

# 地形による風の変形に関する研究

- 女木島と鳴門海峡における強風の数値シミュレーション -

A study of modification of wind over complex terrain  
Numerical simulation of strong wind at Megi Island and the Naruto Strait

香川大学大学院 教育学研究科 教科教育専攻 理科教育専修

Graduate School of Education, Kagawa University  
Curriculum Study Course of Natural Sciences

吉田 真純

Masumi Yoshida

## 要旨

風が地形の起伏によって影響を受け変形することは、風環境を考える際に重要である。特に起伏のある地形上に構造物などを建設する際には、地形による風の局地的な増強を無視することはできない。風の局地性を研究する手法としては、現地観測、風洞実験、数値実験がある。本研究では地形が比較的単純な地域で局地的な強風が観測されている女木島周辺および鳴門海峡を対象として、数値実験で強風の発生メカニズムについて調べることにする。

女木島は比較的単純な形をしているため、地形の特徴を簡単な立体図形の組み合わせで表現することができる。そこで、立体図形で実地形に近い地形を作り、その形を変えることにより、冬の季節風時に島の風下側になると思われるところで発生するオトシの発現に効いている女木島の地形を特定することにした。その結果、西よりの季節風が吹くときに、直線状に伸びる島の稜線が風向に直角になる方向から少しずつ南西 - 北東方向に伸びていることや島の稜線の高さで決まる山の斜面の傾きが適当であることなどが「オトシ」の発現に効いていることが分かった。

鳴門海峡の解析では実地形を用いて数値実験を行い、現地観測や風洞実験との結果と比較を行った。その結果、海峡中央部分で風速が増強され、また岬の先端や稜線上で風が増強されていることがシミュレーションでも明らかにされた。しかしながら、現地観測で求められている地形増強率を数値シミュレーションによる結果と比較すると数値シミュレーションによる結果は小さいことが分かり、狭い範囲で生じていると考えられる地形増強を数値シミュレーションで再現することはさらに検討を要することが分かった。

# 目 次

1. はじめに .....	1
2. 数値シミュレーション .....	1
2.1 使用モデル .....	1
2.2 境界条件 .....	1
2.3 数値実験の手法 .....	1
3. 女木島の局地的強風「オトシ」の解析	
3.1 女木島の地形 .....	3
3.2 女木島の強風（オトシ） .....	3
3.3 これまでの研究 .....	4
3.4 オトシに寄与する地形の効果 .....	6
3.4.1 三角柱状地形 .....	6
1) 数値実験の設定条件 .....	6
2) 島に当たる風（風向）の影響 .....	7
3) 島の高さの影響 .....	7
3.4.2 理想女木島地形 .....	8
1) 理想女木島地形の概要 .....	8
2) 数値実験の設定条件 .....	10
3) 季節風が西風時のオトシ .....	10
4) オトシに与える鷲ヶ峰の影響 .....	10
5) 三次元流跡線解析 .....	12
3.5 オトシ発生に寄与する地形の考察 .....	12
3.6 「オトシ」解析の今後の課題 .....	14
4. 鳴門海峡の局地的強風の解析	
4.1 鳴門海峡の地形 .....	15
4.2 鳴門海峡の強風 .....	16
4.3 現地観測の結果とこれまでの研究 .....	16
4.4 PHOENICS による数値実験 .....	18
4.4.1 計算領域と数値実験の設定条件 .....	18
4.4.2 鳴門海峡の風況（region 1） .....	18

4.4.3	海峡に突き出る岬の風況 (region 2) .....	26
1)	孫崎 (四国側大毛島の岬) .....	26
2)	門崎 (淡路側淡路島の岬) .....	33
4.4.4	地形増強率 .....	43
4.4.5	門崎先端付近の風況 (region3, 4) .....	44
4.4.6	理想門崎によるシミュレーション .....	44
4.4.7	門崎での風の鉛直プロファイル .....	48
4.5	鳴門海峡での考察とまとめ.....	49
4.6	「鳴門の強風」解析の今後の課題.....	49
5.	まとめと考察 .....	50
	謝辞 .....	50
	参考文献 .....	50

## 1. はじめに

風は地形の起伏によって影響を受け変形するため、構造物などを建設する際には、風の局地性を考慮しなければならない。特に海峡や丘陵、谷などではある条件下で風速の増強が生じるため、地形と風の関係についてこれまで様々な研究が行われている（光田，1978）。

風の地形による変形の研究には、現地観測や風洞実験、数値シミュレーション等の方法がある。現地観測は最も信頼のおける方法である。しかしながら、複雑な地形上での観測は、観測点の配置や観測装置の維持などに困難を伴う。また、風洞実験は風洞中の風と実際の風との対応関係を表す相似則の問題がある。数値実験は計算手法の開発や計算機の問題がある。ただ、数値実験についてのこれらの問題は、近年大きく改善されており、風洞実験に変わる研究方法として注目されるようになった（石原，2002）。数値実験により、地形の影響を受けた風がどの程度再現されるかについては、最も信頼性のある現地観測や任意の地点でデータの得られやすい風洞実験、数値実験の結果を比較しながら多角的に現象を捉えることが重要と考えられる。

そこで、本研究では地形によって変形を受けた風の影響、特に風速の増強に注目し、これまで現地観測が行われ実測データのある女木島の局地的強風「オトシ」と鳴門海峡の強風を対象にして、数値シミュレーションを行い、これまで行われた現地観測や風洞実験等と比較しながら、この現象のメカニズムや特徴について調べることにする。

## 2. 数値シミュレーション

### 2.1 使用モデル

本研究では、CHAM (Concentration, Heat & Momentum Limited) 社開発の PHOENICS (Parabolic, Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series : 汎用熱流体解析コード)を使用した。

### 2.2 境界条件

非圧縮性流体の定常流で計算を行った。地表面については、より実際の気環境に近づけるため non-slip 条件とした。ただし、今回用い

た計算方法では海面と陸面で粗度を区別することができなかったので、摩擦条件は同じとしている。上流の風の鉛直プロファイルについては、次式のべき分布の式

$$u = u_1 \left( \frac{z}{z_1} \right)^\alpha$$

を使ってその高度の風速  $u$  を与えた。この式の  $u_1$  は基準高度  $z_1$  における風速を示し、 $\alpha$  はべき指数を示す。なお、使用した  $z_1$ 、 $u_1$ 、 $\alpha$  の値については、後ほど各地形ごとの解析で詳しく述べることにする。

### 2.3 数値実験の手法

地形の影響を受けた風についての数値シミュレーションは、その目的によって以下のように大きく三つに分けられる（田村，1996）。

- 基準との比較：幾何形状を変えたときの増幅率を求めるシミュレーション
- 風洞実験との比較：基本形状を対象にしたシミュレーション
- 実測との比較：実地形を対象にしたシミュレーション

地形の影響を受けた風の特性を調べる時には、 $\alpha$  の実地形を対象にしたシミュレーションを行わなければならないが、風が実地形のどのような形状、特徴によって変形を受けているのか考える場合、 $\alpha$  の実地形を簡単な立体図形に置き換えてシミュレーションが行われる。 $\alpha$  は建築物などを設計する際に、変形を受けた風によってどのような影響が建物に及ぼされるかを考えるときに有効である。本研究では主に  $\alpha$  と  $\alpha$  のシミュレーションを行い、風が地形によってどのように変形するかについて数値実験を行う。

複雑な地形が関係しておこる現象について数値実験を行う場合にはその地形を正確に再現する必要がある。そこで、本研究では国土地理院発行の 50m メッシュ標高データを用いた。ただ、この 50m メッシュデータは等緯度、等経度間隔であり、正確に等間隔の 50m メッシュデータとなっていない。そのため、Nearest neighbor 法による補間を行い、等間隔の 50m

データにしたうえで数値計算に使用した。

50mメッシュよりもさらに細かいメッシュを必要とする時には、Surface 法 (GMT:Generic Mapping Tool の機能)を用いて補間を行い、必要なデータに変換した。

本研究では風向の設定は、再現する地形のほうを任意の角度に回転させ、X 軸に平行な方向に風を吹かすことで行った。

なお、計算領域やその他の条件については、後で各地形ごとに述べる。

### 3. 女木島の局地的強風「オトシ」の解析

#### 3.1 女木島の地形

図1に示すように、備讃瀬戸に浮かぶ女木島は香川県高松市に属し、高松港から沖合4kmの位置にある。島の地形図及び断面図を図2に示す。島の南半分は南西-北東方向に幅600~700mで約2km細長く伸びた形(A-C)をしており、南端近くには標高216mの島の最高点(B地点)がある。北半分は標高187mの鷲ヶ峰(D地点)とそれに連なった小地形がある。鷲ヶ峰の南側は谷(C-D間)となっている。島の北端から南端までの稜線に沿った長さは約3.7kmで、島で最も幅が広がる西浦海岸から東浦海岸の幅は約1.1kmとなっている。なお、女木島の地形は、南半分(B-C)は三角柱状(屋根型)それに続く先端付近は円錐を半分にした形をしている。C点付近は小さな円錐状をしている。北半分の鷲ヶ峰付近(D)は楕円錐で比較的単純な形状をしている。



図1 女木島の位置と周囲の地形

東側にある東浦(図2参照)で霧状の海水の飛沫を伴って吹く。しかも、その風向は南から南西である(青山, 1991)。実際、女木島の東浦地区には、図3に例を示すようにオトシやそれに伴う霧状の飛沫から家屋を守るためにオーテと呼ばれる石を積み上げて作ったこの地域特有の防風垣が築かれており、そのほとんどが南方向を向いている。オーテは海岸線沿いに並び、高さは3~4mのものが多く、女木島では東浦地区だけに見られ西浦地区では見られず、隣の男木島や他の瀬戸内海の島嶼では見られない(青山, 1991)。これまで「オトシ」の発

#### 3.2 女木島の強風(オトシ)

女木島では、冬季冬型の気圧配置が強まる時に「オトシ」と呼ばれる局地的強風が吹くことが知られている。冬型の気圧配置が強まる場合、瀬戸内地方では西よりの季節風が吹くが、「オトシ」は風上にある西浦(図2参照)ではなく、

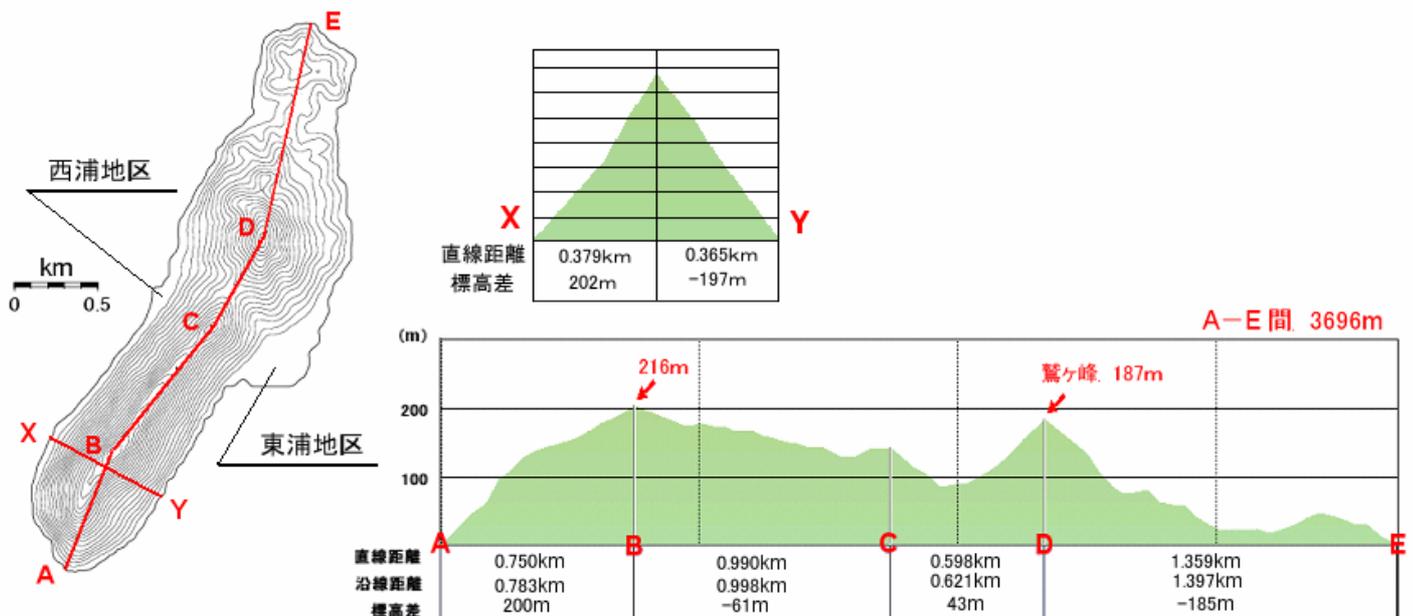


図2 女木島の地形断面図(A-Eは島の稜線に沿った断面。X-Yは島の最高点付近を通る直線の断面)

