

数値流体解析を利用した風況予測技術

国立大学法人 東京大学
大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 教授 石原孟

1. はじめに

台風常襲地帯に位置する我が国では、台風による構造物の被害が毎年発生している¹⁾。構造物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が、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、不確定性が大きい。それに加え、我が国においては国土の約4分の3が山岳地帯であり、地形の影響により風速の値は空間的にも時間的にも大きく変化する。山岳地帯に建設された構造物は、地形の影響を強く受け、風の高精度予測は耐風工学の分野において重要な課題となっている。

一方、近年風のエネルギーを利用する風力発電の導入拡大が急速に進んでいる。2016年末に世界の風力発電設備容量は前年比5460万kWが増加し、4億8675万kWに達している。風力発電機の単機容量は1基約2000kWであることを考えると、2016年に新設した風車の数は約2万7300基にもなる。陸上風力発電だけではなく、洋上風力発電の普及も始まっている。図1には2002年にデンマークに建設されたHorns Rev洋上風力発電所を示す²⁾。2000kWの風車80基は水深6~12m、海岸から14~20kmの地点に建設されている。この洋上風力発電所は世界初の大規模洋上ウィンドファームである。一方、2013年に稼働した世界最大級の洋上風力発電所London Arrayの設備容量は原子力発電所規模の63万kWに達し、今後100万kWに拡張する予定である。

本稿では、耐風工学および風力発電分野におけ

る風況予測の例を紹介すると共に、数値流体解析を利用した風況予測の可能性を展望する。



図1 デンマークのHorns Rev洋上風力発電所

2. 風の予測方法

耐風工学の分野では設計基準風速は気象官署で記録された過去の年最大風速を極値分布に当てはめる方法により求められている。設計基準風速は、全国基準風速マップの形で示されているが、建設地点の設計風速は風の収束や吹き抜けにより局所的に風速が増大することがある。従って、このような場所の設計風速は建設地点の地形・地物に応じて修正する必要がある。近年、コンピュータ及び数値流体解析技術の進歩に伴い、様々な局地風況の予測方法が提案されている。

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況予測モデル³⁾を用いることができる。局地風況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風速を予測できるメリットがある。しかし、局地風況予測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が、風速の絶対値が分からないため、風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。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開発されている。この手法では実際の台風の経路と気圧データまた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)に基づき発生した台風の経路と気圧データを用いて、任意地点における台風時の強風を求めることができる。この方法では風観測データを一切必要とせず、台風の気圧分布から台風に伴う風速場を予測できる⁴⁾。

一方、気象モデルと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っている。これらのリアルタイムの風情報は道路や鉄道の運行管理、建設現場の施工管理などに役立っている。現在用いている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 マネジャーではモデル計算に必要な気象データを日本気象庁から取得し、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、様々な現場で利用される。これらの一連の作業はすべて自動化され、システム運用はオートパイロットで行われている。このシステムはオフラインで運用でき、風況マップの作成や風力発電所の立地評価にも利用されている。

図2には気象モデルと極値風況予測モデルとを融合することにより、任意地点での風速・風向を予測する非線形風況予測モデルの例を示す³⁾。この例では風観測をせず、風力発電適地の選定が可能であり、従来の風

観測に比べ、所要時間を大幅に短縮できる。以下、筆者が実施した風況予測の例を紹介する。

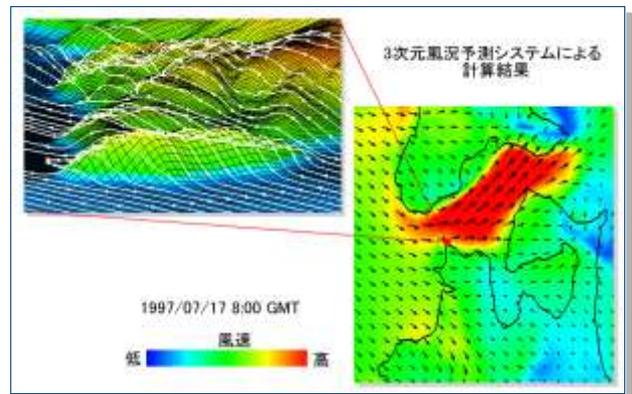


図2 急峻地形上の局地風況予測の例

3. 台風時の強風予測

2002年10月1日の夜、台風21号が関東地方を直撃し、茨城県潮来市にある9基の送電鉄塔が倒壊する事故が発生した¹⁾。この事故調査では、初めて台風モデルと局地風況予測モデルとを組み合わせることにより、送電鉄塔被害時の強風を定量的に評価した。以下、送電鉄塔の被害状況及び鉄塔倒壊時の現場周辺の強風予測について説明する。

