

# 地域気象解析モデルによる風力エネルギー評価に関する研究

——青森県津軽半島の風力エネルギー賦存量の推定——

大塚 清敏      岡田 宏  
宮川 保之

## A study on the Assessment of Wind Power by Three-dimensional Meso-Scale Meteorological Model

——Estimation of Wind Potential of Tsugaru Peninsula in Aomori Prefecture——

Kiyotoshi Otsuka      Hiroshi Okada  
Yasuyuki Miyagawa

### Abstract

A three-dimensional, non-hydrostatic meso-scale meteorological model has been developed. The model simulates air flows over irregular terrain in a limited area with appropriate boundary conditions. The model was used to investigate the effects of the surface topography on the pattern of the wind field near the ground. With the topography of Tsugaru Peninsula, it was shown that the relatively small-scale relief of the ground can produce mountain wave motions in the air flows over mountainous regions, which result in strong slope winds at the leeward side of ridges. The model was applied to the assessment of wind power in the peninsula. The results suggest there exist some places suitable for wind power facilities where terrain features are rather moderate.

### 概 要

3次元の地域気象解析モデルと天気図の解析から、青森県津軽半島における風力エネルギーの賦存量の評価を行った。モデルは、密度成層・圧縮性の流体力学方程式に基づくものである。評価対象地域の風況は、その地域の地形と密接な関係にあるが、数値モデルによって地形が風の流れに与える影響が明らかにされた。津軽半島の地形が、そこを横断する気流に顕著な山岳波を形成させ、それが地上付近の風の強弱に大きく影響を与えることがわかった。風力エネルギーの賦存量は、モデルを用いて対象領域に16風向の風を流入させて得られる風速分布と、その地域における風の一般場の統計とを結合させて評価した。その結果、風力エネルギーの分布は、半島の地形を反映して複雑なものとなっているが、高い山岳以外にも風力エネルギーの大きな場所があることがわかった。

## 1. 研究の背景

風力エネルギーは、太陽熱や水素のもたらずエネルギーとともにクリーンなエネルギーとして、その開発に期待が寄せられている。最近では、高性能の風力発電タービンが開発され、わが国でも風力発電の実用化試験が行われている<sup>1)</sup>。水力あるいは火力発電と併用することにより、低コスト、省資源をねらった提案もある。風力エネルギーは、自然界に無尽蔵に存在し、しかも、環境汚染原因物質とは無関係であるので、今後、利用される範囲が大きく広がると考えられる。

風力発電等の風力エネルギーの利用施設の建設に際しては、風車の設置サイトの選定が重要な問題である。風力発電では、年平均で6 m/s以上の風の吹く場所が望ま

しいとされる。しかし、上述のように、他のエネルギーとの併用（風力発電と水力発電の併用）を考えれば、候補地としての制限が緩くなる可能性もある。

ある地域における利用可能な風力エネルギー量の調査のことを、風力エネルギー賦存量調査という。これまでになされた調査では、地形因子解析法が多く用いられてきた<sup>2)</sup>。地形因子解析法は、風の観測データを利用した回帰分析の1つであり、ある地域内における任意の地点の平均風速を推定する方法である。地形因子解析法では、回帰係数は、長期間にわたるさまざまな気象条件における風の観測値から決められるので、その係数は、当該地域の風の特徴を表わしているといえる。しかし、観測所における風速計設置場所の立地条件に問題がある場合、風速の推定値に大きな誤差を生むこともある。

本研究では、風力エネルギーの新たな評価法として、当社で開発された地域気象解析モデルを利用する方法を試みたので、その結果について報告する。評価対象地域は、強風が吹くことで知られている青森県の津軽半島を含む、東西 50 km×南北 60 km の長方形の領域とした(図-1)。