生原因は何らかの島特有の地形による効果で、西よりの冬季季節風が曲げられ南よりの風となって吹くと説明されてきた。しかし、これらの根拠は示されていない。また、このように特異な大気現象で、島の住人の生活に対しても大きな影響を与えているにも関わらず、最近まで定量的な観測や研究がなされていなかった。

### 3.3 これまでの研究

オトシについては、青山（1991）にその発生原因の諸説の記述があり、渡邊（2003）、渡邊・森（2004）でオトシの実態を捉えるための定点観測やオトシ発生時の風の移動観測、数値実験によるオトシの再現が試みられている。これらの研究により、最近徐々にオトシの発生メカニズムなどが明らかになりつつある。そこで、ここではこれまでの研究成果について説明する。

オトシの発生原因については、青山（1991）で以下のように紹介されている。

女木島に吹き付ける西風は、山の斜面を駆け上がり、東浦の上空で複雑な気流を作り、海上に吹き降ろして海面をたたき、水沫を吸い上げながら風向きを変え、南から集落を襲う。

冬になると北西の季節風が山頂にあたり方向を変えて吹き降ろしてくる。

（高松市教育委員会、オーテ説明板）

両方ともに、オトシは冬季季節風が女木島の地形効果によって向きを変えられ、東浦に吹き付ける風とされている。また、の説明では地上付近の風が山脈上の山を越え、島の風下側海面に達してから南よりに曲げられるとあり、の説明では山頂辺りの風が山頂に当たった時に向きを変えられ、地形に沿って下降し、海面に達してから東浦に吹き付けるとしている。

しかし、これらの説明は不明な点も多く、根拠も示されていない。そこで、渡邊（2003）では、オトシの実態を捉えるために女木島に3台の風向風速計を設置し、冬季西よりの季節風が吹く2002年12月5日～2003年3月4日の約3ヶ月間定点観測を行っている。図4は観測地点の位置と標高、図5はオトシの観測結果である。この観測では、オトシの発生する東浦



図3 東浦地区のオーテ（防風垣）  
写真は海岸沿いのもので、高さが約4mある。

と、それと比較するため鷲ヶ峰山頂付近の展望台、西浦に観測定点を設置している。図5で示

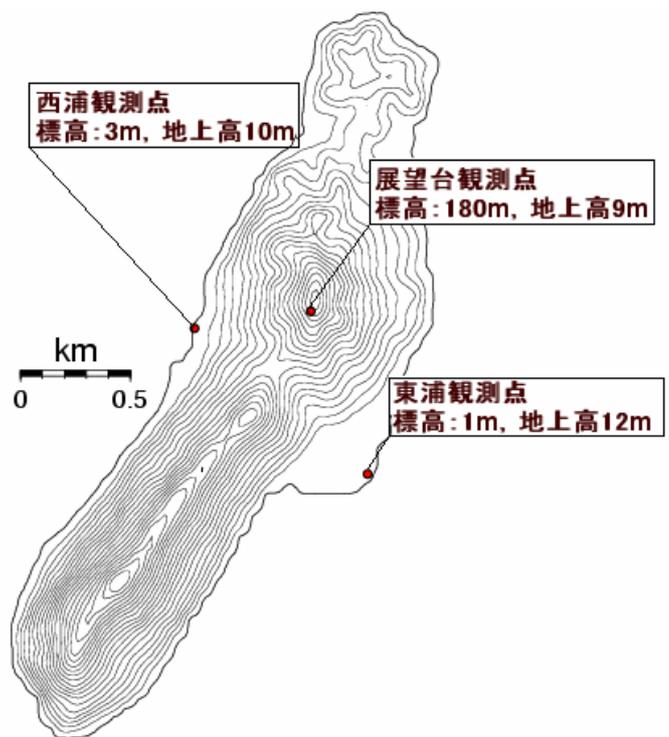


図4 観測地点の位置と標高  
（地上高は地上から風向風速計のセンサーの高さである）

した観測データは、2003年1月27日16時50分～1月28日2時50分に発生したオトシについてである。図中では、その期間を通しての平均風向・風速と、その期間内における最大瞬間風速  $V_{max}$  と最大平均風速  $V$  を示している。平均風向・風速をみると、西浦観測点で11.0m/sの西南西の風が吹いているのに対し、東浦観測点では14.2m/sの南西風が吹き、標高の高い展望台観測点（風向：西、風速14.5m/s）と同程度となっている。さらに、最大瞬間風速をみると西浦22.2m/s、展望台28.5m/s、東浦

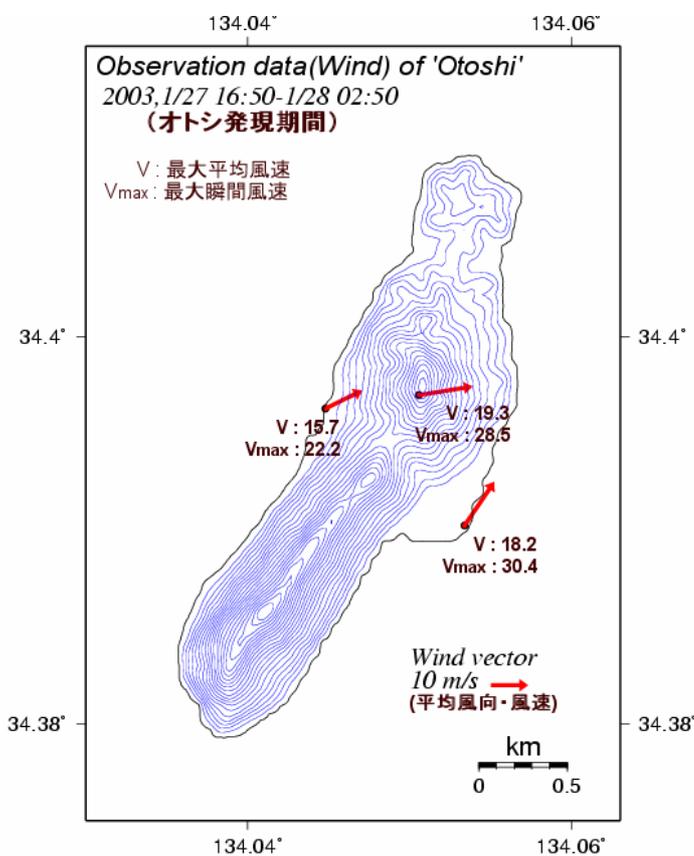


図5 オトシの観測結果

図中の矢印はオトシ発現期間中の平均風速と平均風向である。なお、VとVmaxは同起時である。

(渡邊, 2003の観測データを基に作成)

30.4m/sで東浦の値が一番大きい。季節風を受ける風上側の西浦は、西よりの風であるのに、風下側の東浦は南西風である。これらの他、観測からは、オトシは季節風の風向が西南西～西の時に起こりやすく、風向は南西～南であることが明らかにされている。

現地観測の他に渡邊(2003)では数値実験が行われている。使用モデルや境界条件等は、本研究で行った数値実験と同じである。地形データも本研究と同じ国土院の50mメッシュ標高データを使用している。風向が西の場合について、高度10mの風の場合を図6に示す。図を見ると、島の西側では一様な西風がみられるが、島の東側の海域では、島を回り込むような南西風が分布しているのが分かる。これは、東浦における観測データや海面の状態の目視観測ともよく一致する結果となっている(渡邊, 2003)。

なお、渡邊(2003)では、定点観測、移動観測、数値シミュレーションなどから、最終的にオトシ発生のメカニズムについて大まかには以下のように考察している。

オトシの発生条件は、冬季日本付近を低気圧が通過し、冬型の気圧配置が強まり、瀬戸

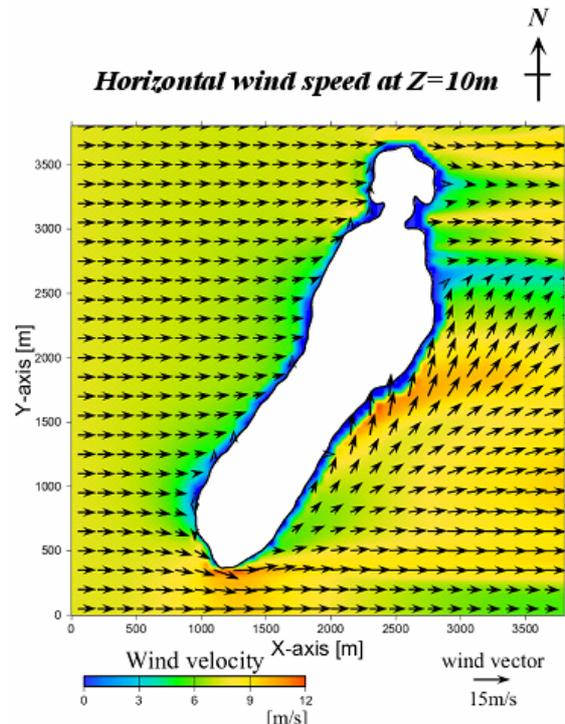


図6 季節風が西風時の高度10m風の場  
水平風の風向風速をベクトル、風速分布をシェードで示してある。(渡邊, 2003より引用)

内で西南西から西風が卓越する時、女木島の東浦集落で南西から南南西の強風であるオトシが吹く。

オトシは、シミュレーション結果などから、女木島南端付近の南側に突き出した斜面に当たった風が引き起こしていると考えられる。この島南端付近の風上側では、やや北寄りに風向を変えながら地形上昇し、峰付近まで上昇する。そして、島の風下側に移ると風向を南寄りに変えながら斜面を下降し、地表面に吹き降ろす。この気流が島の走行に沿った向き、つまり、南西方向から東浦に向かって吹き付ける。しかし、東浦より北東側では徐々に風が弱まる。季節風の風向が西南西や西の時、流跡線解析から高度50～60mの気流がオトシとなって吹き降ろす。

オトシのメカニズムは少しずつ明らかになっていると考えられる。研究から、オトシの発生に島の地形が関係することは明らかであるが、島の地形のどのような効果によるものか、未だ調べられていない。そこで、今回島の地形のどのような要素が「オトシ」の発生に関係するののかについて、数値シミュレーションでさらに詳しく調べることにする。

### 3.4 オトシに寄与する地形の効果

島の地形のどのような要素が「オトシ」の発

生に関係しているかを調べるため、2.3節の基本形状を対象としたシミュレーションを行った。女木島は島の地形の説明でも述べたように、比較的単純な形をしているため、地形の特徴を簡単な立体図形の組み合わせで表現することができる。そこで、立体図形で実地形に近い地形を作り、その形を変えることによりオトシの発現に効いている女木島の地形を特定することにする。そして、このシミュレーションでは、島に当たる風の影響等も併せて検討することとする。なお、これ以降、立体図形を組み合わせた女木島を理想女木島地形と呼ぶ。

### 3.4.1 三角柱状地形

まず、第一次近似として、女木島の地形を断面が三角形をした三角柱状の地形で表すことにする。そして、この地形を使って島に当たる風の向きの影響や島の高さの影響などについて調べる。

の水平方向、鉛直方向の長さは、実際の女木島にほぼ近いものになるように設定した。計算領域は、三角柱状地形の中心をほぼ領域の中心とする 3950m四方とし、鉛直方向は 400mである。座標系は直交座標、水平格子間隔は 50m × 50m、鉛直方向の格子間隔は 10mで計算格子は 79 × 79 × 40 である。境界条件に関する風の鉛直プロファイルを与える、べき分布の式のパラメータはそれぞれ  $z_i=10\text{m}$ 、 $u_i=10\text{m/s}$  とし、 $\alpha$  の値は海上の風を表す  $\alpha=1/10$  を使用している。

島に当たる風の向きの影響を調べるために、風向を西風として、島の稜線の方角を、風向に対して直角になる方向(南北方向)から時計回りに 22.5° ずつ回転させて数値計算を行った。そして、島の高さの影響を調べる際には、回転させた三角柱状地形を使用し、標高を 220m より高いものと低いものに設定して数値計算を行った。

