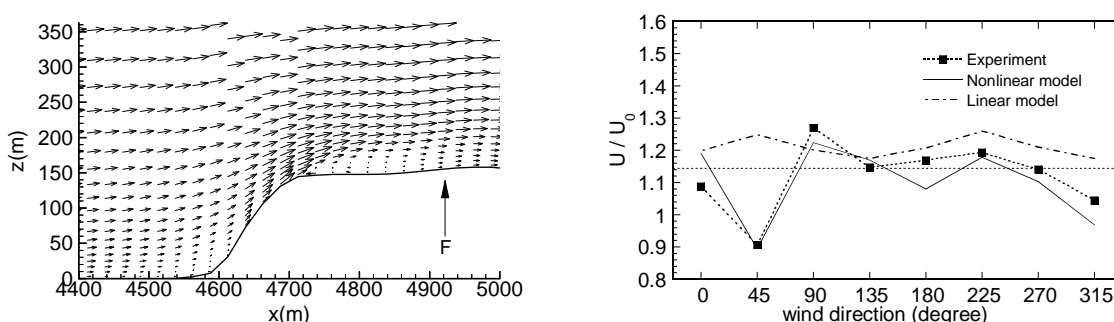


図1 海岸付近の崖地形における垂直断面内の風速分布と風向別風速比

本研究は流体力学の基礎方程式をベースとした非線形風況予測モデル MASCOT を開発し、急峻な山地における複雑な局所風況を予測することを可能にし、従来線形モデルに比べ、その予測精度を格段に向上させた。また、山岳地帯の気流解析における特有な問題、すなわち、解析領域並びに境界条件の設定方法を新たに提案し、体積保存則を満足する新しい境界処理手法を実現し、計算対象領域の内における流れ場の予測精度を向上させた。図1は海岸付近

の崖地形における垂直断面内の風速分布と風向別風速比を示す。風が崖に直角となる北東方向から吹くときに急峻な崖の前縁から流れの剥離が起こる。このような剥離は線形モデルから全く予想されず、結果的に線形モデルによる平均風速の予測値は過大に評価されてしまう。このことは風向別風速比の予測結果からもみることができる。特に流れの剥離が起こる北東風向（45度風向）では非線形モデルは大きな減速を示しているのに対し、線形モデルはこのような風速減少を全く再現することができない。

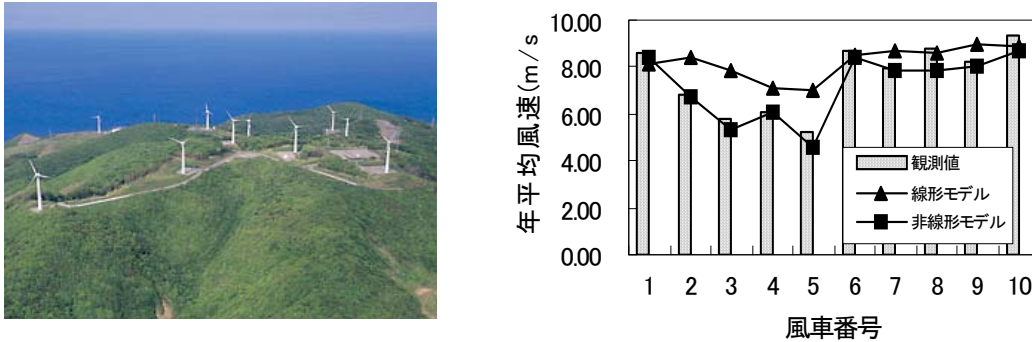


図 2 竜飛ウインドパークと各風車の年平均風速

非線形モデルによる予測精度の向上は実際の複雑な地形上に建設された竜飛ウインドパークにおいても実証された。図 2 には竜飛ウインドパークの航空写真と各風車の年平均風速の予測値と観測値との比較結果を示す。風車 1～10 号機のナセルの上に風車型風向風速計が設置されており、風速・風向の 10 分平均値が観測されている。この観測から分かるように風車の設置場所によって、その地点の風速が大きく異なる。この違いは本研究で開発された非線形モデルによりよく再現されているのに対して、線形モデルは 2～5 号機の年平均風速を過大に評価している。2～5 号機では山頂のやや低い場所に位置するため、主風向 W に対して上流側の地形の影響を受け、風速が減少している。従来の線形モデルではこのような風速の減少を再現できない。10 機平均では線形モデルの予測誤差が 14.2%であるのに対して、非線形モデルである MASCOT は 4.9%となる。非線形モデルによる予測精度は格段に向上していることが分かる。

