

風力発電機の設置場所と地形

—— 半球の山 ——

大亀 衛・馬袋 真紀*・秋山 倫範*

岡山理科大学総合情報学部シミュレーション物理学科

*岡山理科大学理学部応用物理学科

(1997年10月6日受理)

摘 要

扱われた地形は半球の山と山裾に広がる地平面からなっており、山に向かって吹いて来る一様な風はこの地平面に平行である。この地形の周辺での風の様子が速度ポテンシャルやストークスの流れの関数から主として数値的に解析された。山頂上方付近に強風領域があり、山頂付近が風力発電機の設置場所である。そして、この設置場所は高い山ほど広く、山頂上方付近に現れるこの強風領域の風速は山に向かって一様に吹いて来る風の速さの1.5倍をこえない。更に、山頂上方の高さによる風速の変化は高い山ほど小さいから、大型の風力発電機の設置場所は高い山ほどよい。また、山頂上方付近の風速の観測所の位置は山裾の平地でもよい。

1. はじめに

風力発電機を設置するために、観測値を用いた工学的な風況の調査が行われている^{1),2),3)}。更に、流体の運動を支配する式のみを用いた理学的な風況の調査がなされている^{4),5),6),7),8)}。ここでは、この理学的な方法によって、新たな局所地形での風況が調べられる。

2. 基礎式と数値解

a) 基礎式

山裾に広がる地平面と半球の山からできている地形を考える(図1)。図1のように座標系 $O-XY$ をとり、そして一本の流線を考える。この流線上の任意の点 (X, Y) [極座標 (r, θ)] での風速を Q 、山頂からこの流線までの高さ h の点での風速 (この流線上での最大風速) を Q_T 、この流線上で山から遠く離れた前方の点 (X_0, Y_0) での風速を Q_0 とする。また、 a は山の高さ、 U は山裾に広がる地平面と平行に吹いて来る風の速さである。縮まない完全流体の渦なし流れとして速度ポテンシャルやストークスの流れの関数を用いると、この場合の風速と流線を表わす次の式が求められる。

$$\left\{ \begin{array}{l} 2.000\text{m/s} \leq U \leq 1.000 \times 10\text{m/s}, \\ X_0 = -1.000 \times 10^4\text{m}, \\ Y_0 \leq 1.000 \times 10^3\text{m}, \\ 3.000 \times 10^2\text{m} \leq a \leq 1.500 \times 10^3\text{m} \end{array} \right.$$

である。また、パラメーター U と Y_0 と a のうちの一つを変化させるとき、他のパラメーターの値は

$$\left\{ \begin{array}{l} U = 6.000\text{m/s}, \\ Y_0 = 6.000 \times 10\text{m}, \\ a = 9.000 \times 10^2\text{m} \end{array} \right.$$

である。

図2と図3はこのようにして得られた数値解である。

3. 考 察

a) 結果の妥当性と限界

ここでの結果は完全流体の運動を支配する式則ちオイラーの運動方程式と連続の式と状態方程式のうちの連続の式（非圧縮流体の渦無し流れのときにこの式からつくられる速度

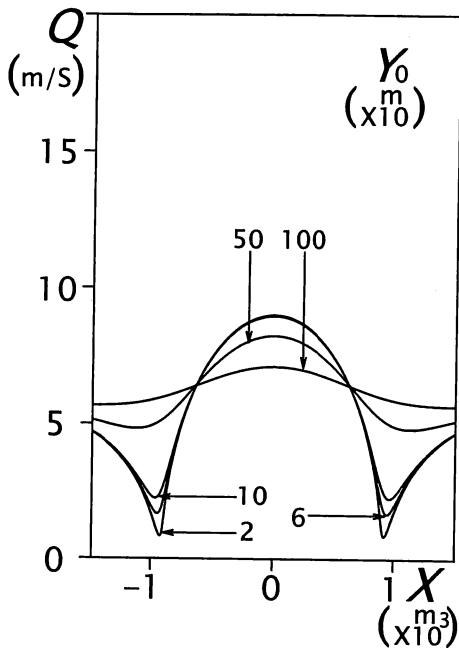


図2 風速 I
($U = 6.000\text{m/s}$, $a = 9.000 \times 10^2\text{m}$)