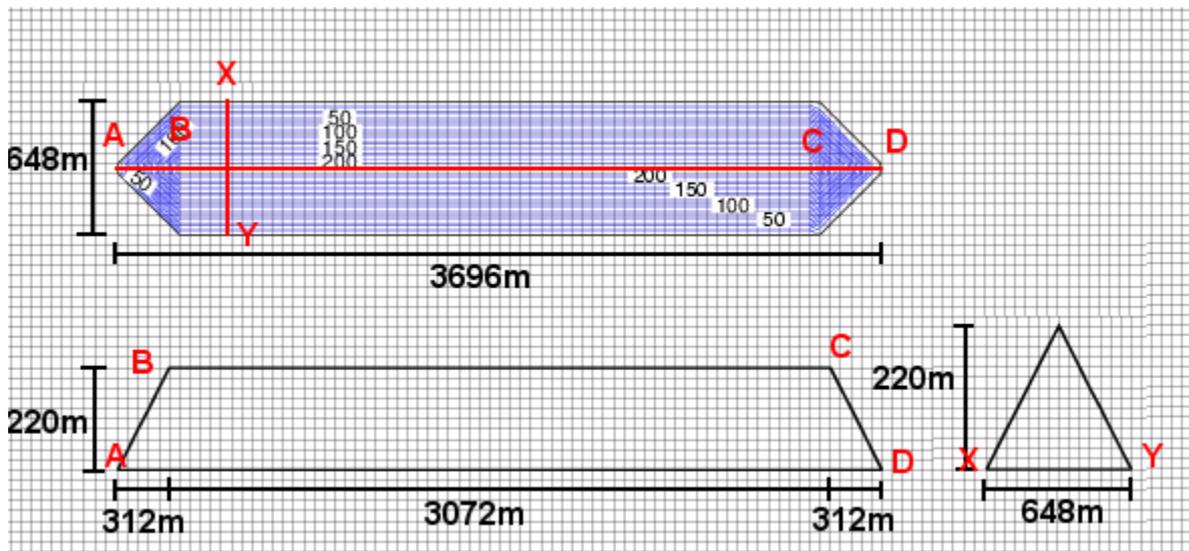


図7 三角柱状地形の形状

#### 1) 数値実験の設定条件

図7は、作成した三角柱状地形を示す。地形

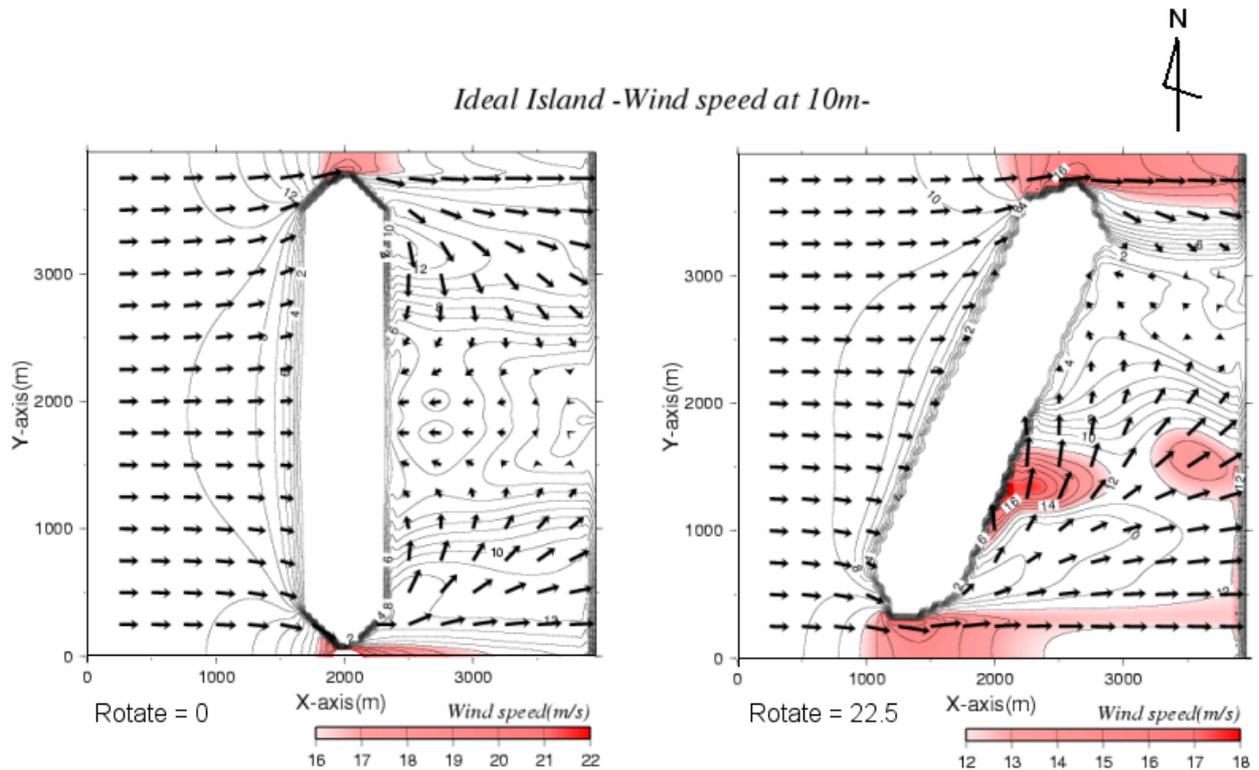


図8 高度10mにおける水平速度場（右図がN-Sから0°、左図がN-Sから22.5°のもの）  
 コンターは1m/sごとで風速の分布、強風域（右図16m/s以上、左図12m/s以上）はシェードで示してある。

## 2) 島にあたる風（風向）の影響

図8は、風向別のシミュレーション結果のうち、稜線の方向が南北方向0°と22.5°である場合である。稜線が南北方向(0°)の場合(図8左)、風上側の三角柱状地形西側は一樣な西風となっているのに対し、風下側の地形東側は風速が弱い領域が現れ、強風域が現れていない。強風域は、島の南端及び北端にのみ現れている。これは、風が島を通過する時、北端及び南端では風が先端で収束して風速が増強されるものの、風下側では地形の遮蔽効果によって風速が弱くなったものと考えられる。次に、南北方向から22.5°右に傾けて計算を行った場合(図8右)であるが、地形の東側と地形の南端、北端で強い風速が現れている。そして、風上側の西側に比べ風下側の東側の方が風速は大きく、その強風域は地形の中心やや下あたりにだけ分布していて、風ベクトルは南よりの風である。図6と図8(右図)を見比べると、風のベクトルや風速分布は同じようなパターンを示している。

なお、この他に45°、67.5°、90°右に傾

けたものについてシミュレーションを行った。その結果、45°のもの(図省略)については、22.5°のものと同様の結果が得られることが分かった。しかし、残りの2つについては、風向風速分布のパターンがそれまでのものとまったく違ったものとなった。

## 3) 島の高さの影響

次に、三角柱状地形の稜線の高さが風の分布にどのような影響を与えているかについて調べてみた。3.4.1節の2)で使用した三角柱状地形の稜線(図7のB-C間)は、実際の女木島の最高標高点(216m)とほぼ近い220mに設定してある。そこで、その半分の高さの110mと1.6倍の高さの350mにして数値実験を行った。なお、三角柱状地形は3.4.1節の2)で図6(オトシの実地形シミュレーション)とほぼ同じ風の場合を示した22.5°右に回転させたものを使用した。

図9は、そのシミュレーション結果である。まず、半分の高さにした110m(図9左)の場合、風上側の地形西側は9~10m/sの一樣な西

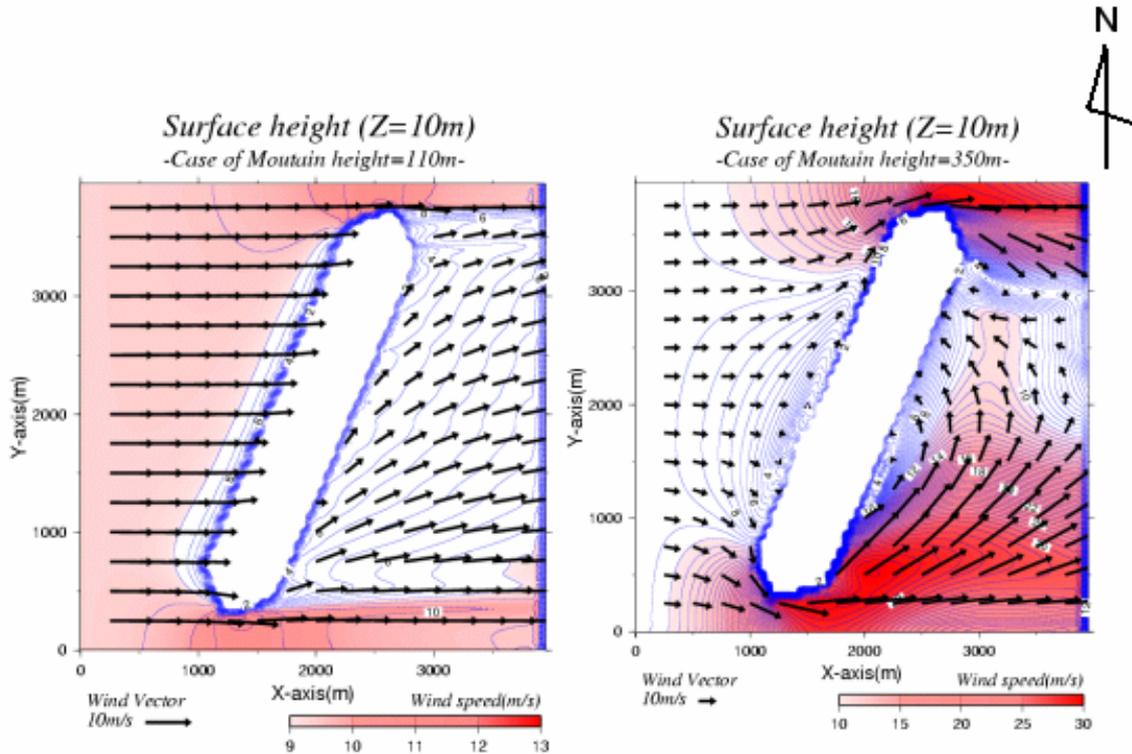


図9 高度10mにおける水平速度場(左図:標高110m(0.5倍)右図:標高350m(1.6倍)) N-Sから22.5°のもの。コンターは0.5m/sごとで風速の分布、強風域(右図9m/s以上、左図10m/s以上)はシェードで示してある。

風が見られるのに対し、風下側の地形東側は風速4~8m/sで、風上側に対して相対的に弱い風速となっている。なお、風のベクトルは南西寄りの風となっている。次に、高さを1.6倍にした場合(図9右)については、風上側の地形西側では高さが半分のもの(図9右)と同じように9~10m/sの様な西風が見られる。しかし、風下側の地形東側では一部分でなくほぼ全体にわたって、10~30m/sの強風域が舌状に流入している。風ベクトルは南西~南の風となっている。

3.4.1節の2)において稜線の高さ220m、南北方向から22.5°回転した場合の計算では、図6とほぼ同じようなパターンとなるが、同じ条件で高さだけが変わると大きく違う風速パターンになることがこのシミュレーションで明らかになった。

### 3.4.2 理想女木島地形

以上、直線的に伸びた三角柱状地形を用いて島の風下側に生ずる強風「オトシ」の特徴を再現することが示された。このことから「オトシ」の発生には細長く伸びた形をしている女木島

の形が関係していることが示唆された。しかしながら女木島は北側に楕円錐上の峰があるなど、三角柱とは異なる特徴も持っている。そこで、立体図形を組み合わせ、実際の女木島に近い理想女木島地形を作り出し、女木島の地形を構成する立体図形を変形させることにより、島のどの要素がオトシの発現に効いているのかについてさらに詳しく調べる。

#### 1) 理想女木島地形の概要

図10に3地点から見た女木島の写真を示す。図2,4とこの図から、女木島が比較的単純な形状をしていることがはっきり分かる。今回の解析では図2や図10を参考にして、理想女木島地形を構成する立体図形を考えた。

まず、島南端から最高標高点を通る稜線の部分(図2のA-C間)は、図10(a),(b)を見ても分かるように断面は三角形上で細長く伸びた形をしている。そこで、この部分は三角柱状地形に置き換えた。しかし、図2の稜線上の断面を見ても分かるように実際の地形は鷲ヶ峰に向かって標高が下がって稜線が傾斜している上に、途中に標高の高い丘陵のような部分