図3には台風21号の強風で送電鉄塔が倒壊した現場を示す。倒壊した7基の鉄塔は潮来市延方町から神栖町鰐川にかけての約2.5kmの間に位置する。手前の2基の鉄塔は香取線の20号鉄塔と湖南線の23号鉄塔であり、奥の5基は香取線の21号～25号鉄塔である。香取線20号鉄塔～25号鉄塔(高さ58m～94m)の中では22号鉄塔(写真の真ん中の鉄塔)の倒壊の様子が明らかに他の鉄塔と異なっている。すなわち、22号鉄塔以外の5基は、鉄塔の中程(腕金の下の部分)から折れていたのに対して、22号鉄塔だけは根元から横倒しになっていた。なお、香取線22号鉄塔のみ、風上側の2脚の基礎が数十cm浮き上がっていた。このことから、まず強い風荷重により、22号鉄塔の風上側の基礎が引張力に耐え切れずに浮き上がり、それにより荷重が風上側の2脚に集中し、鉄塔基部の座

屈により 22 号が倒壊した。そして、22 号鉄塔の倒壊が送電線を介して香取線の他の 5 基の鉄塔を引っ張り倒し、最後に湖南線の 23 号鉄塔は香取線 20 号の倒壊に巻き込まれて倒壊したと推測された。



(共同通信社提供)

図 3 台風 21 号の強風で倒壊した送電鉄塔

強風のレベルは、台風の性質、台風からの距離だけではなく、当該地点周辺の地形や地表面粗度にも大きく影響される。鉄塔倒壊地点付近は極めて平坦で、地形の影響はほとんど考えられない。この地域の地表面粗度を示したのが図 4 であり、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、更にはその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。そこで、地表面粗度の強風への影響を図 4 の

領域を対象に筆者が開発した局地風況予測モデル³⁾を用いて調べた。

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。

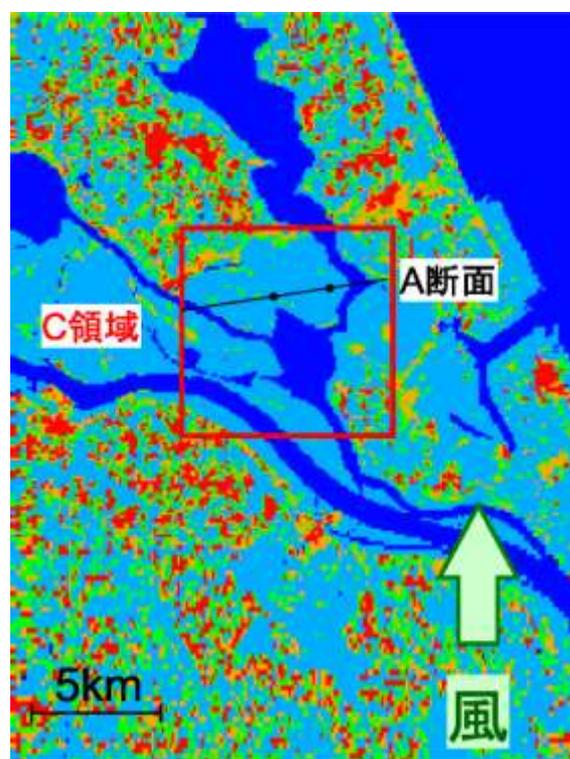


図 4 解析領域内の地表面粗度

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 4 の中の A 断面）の風速分布を図 5 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、色が赤いほど風速が高い。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。

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 6 に示した。領域は図 4 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 4 から分かるように、災害発生地点の風上側には湖のほか、河川や水田など地表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、災害発生地点での風速が高くなり、風の通り道が形成されていることが分かる。

この例では災害時の強風に対する事後解析であるが、このようなシミュレーション技術を用いれば、どの地点に強い風が吹くかなどを予測する事前解析も可能である。災害に限らず、構造物の設計風速の予測にも利用できる。