構造物の耐風安全性向上のために、山岳地帯における局地風の予測精度を向上させると同時に、任意場所での設計風速の予測精度も向上させる必要がある。現在日本における基本風速のマップは全国にある 150 箇所の気象官署での風観測データにより推定されたもので、気象官署から離れた場所での推定精度が低下する問題がある。この問題を解決するために、台風シミュレーションによる設計風速の評価手法が提案されている。台風時の上空風は、発生された台風の経路、移動速度、気圧場に依存するため、個々の台風パラメータの確率分布を正確に再現するだけでなく、台風パラメータ間の相関関係の再現も重要である。また台風パラメータの確率分布及び台風パラメータ間の相関関係を正確に求めるための精度の高い台風データベースも必要である。

そこで、本研究では、まず過去 40 年間における気象台で得られた地上観測データと天気図の等圧線データを用いて、台風の性質を表す基本パラメータに関する新しいデータベースを

作成した。そして、台風シミュレーションに関しては任意地点に適応できる混合確率分布関数を提案すると共に、台風パラメータ間の相関関係と個々のパラメータの確率分布を同時に満たすことができる修正直交変換法を提案した。これらの新しい手法を取り入れ、台風シミュレーションプログラム MOST (Monte-Carlo Simulation for Typhoon) を完成した。

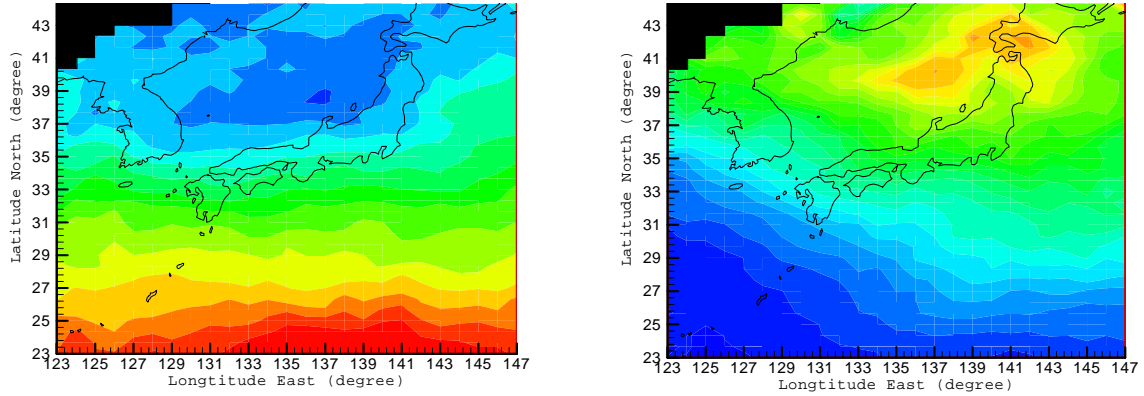


図3 台風の中心気圧低下量 D_p と移動速度 C

図3には中心気圧低下量と移動速度の分布を示す。中心気圧低下量は北へ行くほど値が小さくなり、また中心気圧低下量の減少は太平洋側より、日本海側の方が大きいことが分かる。一方、台風の移動速度は北東ほど、移動速度の値が大きくなり、台風が加速していることが分かる。また台風の加速は太平洋側よりも日本海側の方が顕著である。新しい台風データベースは日本付近を通過する台風の特性をよく表していることが分かる。

従来日本で行われてきた台風シミュレーションでは進行速度 C 、中心気圧低下量 ΔP 、最大風速半径 R_m は対数正規分布が使用されてきた。中心気圧低下量の確率分布の近似式としては日本では対数正規分布が用いられているのに対して、アメリカではワイブル分布が推奨されている。このように、台風パラメータを近似する確率分布は必ずしも普遍的なものとなっているとは言えない。そこで、本研究では対数正規分布とワイブル分布との組み合わせによる混合確率分布関数 MPDF (Mixed Probabilistic Distribution Function) を提案した。この確率分布は次式により表させる。

$$MPDF = a \times \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln x}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln x}}{\sigma_{\ln x}}\right)^2\right] + (1-a) \times \frac{k}{C} \left(\frac{x}{C}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{C}\right)^k\right] \quad (1)$$