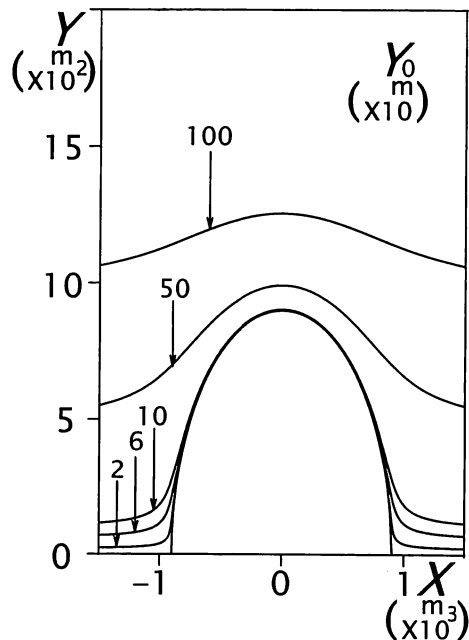


図3 流線 I
($U = 6.000\text{m/s}$, $a = 9.000 \times 10^2\text{m}$)

ポテンシャルのラプラス方程式)と状態方程式(非圧縮流体の軸対称流れのときに導入できるストークスの流れの関数を用いてつくられた式)から得られたものである。なお、オイラーの運動方程式は気圧を求めるときに使用される^{4),5),6),7),8)}。従って、縮まない完全流体の軸対称の渦無し流れであれば、ここでの結果は流体の運動を支配する式の解である。そして、ここで扱う現象の場合、流体の圧縮性は無視されてよい。更に、ここでのレイノルズ数は大きいから、流体の粘性の影響は小さい。従って、後流と境界層の渦領域を除いたところで、得られた結果は成立する⁹⁾。また、山頂付近の境界層の厚さは山裾でのそれよりも薄いから(図4, 図5), 得られた結果は山頂表面近くまで利用できる。

b) 風力発電機の設置場所と設置台数

山頂上方付近に強風が現れるから、山頂付近は風力発電機の設置場所である(図2)。そして、山に向かって一様に吹いて来る風の速さや山の高さが異なっても、このことはいえる(図6, 図7)。また、この風速の大きい領域は高い山ほど広いので(図7), 風力発電機の設置可能台数は高い山ほど多い。更に、流れの様子を表わす流線の形は山に向かって一様に吹いて来る風の速さに関係しないので(図8), 一度適正に設置された風力発電機の設置場所や風車の位置の風速の変化による調整は不要である。

c) 最大風速と得られるエネルギー

各流線上の最大風速は山頂上方に現れるが、これらの最大風速は計算上山頂面に近づくほど大きくなっている(図9, 図10)。そして、山頂での最大風速は山に向かって吹いて来

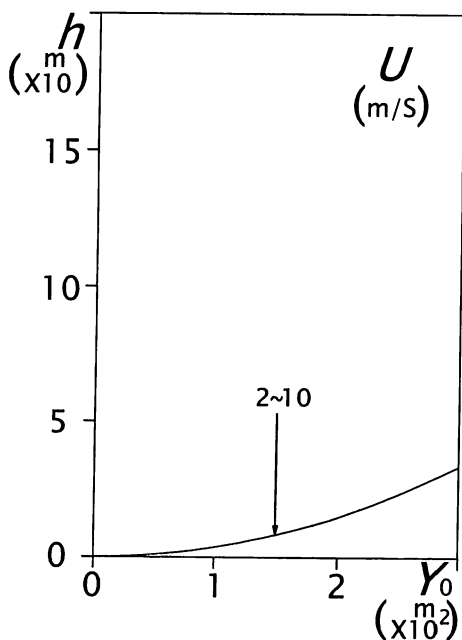


図4 最大風速の現れる位置 I
($a=9.000 \times 10^2 \text{m}$)

