

風の予測

Prediction of Wind

Ishihara Takeshi
石原 孟*

まえがき

台風常襲地帯に位置する我が国では、橋梁の設計において強風の影響を考慮することが極めて重要である。現在、風荷重や風による橋梁の振動現象の重要性が広く認識され、その評価方法は「本州四国連絡橋耐風設計基準」¹⁾や「道路橋耐風設計便覧」²⁾などの設計指針に記述されている。

橋梁の耐風設計は、設計風速の設定、橋梁断面の空気力学特性の評価、橋桁または橋全体の風による振動、各種のクライテリアの照査と様々なプロセスを経て実施されるが、中でも設計風速の設定は、自然風の複雑さと地表面の不均一さの故に、不確定性の大きい項目の一つとなっている。それに加え、我が国においては国土の約4分の3が山地であり、地形の影響により風が空間的に大きく変化する。今後、山岳地に多くの橋梁が架かることを考えれば、地形の影響を受ける場合の風の予測は橋梁工学の分野において重要な課題と言えよう。

本文では、風予測の現状を紹介するとともに、数値解析による風予測の可能性を展望する。

1. 風の予測

橋梁工学の分野では設計風速が10分間平均風速の100年再現期待値として定義されている。現在、橋の耐風設計に用いられている設計風速は主として気象官署で記録された過去の年最大風速に極値分布を当てはめる方法により求められている。道路橋の動的耐風設計に用いる設計風速は、架橋地点の地理的位置に応じ、全国基本風速マップに示す値を標準として、高度および地表粗度の影響を考慮した値としている²⁾。しかし、この手法は風の収束や吹抜けによる局所的な風速の増大が発生する山の尾根や峡谷において適用することができない。したがって、このような場所では設計風速の値を架橋地点の状況に応じて修正する必要がある。

地形の影響を受ける場所での設計風速を評価する手法としては架橋地点において風観測を実施する方法が用いられている。観測期間は十分に長ければ(10年以上)、極値分布の当てはめにより100年再現期待値をある程度正確に求めることができる。しかし、これから建設される橋梁に長い期間の観測を期待するのは無理に近い。一般には、短期の風観測を実施し、近隣の気象官署における観測データと

の相関をとることにより、架橋地点での100年再現期待値を求める方法が広く用いられている³⁾。しかし、この方法で観測地点での設計風速が得られるとしても、この風速が長い橋に対して代表的な値になっているとは限らない。特に架橋地点の周辺に複雑な地形がある場合に、この方法には限界がある。地形が複雑に変化する場所での風速の空間分布が必要な場合には、風洞実験と併用する方法が用いられている。

風洞実験は一般に流体力学の相似則に基づいているため、風洞内に作られた流れ場は実際の風を再現しており、この流れ場を正しく計測できれば、風洞実験から得られた風速データは信頼性が高い。また風洞実験により、架橋地点における詳細な風速分布を測定することができる。しかし、剥離を伴う急峻な地形上の流れ場を精度よく測定することは容易ではない。また地形上の風を風洞内に再現するには地形模型が必要となる。一般に地形模型を製作するには多くの時間と費用がかかるうえ、再現可能な範囲も風洞の大きさによって制限される。

近年、コンピューターおよび流体計算技術の進歩に伴い、表-1に示すようないくつかの風に関する新しい予測方法が提案されている^{3)~7)}。これらの方法は目的に応じて複数の技術を組み合わせることにより実現されていることから、ハイブリッドの手法と言える。

例えば、地形の影響を受ける場所での設計風速を評価するには、局地風モデルと風観測とを組み合わせる方法を用いることができる。局地風モデルでは流体力学の基本方程式であるナビエ・ストークス方程式(NS方程式)を基礎として数値解析により複雑地形上の風を予測する。この方法は風洞実験のような制約を受けることがなく、広い範囲の地形を取り扱うことができる。また数値解析では解析空間内のすべての風速データを一度に得ることができるため、風洞実験に比べて低コストかつ短時間で複雑地形上の局所風況を予測できるメリットがある。しかし、局地風モデルでは対象地域内における風速の相対的な変化を予測できる

表-1 風の新しい予測方法

技術	局地風モデル	風観測	台風モデル	気象モデル
目的				
局地風況予測	○	○		
広域風況予測	○		○	
リアルタイム予測	○			○

*東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤工学専攻 助教授 工博

が、風速の絶対値がわからない。そこで、風観測（参照観測）と併用することにより、対象地域内の風速の絶対値を求めることができる。具体的には建設地点の近くにある参照観測点と近隣の気象官署での風向・風速の同時観測から参照観測点での設計風速を求め、次に参照観測点の風速と対象地域内の風速との関係を局地風モデルから求める。これにより、対象地域内の風速値を算出する。この手法ではそれぞれの技術の長所をうまく利用している。すなわち、風の統計的性質が長期地上観測データから求め、風の空間分布は局地風モデルにより求める。この方法はすでに実際の橋の耐風設計に用いられている⁶⁾。ただ、参照用の観測にも多大の時間と費用が必要であり、また建設地点の近くに気象官署のない場所では利用できない問題がある。