ここで、 a は混合パラメータであり、0 はワイブル分布、1 は対数正規分布を表す。このパラメータは最小二乗法により求められる。

図4には日本全国をカバーする5地点(那覇、宮崎、大阪、千葉、仙台)に混合確率分布関数を適用し得られた混合パラメータの値を示す。南から北に行くにしたがって、混合パラメータ a の値は約0.2から単調に増加し、北緯34度を超えると1に漸近する。すなわち、気圧低下量 ΔP の分布はワイブル分布から対数正規分布に移行していることが分かる。これは強い台風の襲来頻度が南から北へ行くに従って減少していくことに対応している。混合確率分布は中心気圧低下量のみならず、最大旋衡風速半径と移動速度 C にも適用でき、よい近

似精度が得られている。特に移動速度における混合パラメータは中心気圧低下量と反対な傾向を示し、南から北へ行くに従って、混合パラメータが減少することがわかる。これは台風の移動速度が北へ行くにしたがって速くなっていることに対応している。

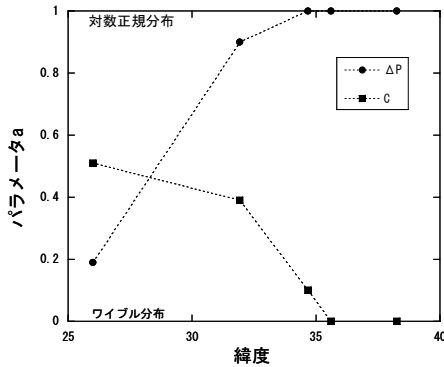


図4 混合パラメータ a の緯度による変化

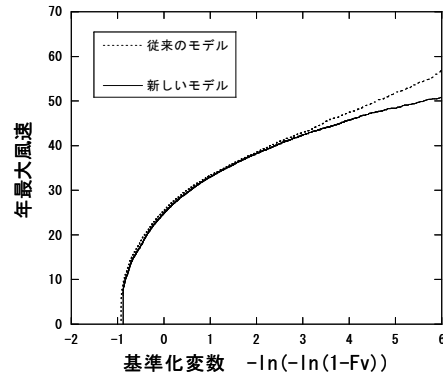


図5 上空風の年最大風速の比較

新しく提案した混合確率分布の効果性を確認するために、台風パラメータの観測値より算定された上空風の年最大風速と観測値を近似した確率分布に従い発生した台風パラメータにより求められた上空風の年最大風速と比較した(図5)。その結果、従来の手法による長い再現期間の年最大風速の過大評価は本研究で提案した混合確率分布により大きく改善されたことが分かる。

台風時の上空風は、発生された台風の経路、移動速度、気圧場に依存するため、個々の台風パラメータの確率分布を正確に再現するだけでなく、台風パラメータ間の相関関係の再現も重要である。本研究では、台風パラメータ間の相関関係と確率分布を同時に満足するために、修正直交変換法 MOD(Modified Orthogonal Decomposition)を提案した。