## 2. 風力エネルギー賦存量評価の方法

風力エネルギーの評価は、以下の手順で行う。まず、評価対象地域(図-1)の境界から、16風向に準拠した設定風向の気流(流速  $V_m(N)$ )を流入させ、地形による影響を受けた流れ場を3次元的に計算する。本報では、便宜上、解析領域外部から流入する風を一般風と称する。計算は、第3節で示すように、解析領域に3次元格子(巻頭カラーグラビア)を導入し、支配方程式を差分化して行う。計算で得られた格子点上の風速(風速ベクトルの大きさ)を  $V_{ijk}(N)$  とすると、風向  $N$  の一般風に対する各計算格子点上の風速比  $r$  が、

$$r_{ijk}(N) = V_{ijk}(N) / V_m(N) \quad \dots\dots\dots(1)$$

のように求まる。ここで、 $i, j, k$  はそれぞれ3次元格子の東西、南北、鉛直方向の格子点番号であり、 $N$  は、16風向を表わす変数 ( $1 \leq N \leq 16$ ) である。

次に、地上天気図解析から、ある一定の期間内における、解析対象地域付近の大気境界層より上の一般風の平均風速と風向別出現頻度とを求める。広域的な一般風は、非常によい近似で等圧線にほぼ平行に吹いており(図-2)、その風速は等圧線間隔に反比例する。このような風は、地衡風と呼ばれる。(ただし、地面付近の大気境界層内部では、地面摩擦の影響で完全な地衡風にはなっていない。)この性質を利用すれば、天気図から解析対象地域の大局的な風の流れを知ることができる。

風力エネルギーは、上述した数値計算と天気図解析とを結合することで評価する。まず、計算領域内部の任意の格子点において、設定風向  $N$  に対する風速比  $r_{ijk}(N)$  を、全風向について計算によって求める。次に、天気図解析から得られた一般風の風向  $N$  の出現確率  $P(N)$  と平均風速  $V_{obs}(N)$  を利用すると、天気図解析期間内における格子点での平均風速  $\langle V \rangle_{ijk}$  が、

$$\langle V \rangle_{ijk} = \sum_N P(N) r_{ijk}(N) V_{obs}(N) \quad \dots\dots\dots(2)$$

のように求まる。風車が、その回転面において、単位面積あたりに捕獲するエネルギーは、そこを通過する風速の3乗に比例し、一般に次のようにかける<sup>3)</sup>。

$$E_{ijk} = 16/27 \cdot \frac{1}{2} \rho \langle V \rangle_{ijk}^3 \quad \dots\dots\dots(3)$$

風車によって獲得できるエネルギーは、上式に風車の機械効率をかけたものになる。上式は、風が風車面に対し、風が直角に流入する場合の式であるので、実際には風車の向きによって獲得し得る風力エネルギー量は変化する。しかし、本研究は、風力エネルギーの賦存量の評価であるので、風車の向きの影響については考えない。

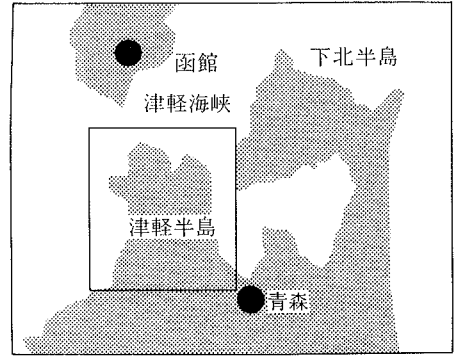


図-1 風力エネルギー評価領域 (矩形枠の内部)

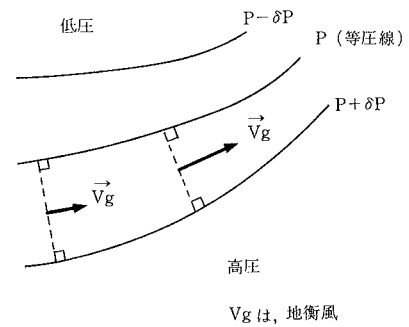


図-2 等圧線と地衡風との関係

## 3. モデルに関する記述

### 3.1 支配方程式

本研究で用いたモデルは、水平方向の広がりが数10~100 km 四方、高さ 10 km 程度の領域内の、風や温度・湿度等の気象因子の3次元的な分布、およびその時間変化を追跡するものである。支配方程式は、回転座標系で記述された圧縮性流体の方程式である。大気は、上空に行くにつれて圧力とともに密度も減少する密度成層をしているので、それを表現し得るよう、圧縮性の流体方程式を用いた。