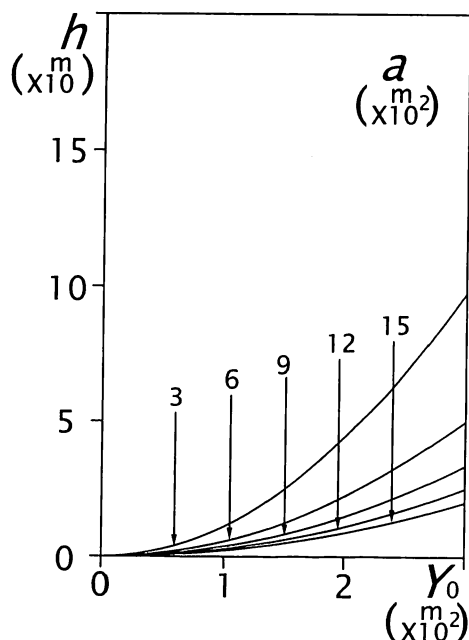


図5 最大風速の現れる位置 II
($U=6.000 \text{m/s}$)

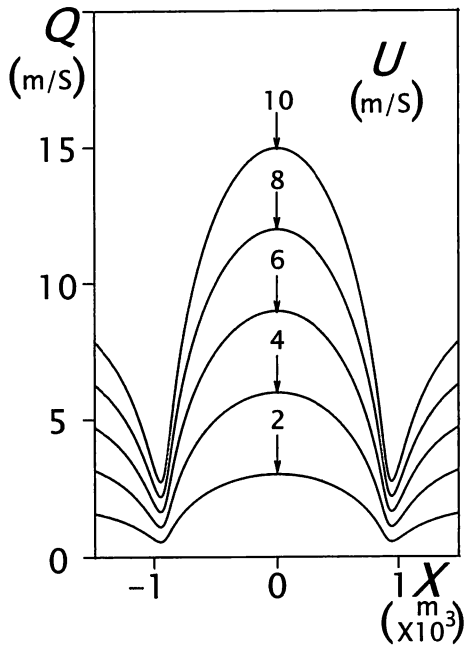


図 6 風速 II
($Y_0 = 6.000 \times 10 \text{ m/s}$, $a = 9.000 \times 10^2 \text{ m}$)

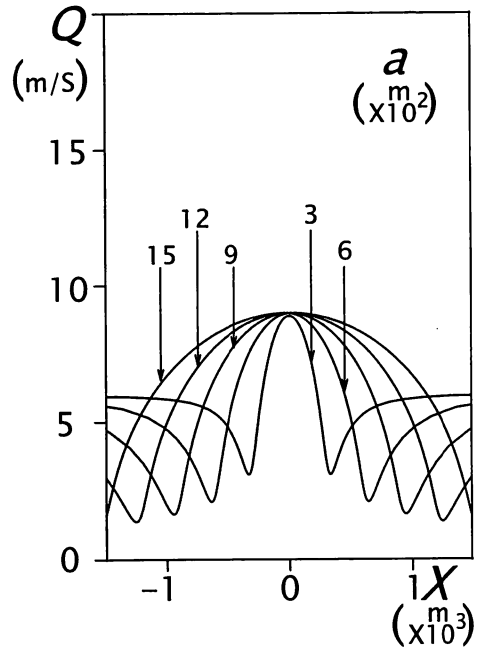


図 7 風速 III
($U = 6.000 \text{ m/s}$, $Y_0 = 6.000 \times 10 \text{ m}$)

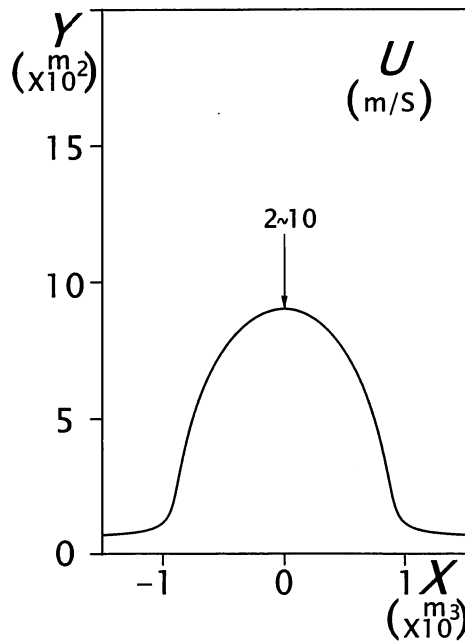


図 8 流線 II
($Y_0 = 6.000 \times 10 \text{ m}$, $a = 9.000 \times 10^2 \text{ m}$)