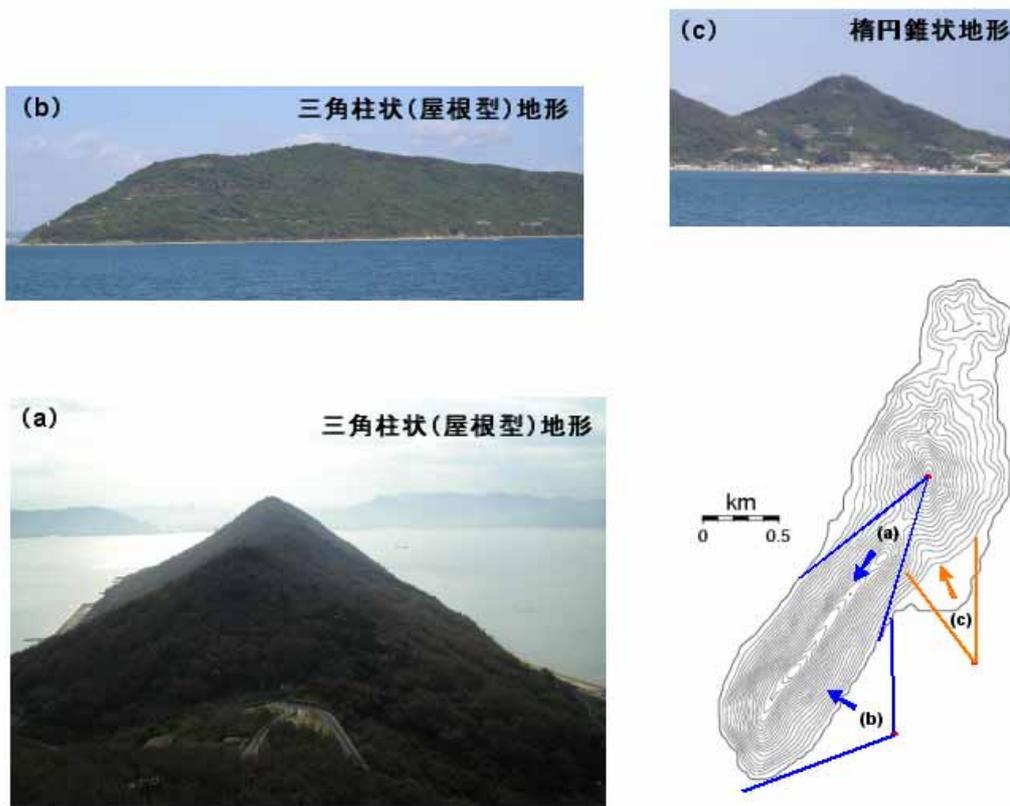


図 10 女木島の形状  
 それぞれの写真は、右下地図の丸印から撮影、撮影方向は三角形で示す。  
 (a)は鷲ヶ峰展望台より撮影、(b)と(c)はフェリー上からの撮影

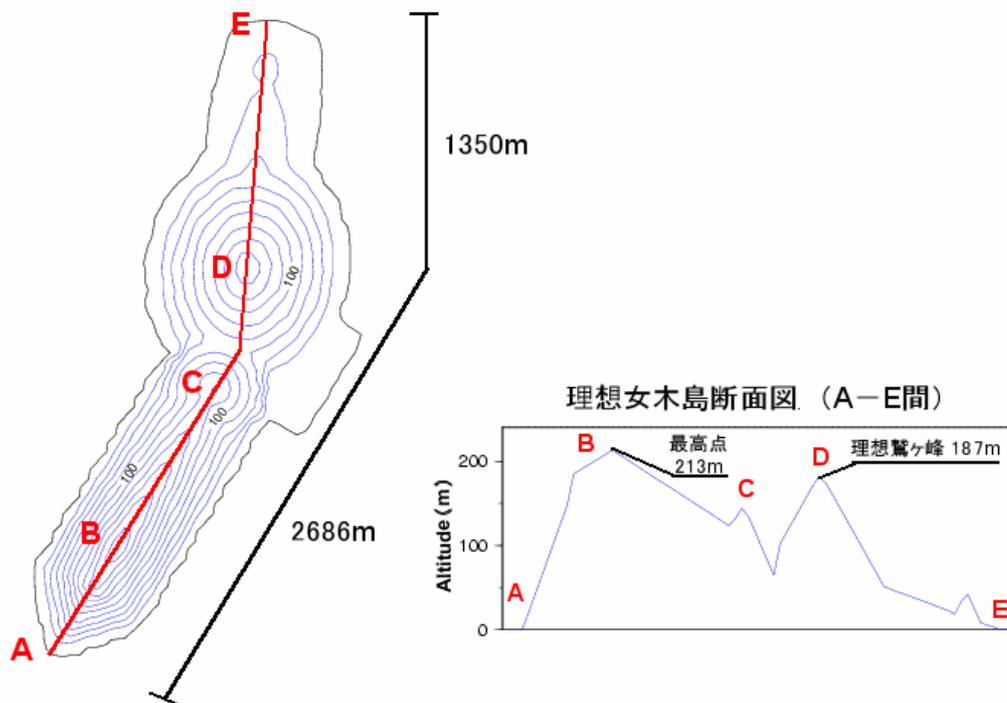


図 11 理想女木島地形の形状

(図 2 の C)がある。よって、三角柱状地形も同じように鷲ヶ峰に向かうにつれて標高を低くし稜線を傾斜させ、途中に円錐を埋め込んで丘陵も再現した。次に、北半分の鷲ヶ峰(図 2 の D)とそれに連なる小地形(図 2 の D-E 間)

であるが、これは図 10 を見ても明らかな通り鷲ヶ峰が楕円錐状をしているのでそのまま楕円錐を採用した。連なる小地形については、台形状の地形を傾斜させて表現した。図 11 が今回作成した理想女木島地形である。地形の水平

方向、鉛直方向の長さは、実際の女木島にほぼ近いものになるように設定し、島の位置の傾きもほぼ実地形に近くしてある。

## 2) 数値実験の設定条件

計算領域は、理想女木島地形の中心をほぼ領域の中心とする 3950m四方とし、鉛直方向は 400mである。座標系は直交座標、水平格子間隔は 50m×50m、鉛直方向の格子間隔は 10mで計算格子は 79×79×40 である。境界条件に関係する風の鉛直プロファイルを与える、べき分布の式のパラメーターはそれぞれ $z_1=10\text{m}$ 、 $u_1=10\text{m/s}$ とし、 $\alpha$ の値は海上の風を表す $\alpha=1/10$ を使用している。

なお、渡邊(2003)と同じように、季節風の風向が北西から南西方向にかけて $11.25^\circ$ の間隔で変化させた時の理想女木島地形周辺における風の場の再現を試みた。その結果、東浦において「オトシ」が吹くとされる西風と西南西風の場合に「オトシ」と考えられる強風を再現することができた。次節では西風時の場合を用いて、オトシの発現に効いている島の地形について考えてみることにする。

## 3) 季節風が西風時のオトシ

季節風が西風時の理想女木島地形周辺の高度 10mにおける風の場を図 12 に示す。風の分布を示す図 12(a)を見ると、島の風上側は一樣な西風であるが、島東側の最高標高点辺りから東浦に相当する地域(以後、東浦と呼ぶ)にかけて南西よりの風となっている。そして、島の最南端付近と東浦辺りには風上側と比べて強い風速域が存在している。これらは、実地形を用いた図 6 や三角柱状地形の図 8 とほぼ同じような風速分布のパターンをしていることが分かる。図 12(b)に示す発散場では、風上側の島西側付近では全体が一樣に収束場となっている。そこで、単純に考えると水平方向に島の先端を迂回してくる風はあるが、稜線を越える気流の影響で島の東側では発散場になるのではないかと想像される。しかし、実際図 12(b)を見ると、そうになっているのは鷲ヶ峰(楕円錐状の山)東側から北の部分だけで、東浦付近は収束場となっている。なお、東浦付近の強風域は収束場から発散場になるところに生じている。図 12(c)に示す風の  $w$  成分(鉛直成分)

の分布を見ると、東浦付近は上昇流場となっている。これら風の場合(図 12)の特徴は、渡邊(2003)の実地形を用いたシミュレーション結果ともほぼ一致しており、立体図形を組み合わせで作った理想女木島地形でも「オトシ」を再現できたと考えられる。

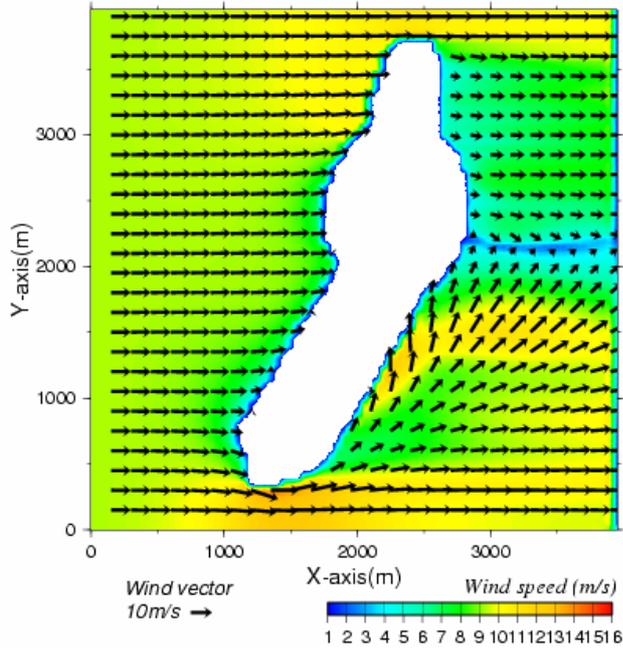
## 4) オトシに与える鷲ヶ峰の影響

先に述べたように、女木島の地形で大きな特徴を形づくっているのは、南半分の細長く伸びた形をした尾根(図 2 の A-C)と北半分の楕円錐状の鷲ヶ峰(図 2 の D)である。そこで、ここでは理想女木島地形を使い、3.4.2 節の 3) でオトシを再現できた西風時について、鷲ヶ峰をなくした場合の地形で数値実験を行った。なお、鷲ヶ峰の部分は、南半分の尾根が鷲ヶ峰の辺りまで引き続き標高の傾斜があった場合の高さ 101m から鷲ヶ峰背後にある小地形に向かって傾斜する地形(図 13)としているので、図 2 の C-D 間の谷がなくなる形になっている。

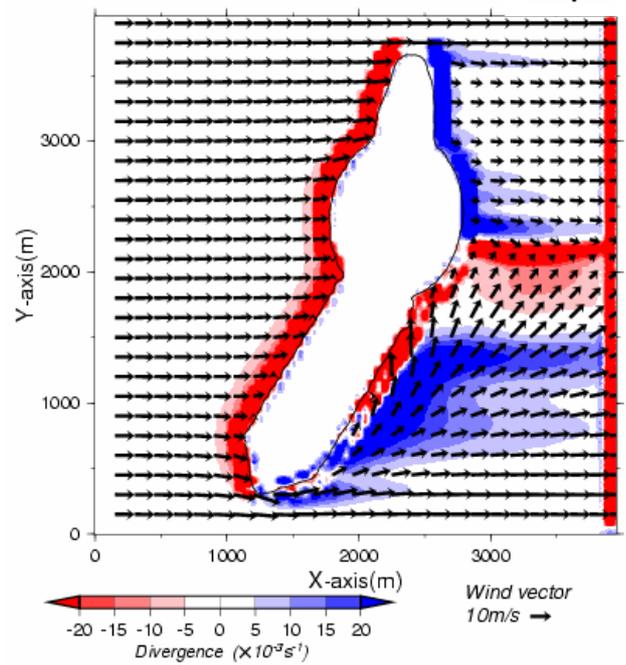
シミュレーション結果を図 13 に示す。図を見ると、島の風上側は一樣な西風であるが、風下側の最高標高点辺りから東浦に相当する地域は南西から南南西の風となっている。全体的な風のパターンは図 12(a)と同じである。また鷲ヶ峰がない場合でも、東浦付近に風上側より風速の強い風速域が存在しており、オトシが再現されている。