モデルの支配方程式系は、鉛直座標として、 $z_* = H(z - z_s) / (H - z_s)$  なる  $z_*$  を用いると次のようにかける。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{C_p \theta_0}{\sqrt{G}} \left( \frac{\partial \sqrt{G} \pi_1}{\partial x_i} + \frac{\partial \sqrt{G} G_{13} \pi_1}{\partial z_*} \right) &= -u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ -\omega \frac{\partial u_i}{\partial z_*} - \frac{C_p \theta_1}{\sqrt{G}} \left( \frac{\partial \sqrt{G} \pi_1}{\partial x_i} + \frac{\partial \sqrt{G} G_{13} \pi_1}{\partial z_*} \right) & \\ + f \epsilon_{ij} k u_j + D u_i & \dots\dots\dots (4a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{C_p \theta_0}{\sqrt{G}} \frac{\partial \pi_1}{\partial z_*} &= -u_j \frac{\partial w}{\partial x_j} - \omega \frac{\partial w}{\partial z_*} \\ + \frac{C_p \theta_1}{\sqrt{G}} \frac{\partial \pi_1}{\partial z_*} + \frac{\theta_1}{\theta_0} g + D w & \dots\dots\dots (4b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_1}{\partial t} + \frac{C_s^2}{C_p \theta_0} \frac{1}{\sqrt{G}} \left( \frac{\partial \sqrt{G} u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \sqrt{G} \omega}{\partial z_*} \right) &= \frac{g w}{C_p \theta_0} \\ = -\frac{(\gamma - 1)}{\sqrt{G}} \pi_1 \left( \frac{\partial \sqrt{G} u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \sqrt{G} \omega}{\partial z_*} \right) & \end{aligned}$$

$$+ \frac{(\gamma-1)(\pi_0 + \pi_1)}{C_p(\theta_0 + \theta_1)} \frac{dQ}{dt} \dots\dots\dots (4c)$$

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} = -u_j \frac{\partial \theta_1}{\partial x_j} - \omega \frac{\partial \theta}{\partial z_*} + \frac{1}{C_p(\pi_0 + \pi_1)} \frac{dQ}{dt} \dots\dots\dots (4d)$$

$$P = \rho RT \dots\dots\dots (4e)$$

ここで、

$$\sqrt{G}\omega = w + \sqrt{G}G_{13}u_i \quad \sqrt{G} = 1 - \frac{Z_s}{H}$$

$$\sqrt{G}G_{13} = \left(\frac{Z_*}{H} - 1\right) \frac{\partial Z_s}{\partial x_i} \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad C_s = \sqrt{\gamma R \theta \pi}$$

$u_i$ : 風速の水平成分 ( $i,j=1, 2$ )  $w$ : 鉛直成分  
 $f$ : コリオリパラメータ  $g$ : 重力加速度  $C_s$ : 音速  
 $R$ : 気体定数  $\varepsilon_{ijk} = 1$  (正巡回),  $-1$  (逆巡回)  
 $dQ/dt$ : 加熱率  $C_p$ : 定圧比熱,  $C_v$ : 定容比熱  
 $H$ : 計算領域全体の高さ  $Z_s$ : 地面の標高  
 $Z$ : 鉛直座標

この方程式系は、気象学では非静水圧・弾性方程式系 (Nonhydrostatic, elastic equations) と称され、非圧縮性等の仮定を含まない最も一般的な式である。上式を導くにあたっては、圧力  $p$  および温度  $T$  を次式で定義される規準化圧力  $\pi$  と温位  $\theta$  でおきかえた。

$$\pi = \left(\frac{P}{P_{00}}\right)^{\frac{R}{C_p}}, \quad \theta = \frac{T}{\pi}, \quad P_{00} = 1 \text{ 気圧} \dots\dots\dots (5)$$

また、従属変数を適当な基本状態とそれからのずれに分離した。基本状態に関する変数を添え字 0 で、それからのずれを添え字 1 で表現すると、各変数は次のように分離される。

$$u_i = u_{i0} + u_{i1}, \quad w = w_0 + w_1, \quad \theta = \theta_0 + \theta_1, \quad \pi = \pi_0 + \pi_1 \dots\dots\dots (6)$$