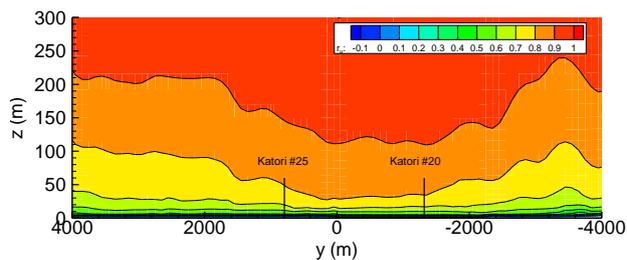


図 5 A 断面内の平均風速の分布

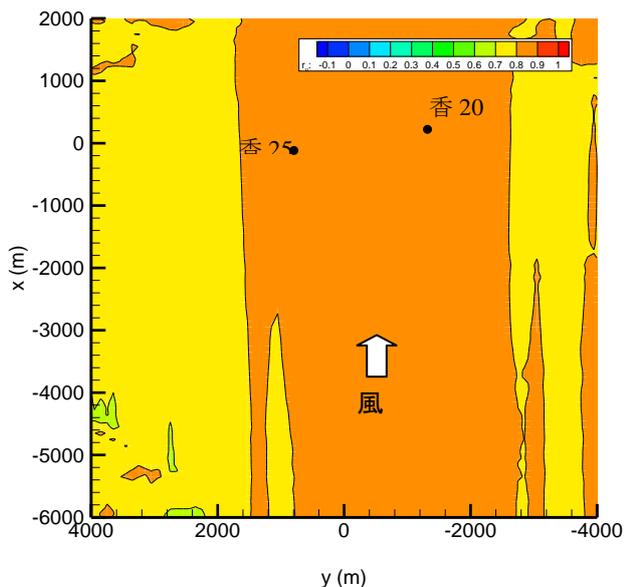


図 6 C 領域内の高さ 70m での平均風速

4. 風力賦存量の評価

現在、風力発電先進国では 陸上での適地不足の問題が顕在化しており、その解決策として洋上風力発電の開発が期待されている。欧州では洋上における大規模なウィンドファームが多く建設され、運用されている。日本においても風力資源に乏しい大都市近傍において大規模な洋上風力発電の実用化が期待されている。大規模洋上風力発電を行うためには洋上における風力賦存量を正確に評価することが不可欠である。

風力賦存量の正確な評価のためには正確な洋上風況の推定に加え、沿岸からの距離、水深、社会的制約条件等を考慮し、複数のシナリオの下で賦存量を比較し、洋上風力開発に際しての基礎的な資料を提供することが重要である⁵⁾。ここでは関東地方沿岸の洋上を対象に、メソスケール気象モデルを用いて関東沿岸の洋上風況を予測すると共に、地理情報システムを用い、社会的・経済的制約条件を考慮した複数のシナリオに対し、洋上風力賦存量を定量的に評価した例を示す。

この例では全球モデルの客観解析値を境界条件、初期条件とし、質量保存則、運動量保存則、熱力学方程式、水分の保存則を支配方程式とするメソスケール気象モデルによる解析を行うことにより、関東沿岸の洋上風況を求めた。解析ではコロラド州立大学で開発されたメソスケール気象モデル RAMS を用い、2000 年における 1 年間の解析を行い、関東地方沿岸域における洋上風況の時系列データを求めた。図 7 は年平均風速分布を示したものである。全体的に沿岸に近い場所ほど平均風速が弱く、陸から遠ざかるにつれて風速が増大していることが分かる。また、沿岸からの距離が同じでも、場所によって風速に大きな違いがある。

図 8 には海岸線からの距離が 0km, 5km, 10km, 20km, 30km, 40km に沿った線上の年平均風速を示す。全ての場合に銚子沖で最も年平均風速が

高いことが分かる。また、海岸からの距離が近い場合には、北側に行くに従い風速は急激に低くなることが分かる。また、海岸からの距離が 40km 離れている場合には、場所によって大きな風速の違いが見られない。これに対し、銚子沖以南では平均風速の大幅な減少は見られない。最も風速が高い銚子沖に対し、最も風速の低い銚子北 70km の海域では年平均風速は 25%程度低くなっている。