なお、女木島は南半分の細長く伸びた形をした尾根(図 2 の A-C)と北半分の楕円錐状の鷲ヶ峰(図 2 の D)の間は谷になっている。ここに西よりの風が吹き付ける場合、他の部分は尾根や鷲ヶ峰にブロックされる形になるが、谷の部分は風が通過できるためちょうど東浦上空で低圧状態になり、ここに向かって南の海上から風が吹き込んでくることが考えられる。しかしながら、今回のシミュレーション結果から谷がない地形でもオトシが吹くことが明らかになった。

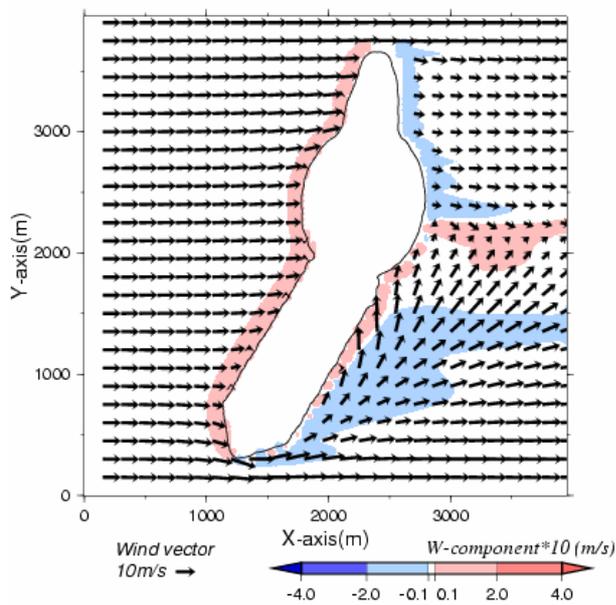
(a) *Ideal Megi Island - Wind speed at height 10m-*



(b) *Divergence (Z=10m)*



(c) *W-component at height 10m*



(d) *Vorticity (Z=10m)*

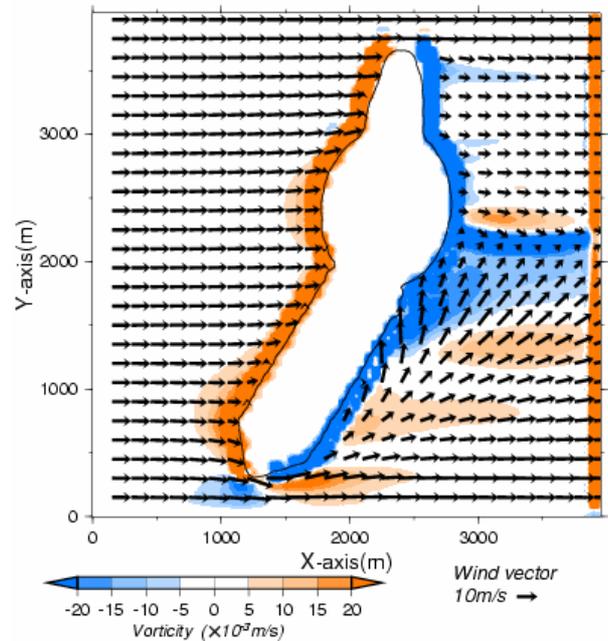


図 12 高度 10m における風の間

(a)水平速度場、(b)発散場、(c)w 成分の分布、(d)渦度場をシェードで示した。矢印は、水平風のベクトルで参考のため全ての図に示した。

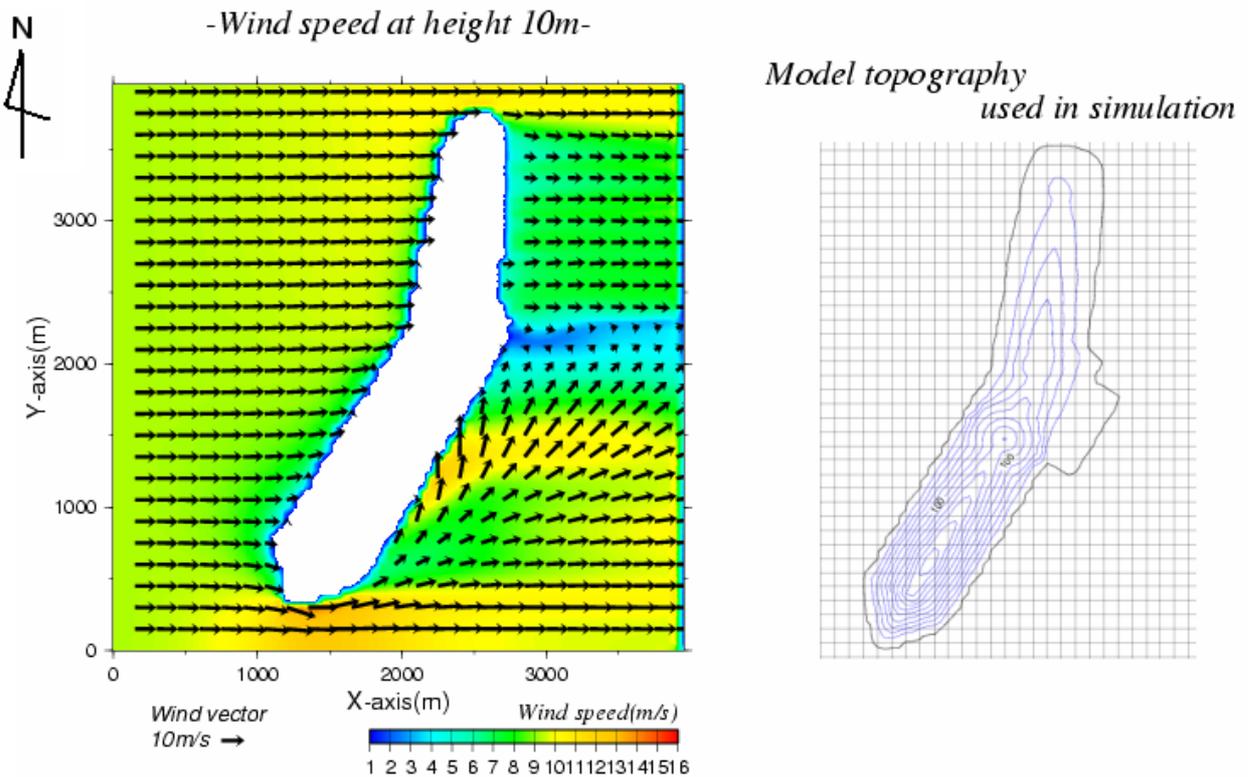


図 13 理想鷲ヶ峰なしの場合の高度 10m 風速分布図  
左図のシェードは風速分布、ベクトルは水平風のベクトルを示す。右図は、使用した理想鷲ヶ峰なしの地形。

### 5) 三次元流跡線解析

渡邊（2003）では西南西風時と西風時の場合において 3 次元的な流跡線解析が行われ、その結果として島南側の細長い稜線地形を山越えをしてきた気流が下降しながら東浦に向かいオトシとなるという説明がなされている。そして、西南西風時と西風時では若干の違いが見られ、吹き降ろしてくる気流の位置が違うことが明らかにされている。そこで、理想女木島地形においても流跡線解析を行い、渡邊（2003）で解析されている気流の吹き降ろしが再現できるのか、またどのような特徴が現れるのか試みてみた。なお、流線はオイラー的視点に対応しており、流跡はラグランジュ的視点で流体（空気の流れ）を見ることになる。

図 14 は、理想女木島における流跡線解析図である。最初の気流の流入高度は 50m で各流跡線の流入時の間隔 250m 間隔である。図 14 を見ると、流跡線のうち赤色の流跡線が島によって風上側で地形上昇しながら島の南側の突き出た斜面を回り込み、風向を変えながら東浦付近に吹き降ろしているのが分かる。残りの流跡線は島の稜線を越えた後、地形に沿いながら

下降し、そのまま直進している。

この理想女木島地形を用いた解析では、渡邊（2003）で解析された気流の吹き降ろしを再現することができ、西風時に島の最高点のやや南側の気流が吹き降ろしてオトシになるという特徴が見られた。また、残りの流跡線も渡邊（2003）と同じような挙動を示していた。

### 3.5 オトシ発生に寄与する地形の考察

三角柱状地形と理想女木島地形を使い、数値実験を行った結果を考察する。

単純な三角柱状の地形でも、風向に対して、島の稜線が直角になる方向から時計回りに  $22.5^\circ \sim 45^\circ$  変えただけのものでも、実地形を使ってシミュレーションしたものとよく似た風のパターンが得られた。稜線の高さを 0.5 倍すると、東浦付近の風向はオトシと同じ南西寄りであったが、風速が弱まった。高さを 2.1 倍にすると、風向は南西であったが、風下側ほぼ全体にわたって風速が強くなった。次に簡単な立体図形を組み合わせで作った理想女木島地形でシミュレーションを行った。この計算では、西風時と西南西時のときオトシを再現するこ

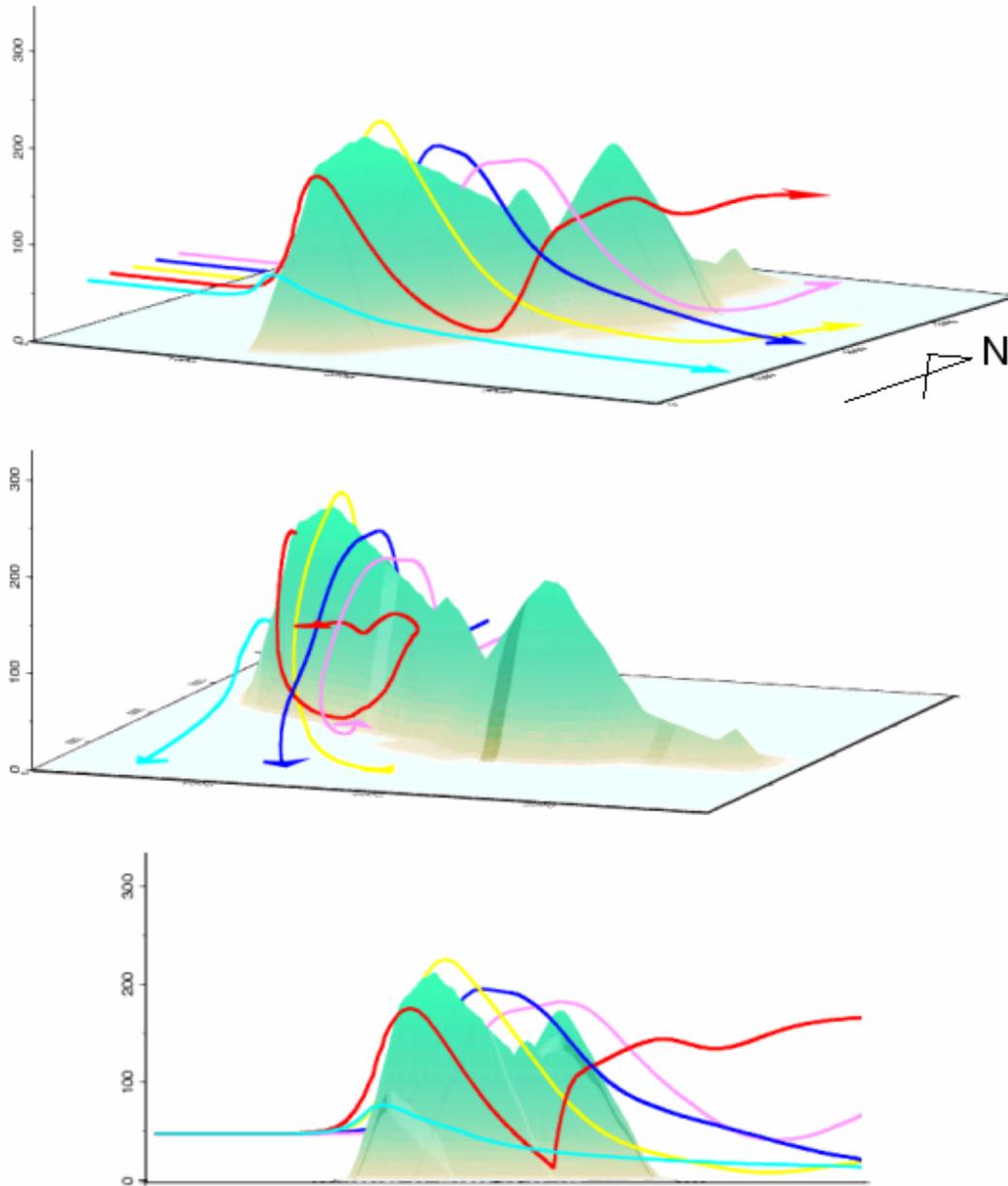


図 14 季節風が西風時の 3 次元流跡線解析図  
流入高度は全て 50m、3 つの図は視点を変えて俯瞰したもの。

とができた。理想女木島地形から鷲ヶ峰をなくした場合、南半分にある細長い尾根と鷲ヶ峰の間の谷がない場合においてもオトシが発現した。

なお、3 次元的な流跡線解析では、渡邊(2003)の実地形によるシミュレーション結果によるもので示された、気流の吹き降ろしを再現することができた。

これらから次のような地形効果がオトシに寄与していると考えられる。まず、西よりの季節風が吹くときに、直線状に伸びる島の稜線が風向に直角になる方向から少しずつ南西 -