ここでは、流速成分については、添え字 1 は省略してある。基本状態として、水平方向に諸性質が一樣な、温位が一定の静止大気を仮定した。基本状態では、規格化された圧力の鉛直分布は、次のようになる。

$$\pi_0 = 1 - \frac{gz}{C_p \theta_0} \dots\dots\dots (7)$$

支配方程式を基本状態とそれからのずれに分離するのは、時間積分の際の便宜を図るためである。式(4)において、 $D\alpha$  ( $\alpha$  は、 $u, v, w$  などの予報変数) は、サブグリッドスケールの乱流による拡散を表わしている。本研究では、乱流による運動量や熱の拡散は、渦粘性係数を用いる方法で取り扱っている。

### 3.2 時間積分法

圧縮性流体の方程式は、気象学上重要な擾乱の他に音波もその解として含む。音波は、気象現象の記述には不必要な雑音とみなされるが、その位相速度が大きい (20°C, 1 気圧で約 340 m/s) ため、支配方程式の差分法による数値積分の線形安定性の判定条件である CFL 条件は、

$$\frac{\Delta t}{(u+C)\Delta x} < 1 \quad (C \text{ は音速}) \dots\dots\dots (8)$$

となり、音波の存在によって時間ステップの大きさが著しく制約される。支配方程式を基本状態とそれからのず

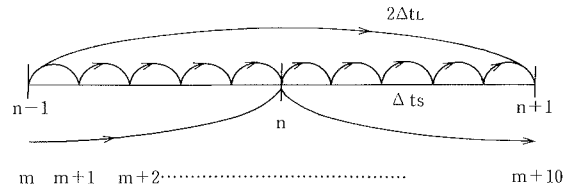


図-3 時間切断法による時間積分

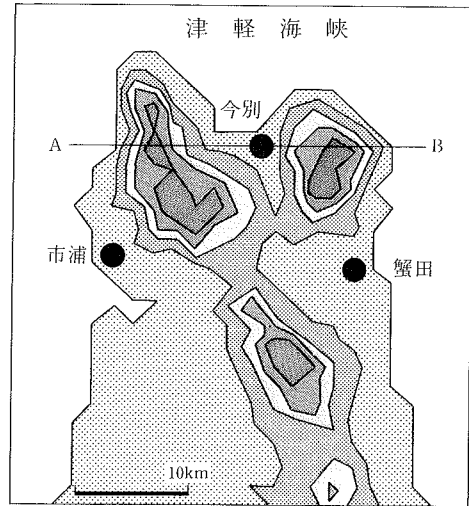


図-4 解析に用いた地形。  
 等高線の間隔は 100 m  
 ●は地域気象観測所の位置

れに分離したのは、音波と気象学的な擾乱との間の位相速度の違いを利用し、音波の発生に関与する項のみ短い時間刻みで積分し、それ以外はより長い時間刻みで積分するためである。このような方法は、時間切断法と称される<sup>4)</sup>。式(4)では、主に音波の発生に関与する項は、左辺にまとめてある。時間切断法では、予報変数の時間変化を計算するのに、左辺は短い時間ステップ  $\Delta t_s$  で更新させ、右辺は長い時間ステップ  $\Delta t_L$  で更新させる。長い時間ステップの積分を時間について中心差分で近似すると、時間切断法は図-3 に示したようになる。

### 3.3 計算メッシュおよび初期・境界条件

計算に用いたメッシュを巻頭カラーグラビアに示す。水平格子間隔は東西、南北両方向とも 2 km である。鉛直方向の格子間隔は不等間隔であり、最下層で 40 m である。ただし、スタガード格子を用いているので、水平風の最下計算レベルは、地上 20 m である。モデルの上限は地上 18 km にとつてある。地形は、国土地理院発行の 20 万分の 1 地形図 (青森) から、2 km メッシュ上に標高を読み取ったものを用いた。計算に用いた地形を図-4 に示す。実際の計算では、さらに外側に数値計算を安定に行うための領域が設けてあり、それを含め、全格子数は東西×南北×上下=50×50×40 である。計算は、当社のスーパーコンピュータ SX3-21R で行った。モデルは、計