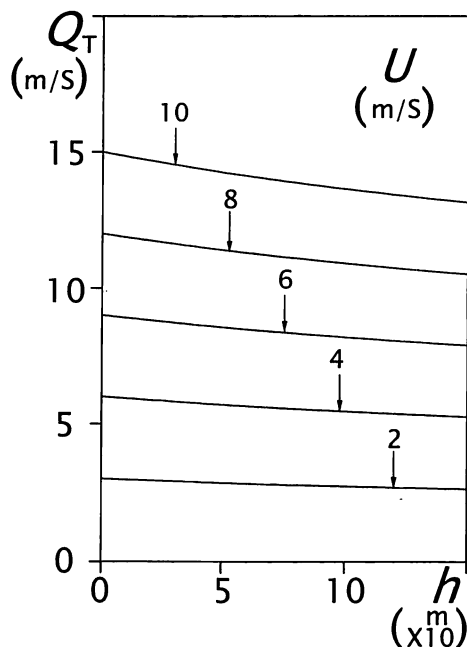


図9 最大風速 I
($a = 9.000 \times 10^2 \text{m}$)

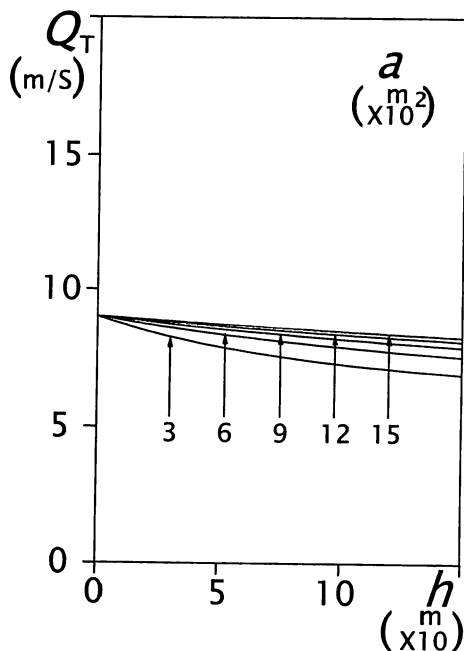


図10 最大風速 II
($U = 6.000 \text{m/s}$)

る一様な風の速さの1.5倍になっている。従って、山頂上方付近で多量のエネルギーが得られるけれども、山頂に設置された1台の風力発電機から得られるこのエネルギーは山裾に広がる平地に設置された同じ風力発電機の $(1.5)^3 \approx 3.4$ 台から得られるエネルギーをこえられない。そして、これらのことは山に向かって吹いて来る一様な風の速さや高さに関係しない。

d) 風車の大きさ

風車の上端部分と下端部分に当たる風の速さの差が大きいと、装置の疲労が大きくなる。山に向かって吹いて来る風の速さが大きいと、この風速の差が大きくなる(図9)。また、山が低くても、この差は大きくなっている(図10)。従って、このようなとき、装置の疲労という面から考えると小型風車をもっている風力発電機の設置がよい。これに対して、山に向かって吹いて来る風の速さが大きくない場合や山が高い場合、この風速の差は小さい。従って、このようなとき、大型風車をもっている風力発電機の設置がよい。

e) 風速の観測所

山頂で風車に向かって吹いて来る風の速さを直接測定することは一方好ましいことであるが、他方多くの場合生活条件の悪いところであるから問題が多い。山の上の風速は風速を表わす式からいえるように山に向かって一様に吹いて来る風の速さに比例しており(図6)、風の様子を表わしている流線の形はこの風の速さによって変化しない(図8)。従って、風速の観測所の設置場所は山裾に広がる平地でもよい。