北東方向に伸びていること。次に、島の稜線の高さで決まる山の斜面の傾きが適当であること。鷲ヶ峰や谷の影響は、オトシの発現自体には影響がなく、島の南側の細長く伸びる稜線地形が重要であること。また、西風時の場合はその稜線地形でも特に島最高点のやや南の突き出た斜面の影響が少なからずあることが分かった。つまり、女木島はこれらの条件がたまたま揃っていたために、瀬戸内の他の島嶼では見られない局地的強風「オトシ」が発生すると考えられる。

### 3.6 「オトシ」解析の今後の課題

今回の立体図形を組み合わせたの数值実験では、西風時と西南西時においてオトシを再現することができた。しかし、これは、今回作成した地形にまだ改良の余地があることを示していると思う。そこで、今後立体図形を組み合わせた地形を使って研究を進める際には、さらに実地形を吟味し、できる限り単純な図形を組み合わせながらいかに実地形に近づけるかを考えなければならない。

#### 4. 鳴門海峡の局地的強風の解析

##### 4.1. 鳴門海峡の地形

図 15 に示すように、鳴門海峡は四国と淡路島の間にある。その幅は約 5～6km であるが、四国側の大毛島と兵庫側の淡路島の間は、双方から岬が突き出ているのでその幅は約 1.3km(図の B-C 間)と狭くなっている。四国側の岬は、標高が約 80m と 40m の楕円錐状の連なる山があり、淡路側は、高さ約 50m の尾根が直線的に約 1.5km 伸びており(図 D-F 間)その断面は三角柱状をしている(図 X-Y 間)。

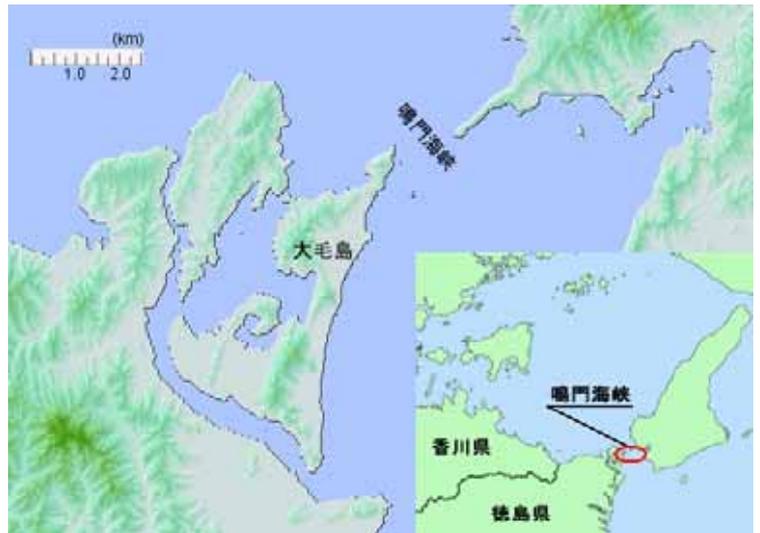


図 15 鳴門海峡の位置と周囲の地形

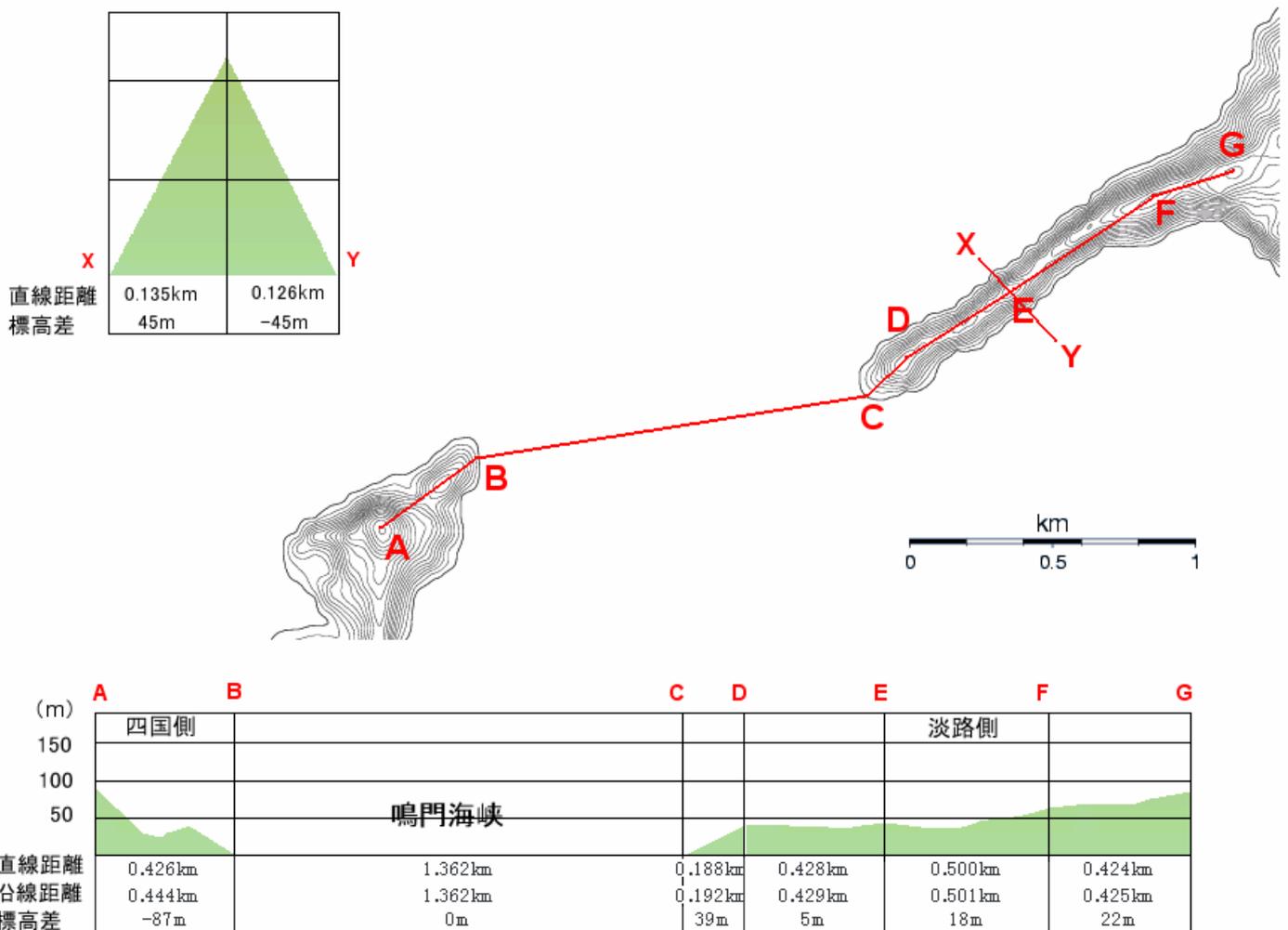


図 16 鳴門海峡の地形断面 (A - G は海峡の岬の稜線に沿った断面。X - Y は淡路側の岬の斜面に沿った断面)

## 4.2. 鳴門海峡の強風

鳴門海峡では、1956年から1965年頃にかけて海峡に横断送電線を建設するために、詳細な風の観測が行われ、海峡断面の風の分布の理論計算もされている。さらに、送電線完成後に送電鉄塔による風や気温の観測も行われた(Mitsuta, 1971)。そして、この観測結果などとともに、風洞実験も行われている(光田・森, 1974)。

これらから、風が海峡を吹き抜ける風向の時に特に岬の先端部や稜線上で強風が吹くことが確認された。これは地形による気流の縮脈効果によるものと考えられている。なお、滑川(1960)では淡路側の岬先端の観測地点で最寄りの徳島地方气象台、洲本測候所の風速と比べ、1.5～3.0倍の風速が観測されている。Mitsuta(1971)でも、海峡入り口の海面上10mでの風速に比べ、岬の先端や稜線上は風速が1.7～2.1倍になっていると述べられている。

しかし、これまでの風洞実験等では、この地形の縮脈効果による風速の増強が十分には再現されていない。これは、岬を迂回する気流の効果や地表面のごく近い所で特に顕著になると考えられる局地的な地形による変形が再現されていないこと(光田・森, 1974)や摩擦の効果が与えられていないことに起因すると考えられるが、未だ明らかになっていない。

## 4.3. 現地観測の結果とこれまでの研究

ここではこれまでの観測結果や研究について紹介する。

1956年から1960年までの現地観測の結果は、「設計風圧選定の目的で施工した鳴門海峡における暴風観測報告」の中間報告(第3報)や終末報告(第5報)という報告書にまとめられている(光田・滑川, 1959、滑川, 1960)。また、これらの観測結果の一部はMitsuta(1971)によって発表されている。図17は、台風6710号が鳴門海峡に接近した時の強風の観測結果と基準点に対する風速の相対比分布を示している。この観測では、海峡入り口にあり地形の増強を受けていない地点1(里浦観測点)を基準とし、ここでの高度10mの風に対するその他の地点の風との相対比を求めている。表1は、各観測点の標高などともに、観測期間の最高風速、地形増強率(図17の相

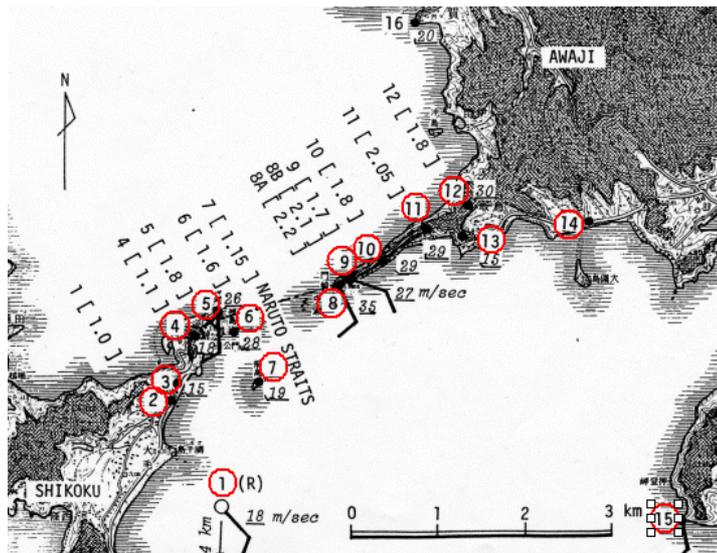


図17 風速・風速相対比分布図(台風6710号接近時: 1967年9月7日16時)

海峡に対して南東風が吹く時に、強風が観測された例。赤丸は観測点番号(表1と対応)を示し、[ ]内の数字は基準点里浦(観測点番号1)の風速に対する相対比を示す。(Mitsuta(1971)の図を一部改変)

対比)などを示す。図17によると、地形の影響を受けていないNo.1(里浦, 18m/s)に比べ、岬の先端付近のNo.8(鳥居, 35m/s)、No.5(孫崎灯台, 26m/s)や稜線上のNo.9(やぐら, 27m/s)、No.10(駐車場, 29m/s)などで強風が観測され、相対比(表1の地形増強率)も1.7～2.1倍で著しい風の増強が見られる。なお、この地形増強率については、光田・滑川(1959)で理論的考察が行われ、理論地形増強率が算出されている。その計算では、風が全て水平流である場合と全て山越え気流の場合、双方がともにある場合について算出されている。結果、全て水平流である場合には海峡や岬先端付近で実測よりかなり大きな値を示し、全て山越え気流の場合には海峡狭部で風速が増強されていなかった。双方がともにある場合の計算では、前の二つに比べ実測に近くなったが、全て実測率より大きくなっている。これは、海峡付近の小地形と摩擦効果による影響があるためと考えられている。