算の高速化をはかるようコーディングされており、上記の格子数に対し、使用メモリが約65MB、実時間1時間の現象の追跡のCPU時間は約1,500秒であった。

計算領域に流入する一般風は、高さ方向に一律に10 m/sの地衡風を仮定した。ただし、地上付近の大気境界層では、地表面摩擦力と地球自転の転向力(コリオリ力)による影響で地衡風からのずれを考慮した風速分布とした。地衡風からのずれは、本モデルの鉛直1次元版によって計算した。境界層内の風のホドグラフを図-5に示す。矢印の先端の数値は地上からの高さ(m)を表わしている。1,020 m以上の高さの風は10 m/sの地衡風である。密度成層流体では、流れの性質は大気の鉛直方向の安定度に大きく依存する。大気の安定度は、温位の鉛直勾配で決まるが、ここでは、北半球中緯度における代表的な値である

$$\partial\theta/\partial Z = 3K/1 \text{ km} \quad \dots\dots\dots(9)$$

を初期条件における温位の鉛直勾配とした。

本モデルでは、物理的な境界は地表面のみであり、側面および上空は計算上必要な数値的境界条件である。計算領域の内部において物理的な信号として、あるいは数値計算上の雑音として生じる擾乱は、境界から計算領域外へスムーズに流出することが望ましい。そこで、上空10 km以上にレイリー摩擦型の散逸層を設けて計算領域上端での波の反射を押えるとともに、側面においては、いわゆる放射条件を適用して境界の影響を押えた。

#### 4. モデルによる津軽半島の風

##### 4.1 風速場に対する地形の影響

計算で得られた地形と風との関係を見るために、流入風が西風の場合の地上20 m、50 mおよび3,000 mにおける風の水平成分のベクトルを図-6に示す。地上20 mはモデルの風速の水平成分の最下計算レベル、50 mは、風車の中心の代表的な高さである。下の2つのレベルでは、流入風は西南西の風に近いが、これは、地表付近における風の地衡風からのずれによる。

計算領域内の風は、ここに示した各高さともに、地形の影響を大きく受けているのが分かる。地表付近では、風は、全体的に山を迂回するように吹いており、風向に対して平行に近い走行を持つ谷に沿って風速が大きく、縮流による風速増加が見られる。また、山稜を越える流れは、風上側の斜面において風速が小さく、風下側の斜面で高風速となっている。風下側斜面における風速の極大の出現は、いわゆる“おろし”として知られている現象に相当するものであると考えられる。おろしの代表的なものには、四国の瀬戸内地方に吹く強い南風であるやまじ風、琵琶湖西岸に吹く西風の比良おろし等がある。これらは、山稜の走行に対し直角に近い方向から風が吹く場合に、その風下側の山腹で強風となるものである。津軽半島の山岳は、四国を縦断する山脈や、滋賀県の比良山地と比べると規模ははるかに小さいが、計算結果は、同様の現象が起こり得ることを示している。

山を越える流れの鉛直構造を調べるために、図-4中の線分AB上の鉛直断面内の鉛直風速w、水平風速uの分布を図-7に示す。両者ともに、分布が山上で波状の構造をしているのがわかる。鉛直風速成分については、カラーグラビアにも示されている。カラーグラビアでは、赤い部分が上昇流、青い部分が下降流である。図の下部