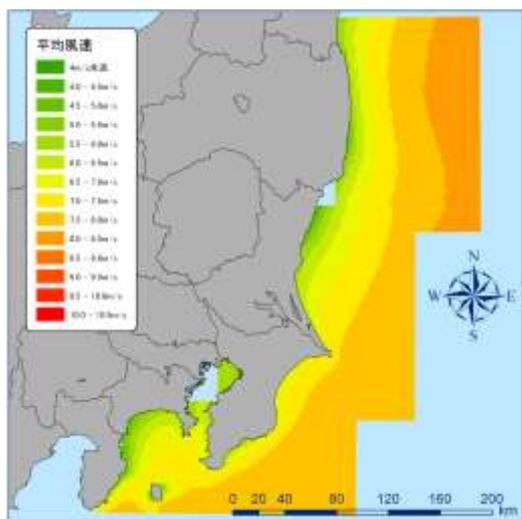


図7 海面高度 70m における年平均風速

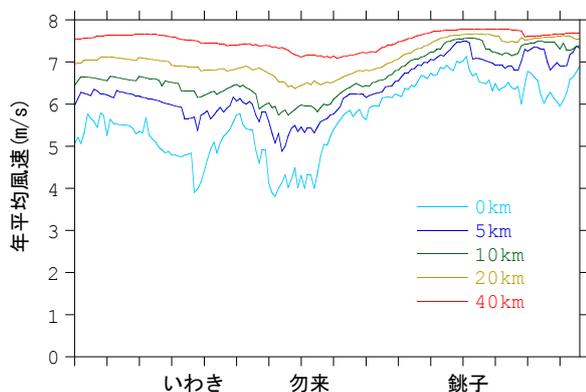


図8 沿岸からの距離別の年平均風速 (70m)

関東沿岸の洋上風力賦存量を評価するために、関東地方沿岸域の陸地から 50km までの範囲を対象とし、水深別、海岸からの距離別に風力賦存量を求めた。また、海域によっては社会的、経済的な理由により大規模洋上ウィンドファームの建設が難しい海域も存在するため、数種類のシナリオ

を想定し、社会的制約条件及び経済的制約条件を考慮した賦存量を推定した。

賦存量の算出には様々な地理データが必要となる。まず、陸地から 50km の範囲を対象に水深別、海岸線からの距離別に賦存量を算出するため、水深データ及び海岸線データが必要となり、国土数値情報を用いた。また社会的・経済的制約条件を考慮するためには自然公園、港湾、漁業権設定海域などの規制に関する地理データも使用した。

図9には関東地方沿岸 50km 以内の洋上風力賦存量を海岸からの距離・水深別に求めたものを示す。本研究で対象とした海域では合計で 286.54TWh/year の賦存量があることが分かる。これは東京電力の 2005 年の年間電力販売量 288.7TWh/year にほぼ等しい。ただし、水深データから分かるように賦存量の大部分は水深 500m を超える海域にあり、経済的に利用が難しいと考えられる。また水深 10m 以下の海域にも年間 4.87TWh の賦存量があるが、そのほとんどは海岸からの距離が 10km 以内の海域に集中しており、漁業権等の社会的制約条件を受ける。

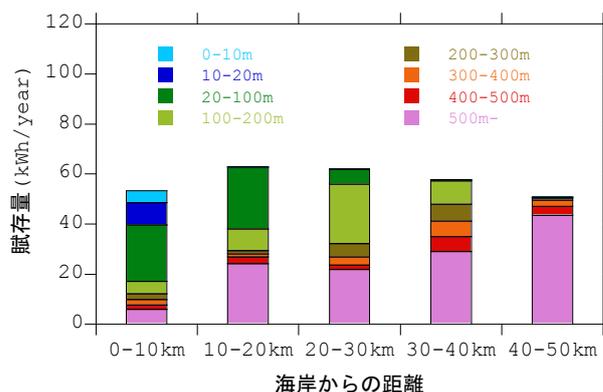
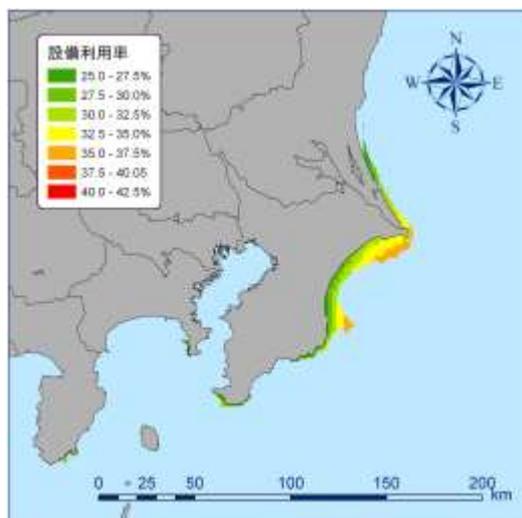