送電線の完成後、送電鉄塔に風速計や温度計が設置され、観測が続行されている。その観測結果は、Mitsuta(1971)等で報告されている。図18は、その結果の要約である。この図を見ると、風速が強い場合は風速の鉛直分布は温度勾配(気温減率)に関係なく一定の形を示し、

番号	観測点名	観測地点の標高(m)	風速計高(m)	風速計の海面からの高さ	地形増強率	最大風速(m/s)
1	里浦	10	5	15	1.0	18.4
2	公園バス停	5	5	10	-	-
3	配電柱上	54	5	59	-	-
4	つつじ丘	99	10	109	1.1	20.2
5	孫崎灯台	36	10	46	1.8	33.5
6	飛島	25	3	28	1.2	19.0
7	裸島	19	5	24	1.6	27.5
8	鳥居(上)	20	10	30	2.1	37.6
	鳥居(下)	20	5	25	2.2	38.4
9	やぐら	50	10	60	1.7	39.2
10	駐車場	42	5	47	1.8	28.8
11	ガレ	75	5	80	2.1	35.4
12	笹山	92	5	97	1.8	30.0
13	砲台跡	51	8	59	-	-
14	刈濠	-	-	-	-	-
15	押登岬	15	5	20	-	-
22	門崎	19	3	22	-	-

表 1 観測期間中の最大風速と地形増強率

- は今回の解析でデータ不明のもの。番号は図 3 の観測地点と対応している。風速は一時間平均値で、風速の高さの違いは補正済み。  
(滑川(1960)の表を基に作成)

風速が弱くなると気温減率の違いとともに風速の分布が変わっていることが分かる。また、地表付近で最も鉛直の風速シアが強く、上空(高さ 40m 以上)になるにしたがって風速はほぼ一定になることも分かっている。

現地観測以外では、光田・森(1974)で風洞実験が行われ、現地観測の結果との比較が行われている。風洞実験では海峡中央部の様子を詳細に調べるために、3種類の縮尺の模型を用意し、縮尺の大きい二つは海峡の方向に沿う風向南南東、一番小さい縮尺のものは南南東から14°東に傾いた風向を選んで実験が行われている。この実験では、上空では実測とよく一致する結果が得られ、実際の強風時の風の性質が再現されている。しかし、海峡中央部で風の増強が見られず、実測の相対比と実験で求めた相対比に大きな差が見られ、局所的な地形による風の増強が再現されていない。これは、風洞中では岬を迂回するような気流の効果が顕著に再現されないことなどが原因とされている。

観測結果やこれまでの研究を見てみると、鳴門海峡の強風は地形の縮脈効果によって生じ、風が増強していると考えられる。しかし、これまでの理論的研究はコンピューターが発達していない時代に行われたもので、ポテンシャル流を仮定しているの、粘性を考慮した正確な3次元的な計算は行われていない。そこで、今回粘性を考慮した3次元数値シミュレーションを行い、観測や風洞実験の結果とともに鳴門海峡の強風について調べることとする。

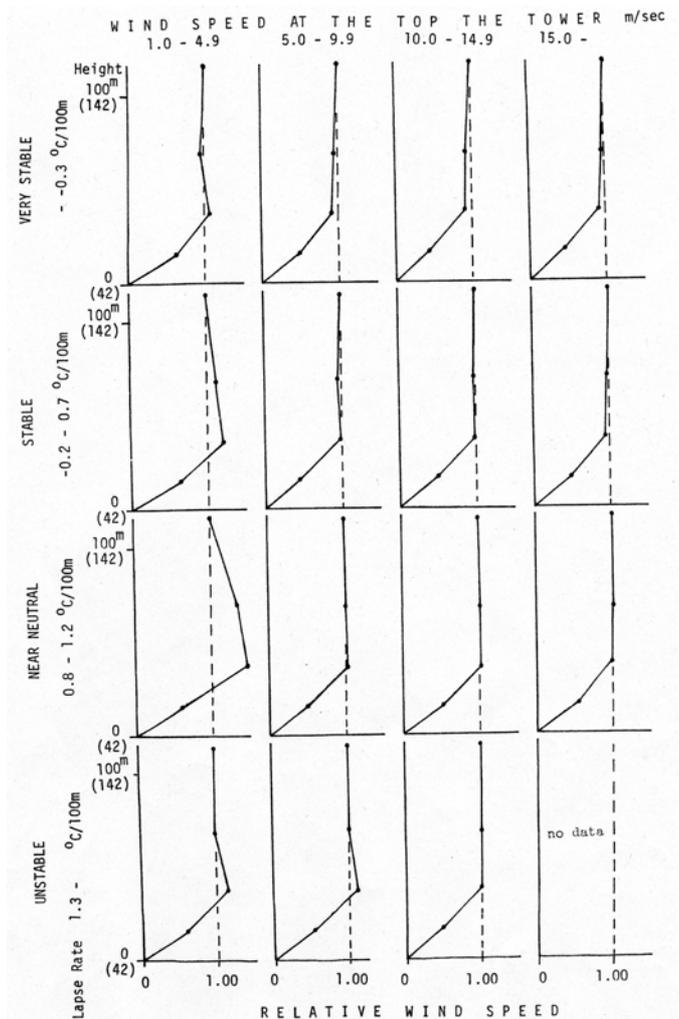


図 18 風速プロファイルと大気安定度、風速の関係  
淡路側先端付近の送電鉄塔におけるデータ  
(Mitsuta(1971)より引用)

#### 4.4. PHOENICS による数値実験

##### 4.4.1 計算領域と数値実験の設定条件

これまでの研究から、鳴門海峡の強風は海峡部での地形による風の縮脈効果等により生じると考えられている。そのため、計算領域はそれらの地形効果を考慮して設定しなければならない。また、観測や風洞実験との比較ができるようにし、なおかつ海峡中央部を詳細に調べられるようにする必要がある。しかし、全てを満足するように設定するのは困難である。そこで、本研究では図 19 に示すように 4 種類の領域を設定し、用途に合わせて計算を行った。

境界条件に関する風の鉛直プロファイルを与える「べき分布の式」のパラメーターは全ての実験でそれぞれ  $z_1=10\text{m}$ 、 $u_1=10\text{m/s}$  とし、 $\alpha=1/10$  を使用している。

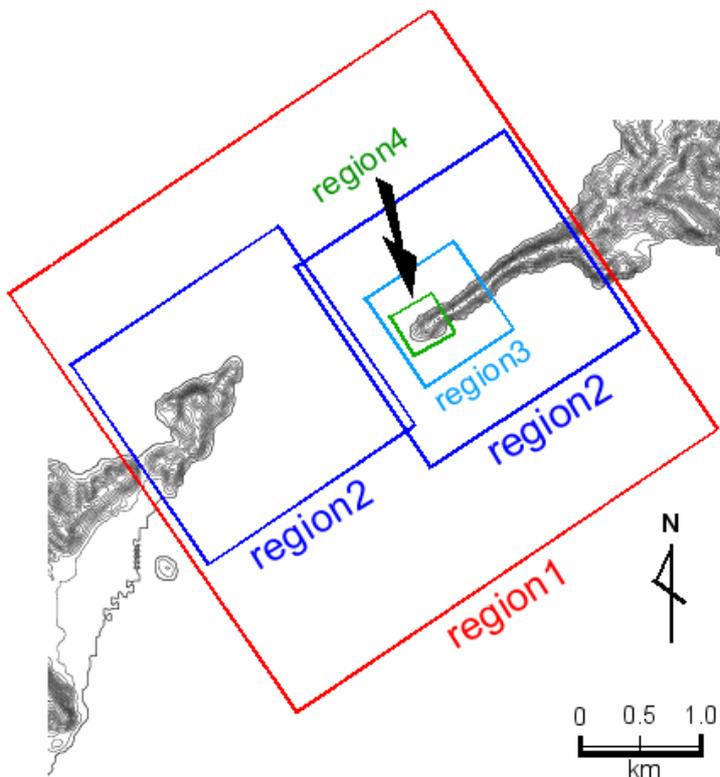
風向は鳴門海峡と四国側の岬の大毛島については風が海峡を吹き抜ける方向(南南東 - 北北西)である南南東を選び、淡路側の岬については岬に直角に風が当たる南南東より  $14^\circ$  東

に傾いた角度を選んだ。なお、現地観測が行われた各地点の正確な位置(緯度経度等)は不明であるため、シミュレーション上では文献や記録から場所を特定して解析を行った。

##### 4.4.2 鳴門海峡の風況 (region 1)

まず、国土地理院の 50m メッシュ数値データを用いて鳴門海峡周辺についてシミュレーションを行った。図 20 は、高度 10m における風の場合である。風速分布を示す図 20(a)では、風上側から一様な南南東風が海峡に向かって吹き込んでおり、海峡近辺になると風速が増している様子が分かる。そして、風速の増強は海峡中央部よりも海峡端の岬先端付近の方が大きくなっている。なお、海峡の中央部で強められた風速は風下に行くとき徐々に弱まり、風向にはほとんど変化がない。岬の風下側では岬の先端によって風向が多少曲げられており、風速が弱まっている。

次に、海峡付近の上空では風速の増強がみられるのかについて確認してみる。図 21 は、高度 20m、30m、45m、60m の風の場合である。



region1	
領域	3950×3950×200 (m)
格子間隔	水平方向 50(m)×50(m)
	鉛直方向 5(m)
格子数	水平方向 79×79
	鉛直方向 40

region2	
領域	1975×1975×200 (m)
格子間隔	水平方向 25(m)×25(m)
	鉛直方向 5(m)
格子数	水平方向 79×79
	鉛直方向 40

region3	
領域	790×790×200 (m)
格子間隔	水平方向 10(m)×10(m)
	鉛直方向 5(m)
格子数	水平方向 79×79
	鉛直方向 40

region4	
領域	395×395×200 (m)
格子間隔	水平方向 5(m)×5(m)
	鉛直方向 5(m)
格子数	水平方向 79×79
	鉛直方向 40

図 19 計算領域と諸条件

region2,3,4 については、50 メッシュ地形データを Surface 法によりそれぞれのメッシュデータに変換している。

この図を見ると、どの高度においても海峡部では風上側より風がやや強くなっており、海峡の端から岬の先端にかけては特に強い。そして、岬の稜線部分では高度が上昇するにつれて強風域が出現している（図 21 (c),(d)）。この特徴は、4.3 節でも述べたように現地観測でも確認されており、今回のシミュレーション結果は風速の増強のパターンをよく再現していると言える。

ここでもう少し詳しく海峡上の風速の増強について調べてみることにする。海峡上では風上側より風速が増強していることから、風が周りの地形により水平方向に収束され、風上側より幅が狭くなっている海峡上で強まっていると単純に考えられる。しかし、図 20(b), (c)の水平発散場や鉛直渦度場をみると、岬部分では地形効果によって風上側で風の収束と上昇、風下側で風の発散と下降がみられるが、海峡付近では水平方向に収束・発散等はほとんど見られない。これは、鳴門海峡では単純に風上側の風が幅の狭い海峡を通過する時に、水平方向に収束されるだけで風が増強しているわけではないことを示している。

次に、海峡付近の鉛直方向の風の分布を調べてみる。図 23 と図 24 は、四国側大毛島の岬（孫埼）と淡路側の岬（門埼）の先端付近、風が増強されていた場所を通る Y 軸に平行な断面図（図 22 の ① のライン）である。この図をみると、やや分かりにくいですが、それぞれの岬先端で高度が低いほど、同高度の他の地点より風速が強くなっている。また、両地点ともに岬先端の背後は傾斜があって丘陵となっており、その上空は他の地点の同高度より強い風速となっていて、岬先端背後の傾斜に沿うように強風域が岬の先端に伸びている。なお、淡路側の岬から丘陵に向かう傾斜の地表面近くは地形がへこむように湾曲していて弱風域となっているが、そのすぐ上を覆うように強風域の層が岬先端に向かって伸びており、風速の鉛直勾配が大きくなっているのが分かる。

ここからは、両方の岬の先端を結んだ鳴門海峡上（図 27 の ② のライン）における風速の増強について調べることにする。鳴門海峡での風速の増強度の分布については、Mitsuta(1971)はポテンシャル流を水平面内だけを流れる水平面成分と岬があっても水平面に流れが変化せず鉛直方向にだけ流れる鉛直面成分とに分けて、各々について二次元地形で流れを計算し、