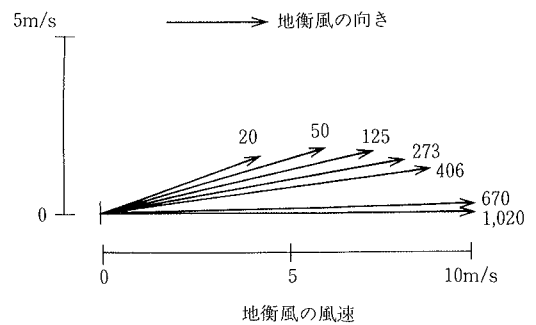


図-5 初期状態における大気境界層内の水平風のホドグラフ

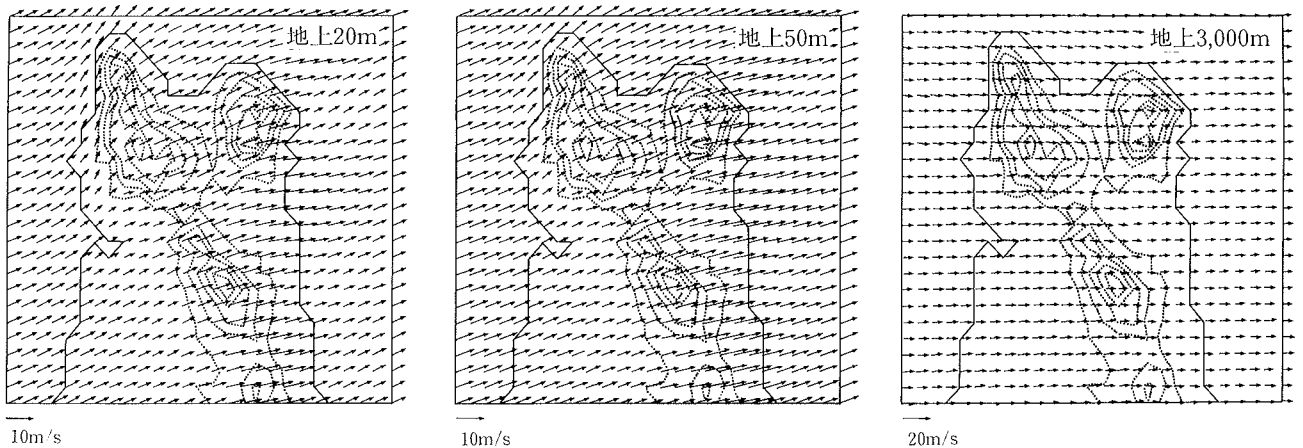


図-6 一般風が西風の場合の三つの高度(地上20 m、50 m、3,000 m)における水平風ベクトル

の黒い部分は地形断面である。図-7では、等位相線(図中の1点鎖線)は、上空に向かって風上側に傾いている。Shutt<sup>5)</sup>による英国本土を横断する流れの数値シミュレーションや、Clark and Miller<sup>6)</sup>の、ヨーロッパアルプスを越える流れの研究にも、本モデルで得られたものと非常に類似した波動が得られている。これから、風下側斜面の高風速の出現は、対流圏全体の高さに及ぶ現象の一部であることが分かる。このことは、山越え気流に関する従来の研究に示されている特徴が、本研究におけるモデルでも再現されていることを示すものである。

#### 4.2 地上における観測との比較

津軽半島では、風の定常観測は3箇所の地域気象観測所(AMeDAS)で行われている。地域気象観測所は、図-4に示すように、市浦、蟹田、今別である。風速の測定は、プロベラ型の風速計で地上6.5mで計測されており、その観測データは、気象月報として発行されている(本研究では、1987~89の3年間のデータを用いた)。そこで、モデルの妥当性は、この3地点の観測データとの比較によって評価することにした。モデルによる計算は、計算領域に流入する流れとして非常に理想化されたものを用いたため、解析で得られる風速比は、ある意味で長期的な平均状態を表すものと考えられる。風力エネルギーのプラント(風力発電所等)の建設地域、あるいは風の現地観測のサイトの選定では、ある特殊な状況における風の状況よりも、長期間にわたる風の平均的状态の把握の方が重要である。この意味で、モデルの妥当性の評価には統計操作をされたデータを用いることにした。

図-8は、天気図(1987~89)から上空の地衡風が北北西~西北西および東南東~南南東の時の、前述した3観測地点での最多風向および平均風速と、モデルにおいて、観測地点に最も近い格子点における風向・風速を比較したものである。風は、ベクトルで示されているが、風速については、観測・計算の両方とも蟹田における風速を1として規準化したものであることを注意しておく。従って、ここでやっているのは、風速については相対的な比較である。これらの観測所では、風速の測定高さが6.5mと低く、また、本解析は地面付近の分解能が不十分であるので、これらを考慮すると、絶対値を比較することは現段階では困難であると考えたからである。