そこで、風観測の代わりに、台風モデルと組み合わせることにより、任意地点における設計風速を求める方法も最近開発されつつある⁷⁾。この手法では台風に関する統計的性質（中心気圧低下量、最大旋衡風速半径、移動速度・方向等）に基づき、モンテカルロ・シミュレーションにより台風を発生し、任意地点における風の統計値を求める方法である。この方法では風観測データを一切必要としない。その代わりに、台風の気圧分布から台風に伴う風速場を予測するモデルが必要となる。台風モデルによる設計風速の評価を可能にするための研究開発が現在活発に進められており、近い将来には任意地点、任意高さ、任意再現期間の風速を予測することが可能となるであろう。

最後に、局地風モデルと気象モデルとを組み合わせることにより、風のリアルタイム予測も可能となる。これらのリアルタイムの風情報は道路の通行管理や鉄道の運行管理などに役に立つ。現在開発中の局地風のリアルタイム予測システムは以下の3つのモジュールからなっている。まずftp マネージャーではモデル計算に必要な気象データを気象庁から取得し、データ解析の前処理を行う。次に地域気象モデルを用いて、2日先までのシミュレーションを行う。局地風モデルは地域気象モデルのデータをオンラインで受け取り、局地風の予測を行う。最後にweb マネージャーはシミュレートされた結果をポスト処理し、画像の形でwebに掲載し、現場で利用される。これらの一連の作業はすべて自動化し、システムの運用はオートパイロットで行うことを目指している。

以上のように、風に関する新しい予測方法のいずれも複数の技術によるハイブリッドの手法であり、中には局地風モデルは中心的な役割を果たしていることがわかる。以下、筆者が最近開発した局地風モデル MASCOT (Microclimate Analysis System for Complex Terrain) による風の前測例^{3)~5)}を紹介し、局地風モデルの前測精度と実用可能性を明らかにする。

2. 局地風モデルによる風の予測

大気の運動は流体力学の基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式により記述される。現在、複雑地形上の風を数値的に予測する時にはレイノルズ平均型モデルと空間平均型 LES (Large Eddy Simulation) モデルが用いられて

いる。LES モデルを用いる場合、計算から得られた流れ場から風の統計量を求めるには支配的な渦成分の数十周期分の風速データが必要となり、計算時間はレイノルズ平均型モデルの場合に比べ格段に長い。局地風モデル MASCOT ではレイノルズ平均型モデルを採用しており、このレイノルズ平均された NS 方程式を直接に解くことにより、流れの剥離に伴う急峻な地形上の風を高精度に予測することができる³⁾。以下、MASCOT による風の前測例を2つ紹介する。

2-1 積丹半島の解析例

まず北海道積丹半島先端の一部を対象とした解析例を紹介する⁴⁾。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。図-1 に地形の等高線と測定点の配置を示す。この図からわかるように、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。

図-2 は地点 B での地上 40 m における数値解析と測定値との比較結果を風向別風速比で示したものである。図中の点線が実験値、実線が解析結果を示す。局地風モデルによる前測結果は風洞実験の結果をよく再現している。数値解