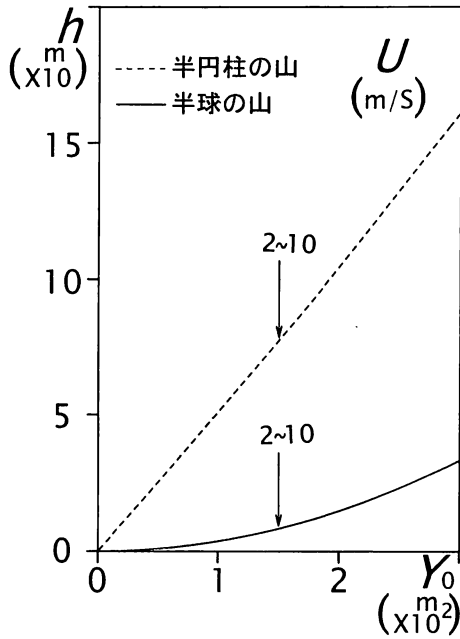


図11 境界層の厚さの対比 I
($a=9.000 \times 10^2 \text{m}$)

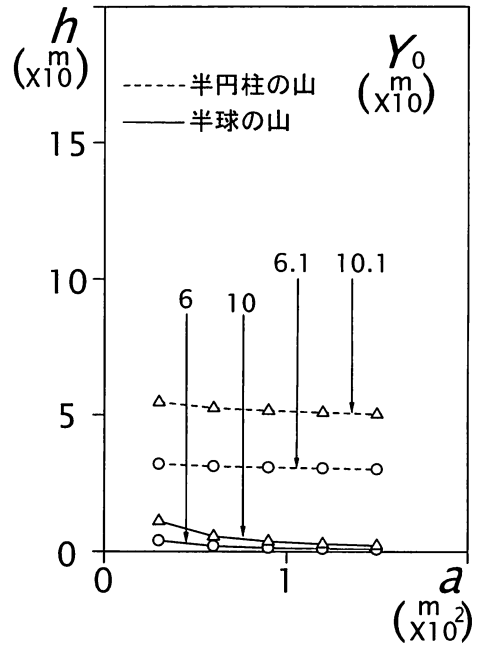


図12 境界層の厚さの対比 II
($U=6.000 \text{m/s}$)

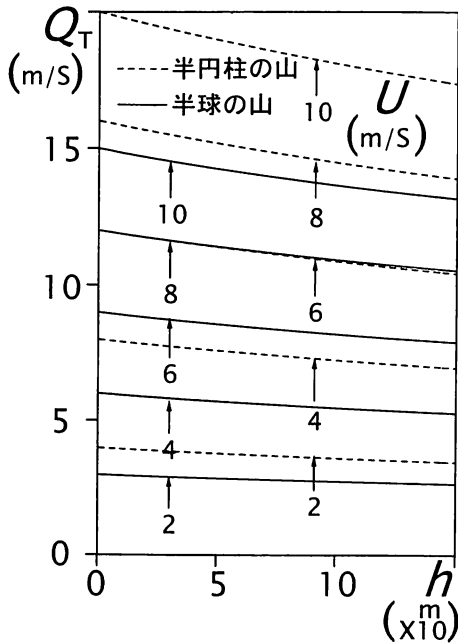


図13 最大風速の対比 I
($a=9.000 \times 10^2 \text{m}$)

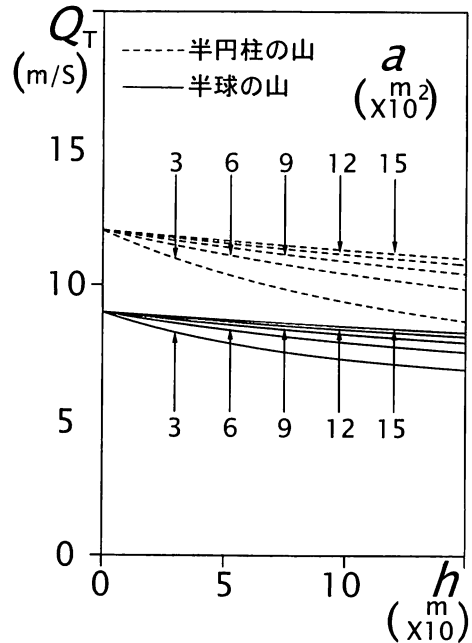


図14 最大風速の対比 II
($U=6.000 \text{m/s}$)