図に示した6風向の風は、解析対象地域の主風向である。図によると、3地点間の風向・風速の相対的な関係が、モデルによって比較的良好に表現されているのが分かる。ただし、市浦では一般風が南南東の風の場合に、風向風速ともに計算と観測との間で、大きく食い違っており、また北北西の風の場合も対応がよくない。また、細部については、不一致の箇所がいくつか見られるが、これらは、観測点近傍の小地形等、観測点のおかれている条件が深く関わっているものと思われる。

しかしながら、本モデルは、津軽半島における地形と風との関係の大域的な様相を比較的良好に再現していると判断できる。

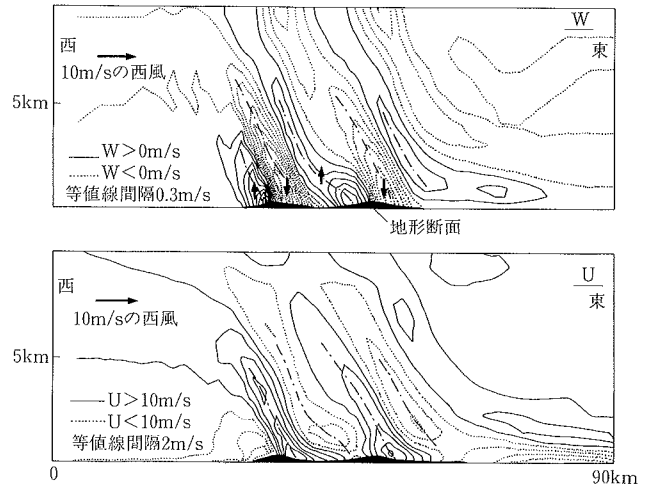


図-7 図-4中の線分 AB 上の鉛直断面内における鉛直風速 w と水平風速 u の等風速線図

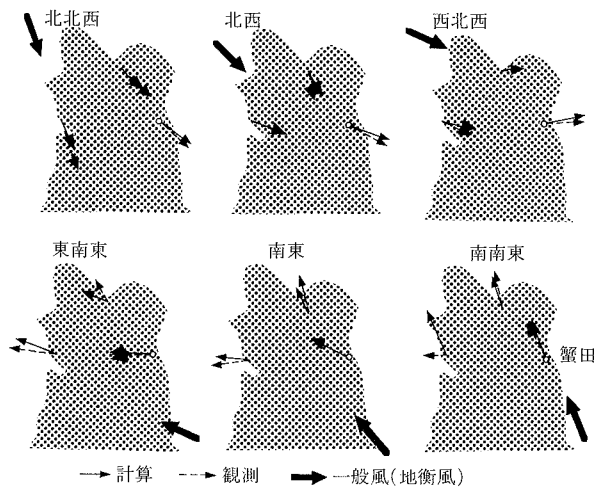


図-8 津軽半島における主要な風向に対する計算と観測との比較

#### 5. 風力エネルギーの賦存量評価について

第2章で述べた方法によって、青森県津軽地方の風力エネルギーの賦存量評価を行った。地上天気図の解析(気象年鑑1987~89年)によって得られた地衡風の風配図と風向別の平均風速を図-9に示す。津軽地方の一般風は、冬季に北西の季節風の影響を直接受けるため、北西を中心とする風向に大きな出現頻度がある。また、東南東を中心とする出現頻度は、夏の季節風による。

本研究で得られた、地上50mでの風力エネルギーの分布を図-10に示す。図は、風車の回転面の単位面積あたりに捕獲し得る風力エネルギー(W/m<sup>2</sup>)の年平均値を示している。風力エネルギーの分布は、地形の影響を反映してかなり複雑である。全体的に半島の東側においてその値が大きくなる傾向がある。前節において、山を越える密度成層流は、風下側の山腹斜面に強風をもたらす性質があることを述べた。津軽地方における一般風は、

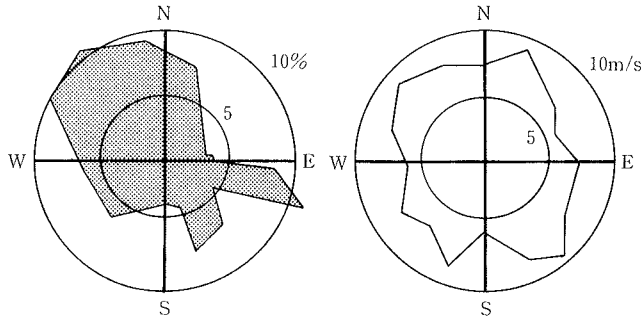


図-9 天気解析で得られた津軽半島付近の地衡風の風配図(左)および風向別平均風速(右)