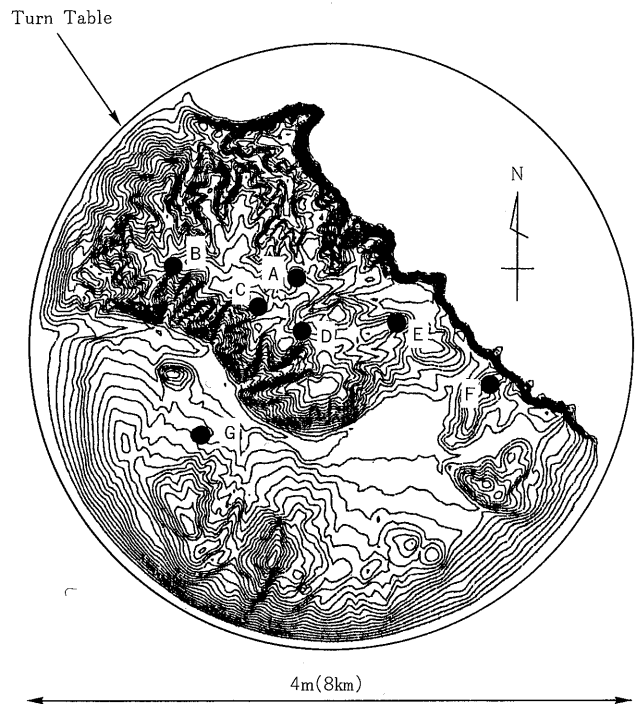


図-1 地形の等高線と測定点の配置

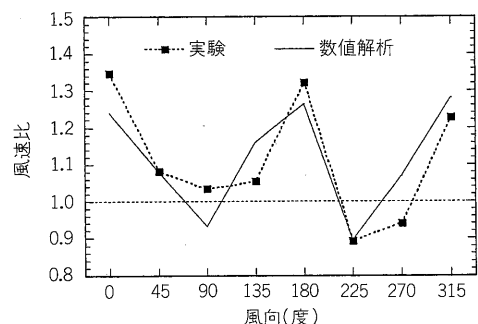


図-2 観測点 B における地上 40 m での風向別風速比

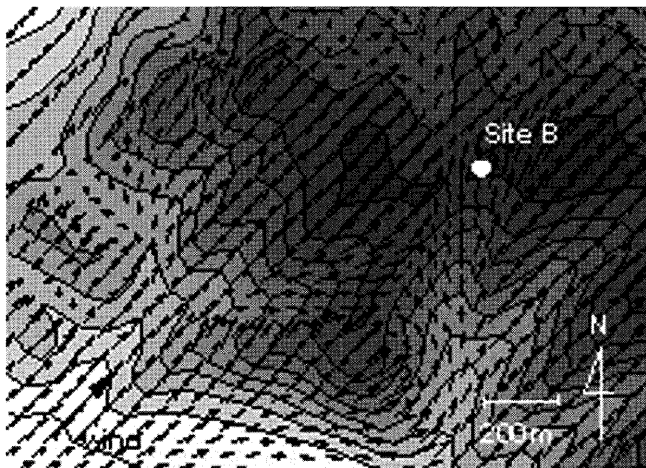


図-3 観測点Bにおける地上10mでの風速ベクトル図

析による風予測のメリットは解析空間内のすべての風速データを一度に得ることができ、風速の空間分布を容易に知ることができる点である。図-3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。図中の色の濃いところは高い標高を表している。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ことがわかる。

2-2 竜飛岬の解析例

次に青森県の竜飛岬を対象とした解析例を紹介する⁵⁾。竜飛岬には東北電力(株)の集合型風力発電基地「竜飛ウインドパーク」があり、10台の風車が設置されている。写真-1には竜飛ウインドパークの全景を示す。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-4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わかる。

あとがき

本文では風予測の現状やハイブリッドの手法を用いた風の新しい予測方法を示し、複雑地形の影響を受ける風の数値予測の可能性について筆者が最近行った研究を例にして紹介した。解析例からわかるように、局地風モデル MASCOT からは複雑地形における多くの流れ現象を解明でき、実際の地形上の風を精度よく予測することができる。

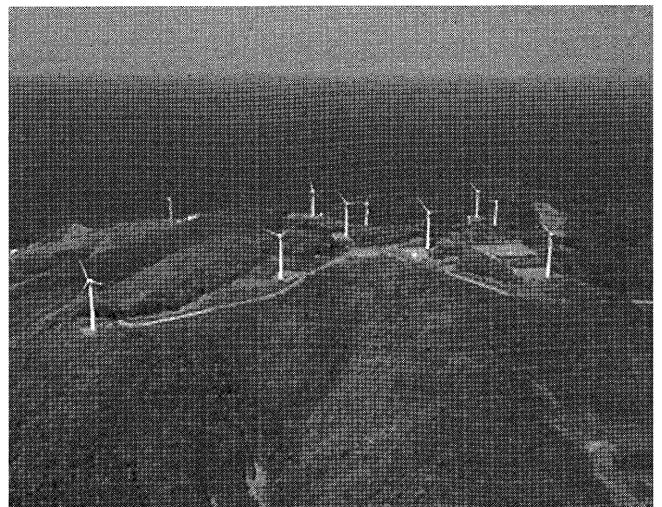


写真-1 竜飛ウインドパークの全景

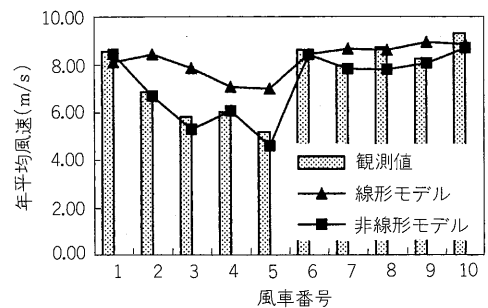


図-4 年平均風速の予測結果と観測値との比較

現在、MASCOT では100万格子を使用した実地形上の風の解析を1台のPCで1時間以内に完了でき、解析時間と予測精度の両面において実用レベルに達している。また MASCOT と台風モデル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、全国詳細風況マップの作成が可能となる。さらに気象モデルと組み合わせることで、風のリアルタイムの予測も可能となる。

まえがきにも述べたように、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橋梁工学のみならず、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うえで重要である。本文で紹介した風に関する新しい予測方法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に威力を発揮することであろう。

【参考文献】

- 1) 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋耐風設計基準 (1976)
- 2) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧 (1991)
- 3) 石原，日比：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)
- 4) 石原，山口，藤野：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，2002 (投稿中)
- 5) 堀籠，石原，藤野：複雑地形における局所風況の数値予測，その2 実測による検証，第57回土木学会年次学術講演会梗概集 (2002)
- 6) 石原，山口，藤野：第二東名高速道路陣ノ谷川橋の設計風速，地形風の数値流体解析による算定 (2002)
- 7) 松井，石原，日比：動的外乱に対する設計，現状と展望，日本建築学会，pp.212~217 (1999)