f) 半円柱の山（二次元的）での結果⁹⁾との比較

半球の山の周辺に現れる風の速さの最大値は山に向かって吹いて来る風の速さの1.5倍であり、半円柱の山のそれは2.0倍である。そして、計算上でのその位置はともに山頂である（図2，図6，図7，図9，図10，図13，図14）。従って、山頂付近が風力発電機の設置場所であり、多量のエネルギーがここで得られる。けれども、半球の山頂に設置された1台の風力発電機から得られるエネルギー量は山からはなれた山裾に広がる平地に設置された同型の風力発電機3.4（ $\approx 1.5^3$ ）台から得られるエネルギー量より少なく、半円柱の山でのそれは8（ $= 2^3$ ）台から得られるエネルギー量を越えない。また、半円柱の山の風力発電機の設置場所は半球の山のそれと比較して円柱軸方向に広い。

半球の山の周辺の風の様子は山に向かって吹いて来る一様な風の速さによらない（図8）。また、山の周辺の風の速さは山に向かって吹いて来る一様な風の速さに比例している（図6）。これらのことは半円柱の山でもいえる。従って、半球の山でも半円柱の山でも、風速の観測所は山からはなれた山裾に広がる平地に設置されてもよい。

風力発電機はどちらの山でも設置可能である。けれども、境界層の厚さを考えると、山に向かって吹いて来る一様な風の速さや山の高さに関係なく小型風車をもっている風力発電機の設置場所は半球の山の山頂付近である（図11，図12）。更に、得られるエネルギーの量を考えると、山に向かって吹いて来る一様な風の速さや山の高さに関係なく大型風車をもっている風力発電機の設置場所は半円柱の山の山頂付近である（図13，図14）。

また、山に向かって吹いて来る一様な風の速さが大きいときや山が低いとき、山頂上方の風速の一様性がゆるんでいる（図13，図14）。従って、このとき装置の疲労に関する問題が生じる。

4. む す び

いろいろな形の山を考えてその周囲の風速と流線を求め、更に風力発電機の設置場所を探したい。

参 考 文 献

- 1) 長井 浩：第12回風力エネルギー利用シンポジウム，pp.45-60，1990.
- 2) 松坂知行：第13回風力エネルギー利用シンポジウム，pp.64-77，1991.
- 3) 東野政則：第15回風力エネルギー利用シンポジウム，pp.20-34，1993.
- 4) 大亀 衛・三宅幸治・村上耕一：日本風力エネルギー協会誌，pp.69-72，1993.
- 5) 大亀 衛・上畑耕二：日本風力エネルギー協会誌，pp.46-50，1994.
- 6) 大亀 衛・北川 勉：第16回風力エネルギー利用シンポジウム，pp.95-98，1994.
- 7) 大亀 衛・岩井 洋・清田知弘：岡山理科大学紀要，第31号，A，pp.91-97，1996.
- 8) 大野朋美・西川嘉範・大亀 衛：岡山理科大学紀要，第31号，A，pp.99-105，1996.
- 9) 今井 功：流体力学（前編）（KK裳華房，東京）12版，pp.2-5，1984.

The Setting-place of a Wind Turbine and its Natural Features —— Hemispherical Mountain ——

Mamoru OHKAME*, Maki BATAI and Mitinori AKIYAMA

**Department of Simulation Physics Faculty of Informatics*

Department of Applied Physics Faculty of Science,

Okayama University of Science,

Ridai-cho 1-1, Okayama 700-0005, Japan

(Received October 6. 1997)

The setting-place chosen for this investigation is the area formed by a hemispherical mountain and flat ground. Constant winds blow parallel to the flat ground. The state of the winds around the setting-place is numerically analyzed mainly using the velocity potential theory and the Stokes's stream function. Around the top of the mountain is a place where strong winds rise. Therefore, the setting-place of the wind turbine should be near the mountaintop. And the higher the mountain is, the broader the wind-blown area is. Winds blow most strongly at the mountaintop. The wind velocity around the mountaintop is at most less than 1.5 times the velocity of the winds blowing constantly to the mountain. Again, the higher the mountain is, the smaller the changes in the wind velocity above the mountaintop. Therefore, higher mountains are suitable for setting a large-sized wind turbine. And, the observatory to record changes in wind velocity can be located on the flat ground at the foot of the mountain.