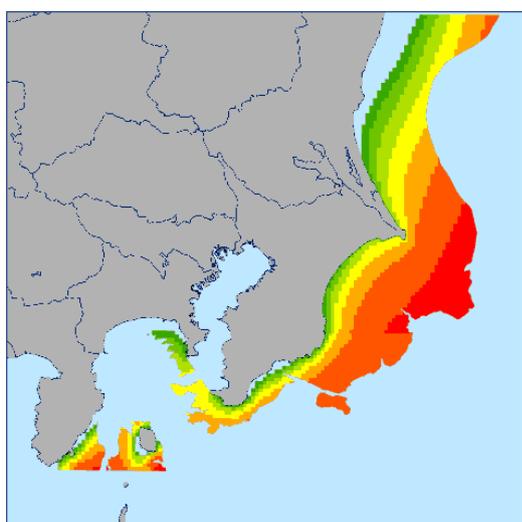
図9 水深・海岸からの距離別の賦存量

図10には各シナリオに対する洋上風力賦存量の分布を示す。着床式基礎のみ(図10(a))を利用する場合に、設備容量は 261 万 kW であるが、浮体式基礎(図10(b))も利用できる場合に、設備容量は 3,978 万 kW となり、賦存量は劇的に増大

する。この賦存量は東京電力の 2005 年の年間電力販売量の 46%に相当する。このように、風況予測と地理情報システムを用いることにより、様々なシナリオにおける洋上風力の賦存量を検討でき、大変有用なツールである。



(a)着床式（社会的制約なし）



(b)着床と浮体式（社会的制約なし）

図 10 社会的制約を考慮した洋上風力賦存量の分布

5. おわりに

本報では数値流体解析を利用した風況予測の現状を紹介した。局地風況予測モデルと台風モデルとを組み合わせることにより、任意地点における設計風速を評価することが可能になり、構造物の耐風安全性の向上

につながる。更に気象モデルと組み合わせることにより、風のリアルタイムの予測も可能で、風力発電賦存量の評価や大規模ウィンドファームの立案にも役立つ。

風況予測の精度はコンピュータ及び流体解析技術のみならず、地形や土地利用等のデータベースに強く依存する。現在、大型風車や送電線鉄塔の耐風設計に必要な風況予測では、国土数値情報の 100m メッシュ土地利用データや国土地理院の 50m メッシュの数値標高データは十分であるが、鉄道車両の横風対策を検討する際には、数 m 程度の数値標高と同程度の解像度を有する土地利用データが必要となる。現在、建物についてゼンリンデータベースを利用できるが、高架橋、盛土に代表される土木構造物の全国規模のデータベースは存在しない。風況予測の精度の更なる向上とその応用分野の拡大を実現するため、より高解像度の国土数値情報の整備が期待される。

参考文献

- 1) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三: 2002 年台風 21 号による送電鉄塔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.90-93, Jan., 2003.
- 2) EWEA: Oceans of Opportunity, <http://www.ewea.org/>
- 3) 石原孟, 山口敦: 風況予測ソフトウェア MASCOT の技術と解析例, 日本風力エネルギー学会誌, Vol.37, No.1, pp.2-5, 2013.
- 4) 石原孟, 山口敦: モンテカルロシミュレーションと MCP 法を用いた混合気候における極値風速の予測, 日本風工学会論文集, Vol.37, No.3, pp.105-116, 2012.
- 5) 石原孟: 地理情報システムを利用した洋上風力賦存量の評価, 電気評論, pp.39-43, 2010.

略歴

1992 年 3 月に東京工業大学土木工学専攻博士課程終了, 同年 4 月に清水建設(株)・技術研究所に入社, 2000 年 4 月から東京大学, 2008 年 4 月に現職。耐風工学および風力発電等の開発研究に従事するとともに、日本風力エネルギー学会会長、日本風工学会理事等を務めている。