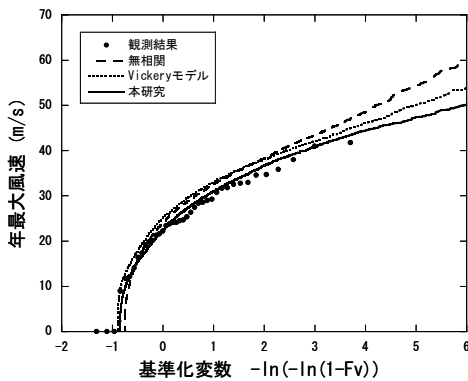


図6 再現期間と上空風の関係

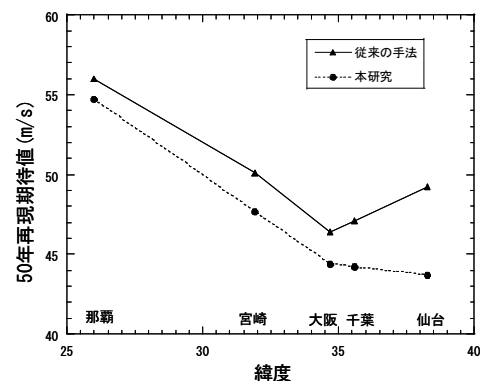


図7 50年再現期待値の緯度による変化

図6には千葉気象台における再現期間と上空風の関係を示す。従来の手法に比べ、本研究に提案した手法により求められた年最大風速は観測データをよく再現していることが分かる。また図7に示すように本手法による求めた那覇、宮崎、大阪、千葉、仙台での上空風の年最大風速の50年再現期待値は北へ行くにつれ単調に減少する結果を得た。この結果は台風が北上するにつれ、弱くなっていくことに対応している。それに対して、台風パラメータの確率分布並びにパラメータ間の相関関係を同時に再現していない従来の手法により求められた

年最大風速の 50 年再現期待値は、北緯 34 度を超えると、再び大きくなるような不自然の結果となった。

最後に、2003 年 10 月 1 日に関東に上陸した台風 21 号を対象に台風シミュレーションを行い、台風 21 号による送電鉄塔被害が発生した水郷地区の強風特性並びに鉄塔倒壊現場周辺の強風分布を明らかにすると共に、現地観測から得られた強風データと比較することにより、本システムの予測精度を明らかにした。

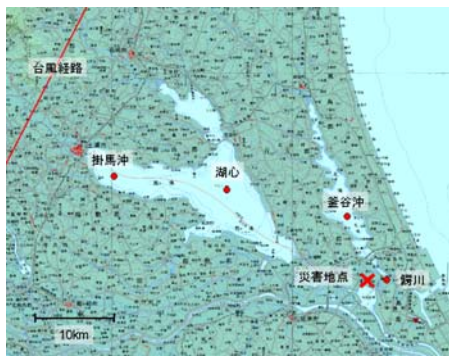


図 8 観測点の位置

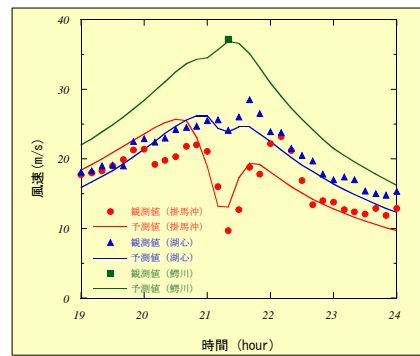


図 9 地上風速の時系列変化

図 8 に観測点の位置を示す。台風シミュレーションに必要なパラメータ(台風の中心位置, 中心気圧, 移動速度, 最大旋衡風速半径, 中心気圧差)は気象官署で観測された気圧データから非線形最小二乗法により同定した。また各観測地点における風向別粗度は国土数値情報の 100m メッシュ土地利用データを粗度長に変換し求めた。その際には観測地点を中心に半径 8km までの上流側の地表面粗度を考慮した。図 9 にはシミュレーションの例を示す。図中のプロットは観測値、実線はシミュレーション結果を表す。

まず台風の経路に近い掛馬沖観測点では台風の接近に伴い風速が増大し、21 時を過ぎた時点で一度小さくなり、その後再び増大している。台風シミュレーションはこの傾向を捕らえている。一方、湖心観測点では台風の経路からすこし離れているため、台風の接近に伴う風速の急な減少はほとんど見られず、シミュレーションの結果も観測値とよく一致している。また災害発生地点に最も近い鯉川観測点では鉄塔倒壊時刻の前後に風速が最大となり、10 分平均風速は 37m/s を超えている。台風シミュレーションの結果はここでも観測値とよく一致している。

以上のように、本研究では山岳地帯における社会基盤施設の耐風性能向上のための局地強風予測システムを構築し、その予測精度を風洞実験や現地観測により実証した。解析例から分かるように、非線形風況予測モデル MASCOT からは複雑地形における多くの流れ現象を解明でき、また台風シミュレーションとを組み合わせることにより、任意地点の設計風速を求めることができる可能である。我が国においては国土の約 4 分の 3 が山地であり、複雑地形上の風の予測は社会基盤構造物の耐風安全性向上のみならず、風力エネルギーの有効利用、大気環境評価などの工学問題を考える上で重要である。本研究で開発した局地風予測システムは複雑な地形に囲まれる橋梁や架空送電施設の耐風安全性の向上、強風災害の低減・防止、列車運行の安全性の確保、風力エネルギーの有効利用、大気環境評価に威力を発揮することと期待している。