風配図に示したように、年間では西から北北西にかけての風が多い。そのため、風力エネルギーの分布もそうした一般風の特徴を反映したものになっている。つまり、西から西北西にかけての風向に対して風下側になるのが半島東側であるからである。図中のAで示した箇所は、冬季にこの谷を吹き抜ける風が強いためであり、B、Cは、それぞれの西側にある半島を迂回してきた強風によってもたらされている。高エネルギー域が必ずしも山岳上のみではなく、地形が比較的緩慢なところにも出現しているのが注目される。

## 6. 結び

本研究では、3次元の地域気象解析モデルを用いて、青森県津軽地方の風力エネルギー賦存量の評価を行い、以下のことが結論づけられた。

① モデルによって、山を越える大気の流れの特徴が再現された。

② 青森県津軽半島における風力エネルギーの賦存量は、地形の影響でその分布は複雑であるが、標高が低く、地形が緩慢であっても賦存量の大きな箇所が存在することがわかった。

一般に、密度成層を考慮しなければならないような、広域の風の状況の把握においては、風洞実験が多少困難になるため、こうしたモデルの利用は今後とも増加すると思われる。ここで行った風力エネルギーの評価と、従来の他の方法との相互比較によって、評価精度向上をねらうのが今後の課題である。さらに、ビル風解析用の流体計算ソフトと結合することにより、風車直近の風況の

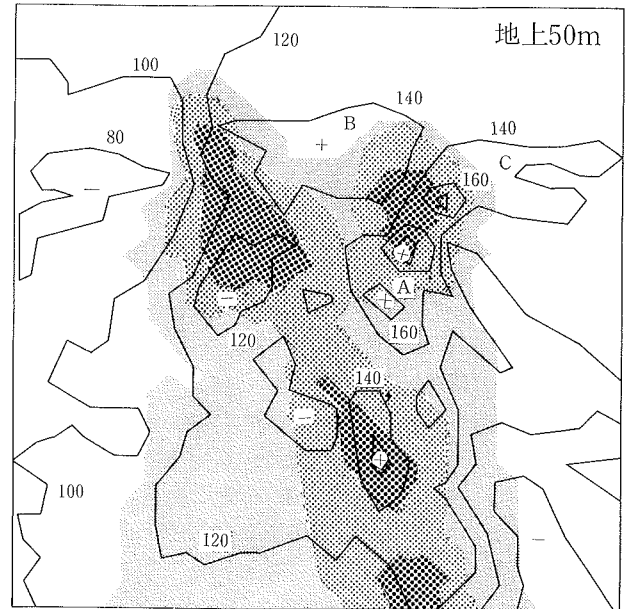


図-10 津軽半島の風力エネルギー賦存量の分布 ( $Wm^{-2}$ )  
+, - は極大・極小である

より詳細な解析へと発展し得るものと思われる。

## 参考文献

- 1) 猪股 登：竜飛ウインドパークの概要，風工学会誌，vol. 53, No. 10, p. 37～39, (1992)
- 2) 篠原美知夫，他：近畿地方における風力エネルギー賦存量調査結果について，日本太陽エネルギー学会，日本風力エネルギー学会合同研究発表会講演論文集，p. 267～270, (1992)
- 3) 本間琢也：風力エネルギー読本，オーム社，236 p., (1979)
- 4) Durran. D and J. Klemp: A compressible model for simulation of moist mountain waves, Monthly Weather Review, Vol. 111, p. 2341～2361, (1983)
- 5) Shutt s. G: Observations and numerical simulation of a partially trapped lee wave over the Welsh Mountains, Monthly Weather Review, Vol. 120, p. 2056～2066, (1992)
- 6) Clark. T and M. J. Miller: Pressure Drag and momentum fluxes due to Alps. II: Representation in large-scale atmospheric models, Q. Jour. Ray. Met. Soc., Vol. 117, p. 527～552, (1991)