もう一度合成して海峡内の流れを調べている。そこで、今回のシミュレーション結果から計算した風速の増強度の鉛直分布と比較してみる。

図 25 は、Mitsuta(1971)で計算された海峡内の相対風速で、風上側の高度 10m での風速に対する相対比で表されており、[ ]内には現地観測で得られた相対比も記入してある。この図によると、海峡中央部よりも岬に近いところのほうが相対比は大きく、海峡内では高度 30 ~ 50m 付近に相対比の極大がある。また、高度 130m 以上での相対比は、地形による影響を受けていない場所での相対比分布と同じ分布をしている。

今回のシミュレーション結果から計算した海峡内の相対風速を図 26 に示す。この図でも、図 25 のポテンシャル流のものと同じように、海峡中央部よりも岬に近いところのほうが相対比は大きくなっている。図 26 では、図 25 のように高度 30 ~ 50m 付近に相対比の極大はみられないが、高度 20m から 30m に高さが変わると、相対比の増加率が他の高さよりも大きくなっているのが分かる。また、数値実験の流入条件として与えた風のプロファイルより求めた相対比に比べ、どの高度でも海峡内の相対比のほうが大きい。シミュレーションにより計算した相対比はポテンシャル流より計算したものに比べ全体的に値が小さく、ポテンシャル流では現れた海峡内 50m 付近の風速極大がシミュレーションによるものでは現れていないことが分かる。

現地観測との対応を見ると図 26 に比べて図 25 の方が一致している。しかしながら、図 25 のポテンシャル流の計算では粘性や地表面摩擦等の効果が計算に取り入れられておらず、過大に値を計算している可能性がある。また、現地観測との対応は陸地の部分に限られており海峡上では観測が行われていないため、実際海峡上 50m に本当に風速相対比の極大が現れるかは不明である。ただし、図 25 でも図 26 でも明らかなのは、海峡内（海峡端の岬の先端を含む）では風上側に比べ、少なくとも鉛直方向 100m くらいまでは風が増強され、やはりその相対比は海峡中央部よりも陸に近づくほど強いということである。なお、この海峡中央部よりも陸に近いところで風速が最も大きくなるという特徴は、他の海峡（明石海峡や関門海峡など）における現地観測や風洞実験における結果（塩谷，1992）と一致する。

海峡内での風の分布の特徴をさらに調べるため、図 26 などにより、海峡断面のおおまかな風速の分布を作成することとする。なお、図の作成に当たっては計算格子間隔の関係などから客観解析によって風速の等値線を引くことが難しいため、主観解析によって等値線図を作成した。図 28 はその結果である。領域内に何の地形もない海だけの場合における相対風速の分布（図 28 上段）と海峡断面における分布（図 28 下段）を比較すると、いかに海峡のところで風速が相対的に強まっているかが分かる。また、海峡の高度 20～30m 付近には相対風速が急激に変化する場所があって、この場所を超えると特に相対風速が強まることから、高度 20～30m 付近は風速シアが大きいことが分かる。

海峡の端である岬の先端付近では、海峡中央部に比べて等相対風速線がやや下降してきており、同高度の海峡中央部よりも相対風速が大きい。そして、海峡中央部分では等相対風速線が弧を描いて帯状に分布しているが、岬部分では上空から相対風速の大きい等値線が伸びてきており、海峡周辺では最も大きい相対風速となっている。海峡中央部より岬先端のほうが風が強くなるというこの結果は、先ほども述べた通り、これまでの海峡に関する風の研究と一致する。また、海峡付近の岬で風の増強が他より著しいという結果は、実際その位置にあって現地観測で最も強い風速が観測された No.8 鳥居、No.5 孫崎灯台のデータともよく対応している。

この region1 におけるシミュレーションでは、鳴門海峡中央付近で風上側と比べて、実際に風速が増大することが確認できた。これは、風洞実験（光田・森，1974）では再現されておらず、現地観測でも確認されていないことから大変重要なことであると考えられる。また、各高度面の風速場や速度場の断面図等において、海峡端から岬の先端部分、海峡部分に近い岬の稜線上で他の部分より強い風速が現れていたが、これは図 28 の海峡部の風速断面によって海峡中央部よりも大きな値の等相対風速線の下降等があることが分かった。そして、海峡部分では、風上側と比べて少なくとも鉛直方向 100m までは風速が増強されており、風速は海峡中央よりも陸に近づくほど大きくなるという特徴がみられた。ただ、何故海峡部分や岬の稜線上で風が増強されるのか等については、このシミュレーションでは分からなかった。そ

こで、次の region2 に以降のシミュレーションでこれらのことや岬での詳しい風況等について調べることにする。

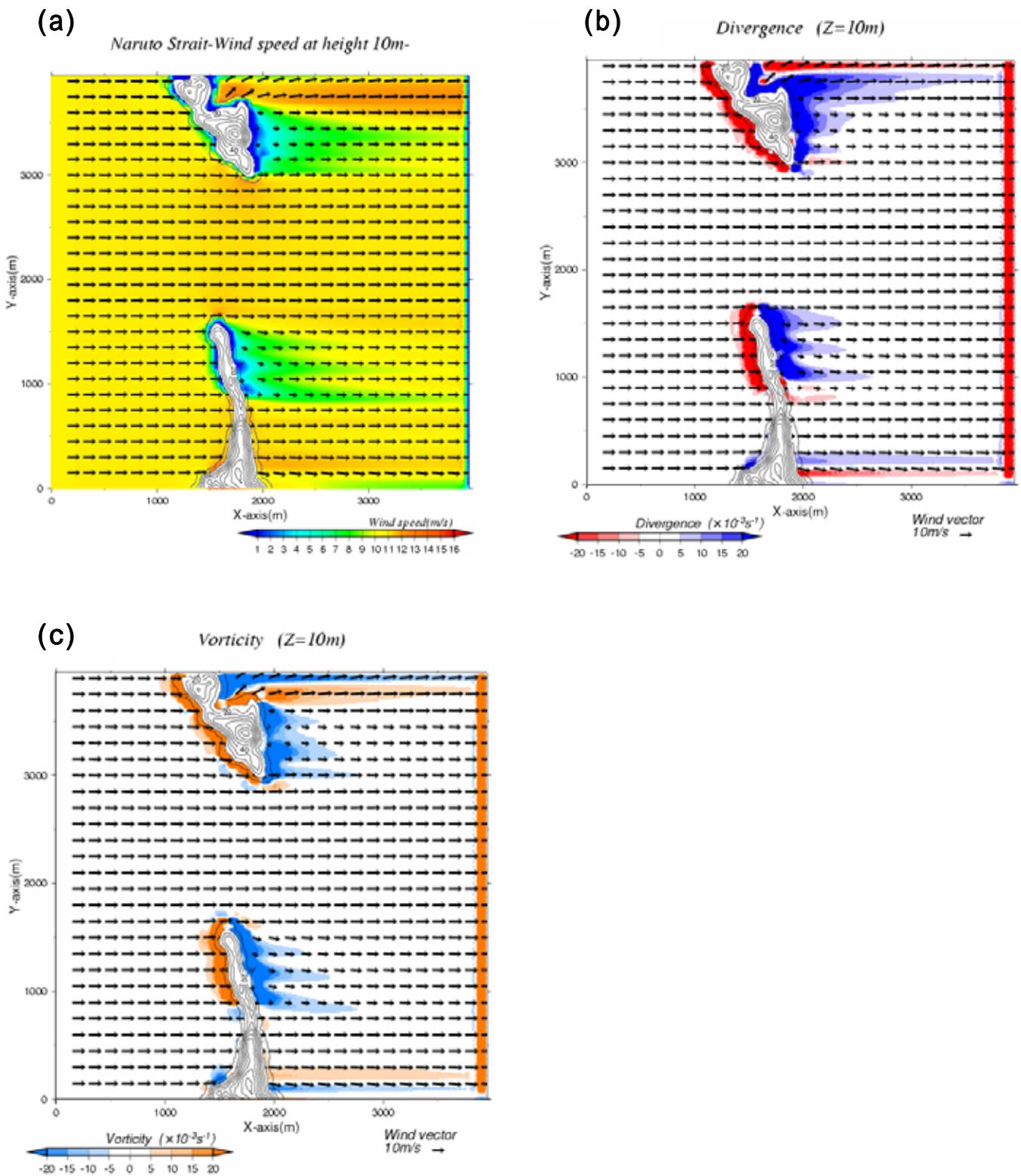


図 20 高度 10mにおける風の間（鳴門海峡）

(a)速度場、(b)水平発散場、(c)鉛直渦度場をシェードで示した。ベクトルは、水平風のベクトルである。

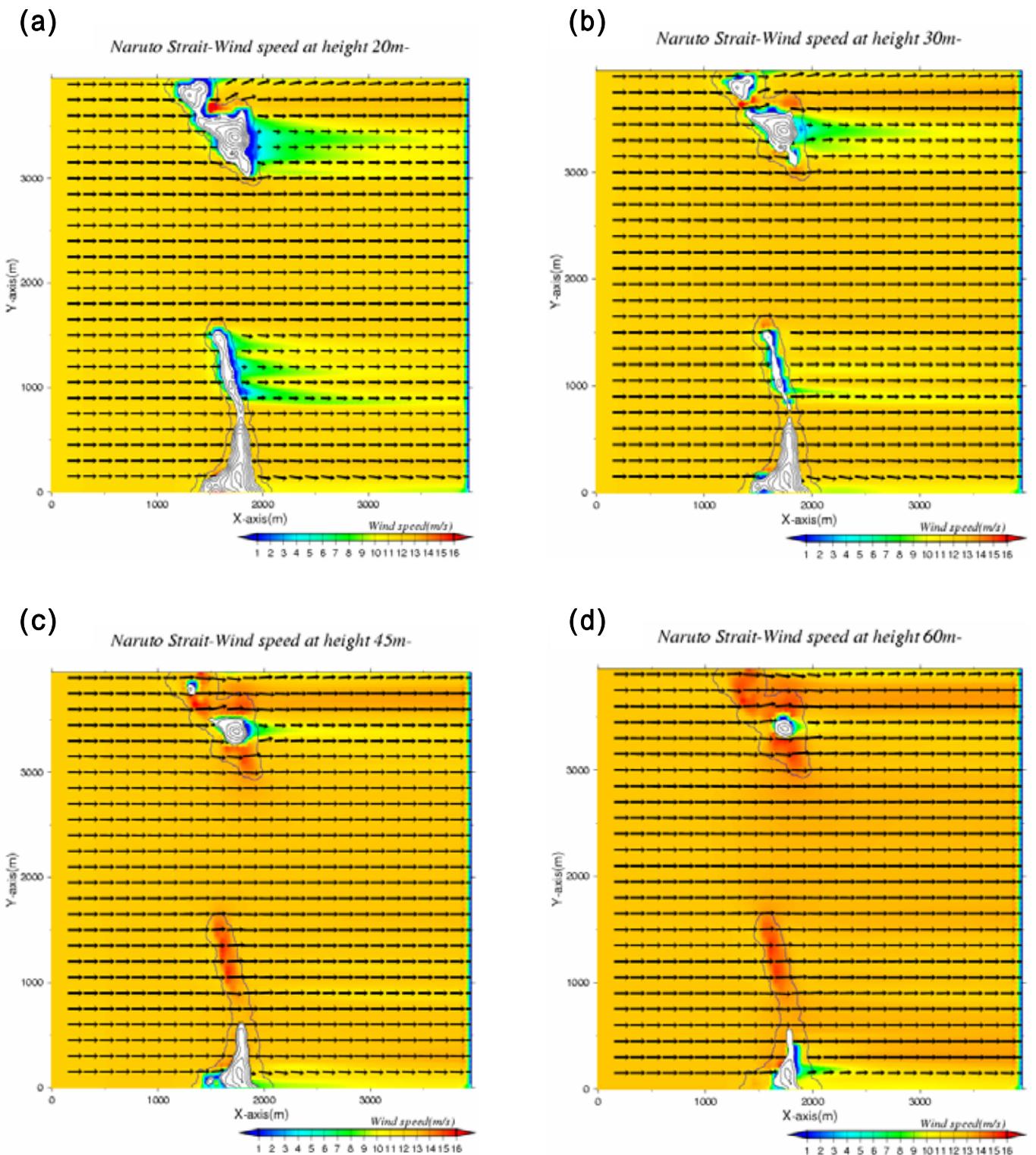


図 21 各高度における風速分布

(a)20m , (b)30m , (c)45m , (d)60m の風速をシェードで示した。ベクトルは、水平風のベクトルである。

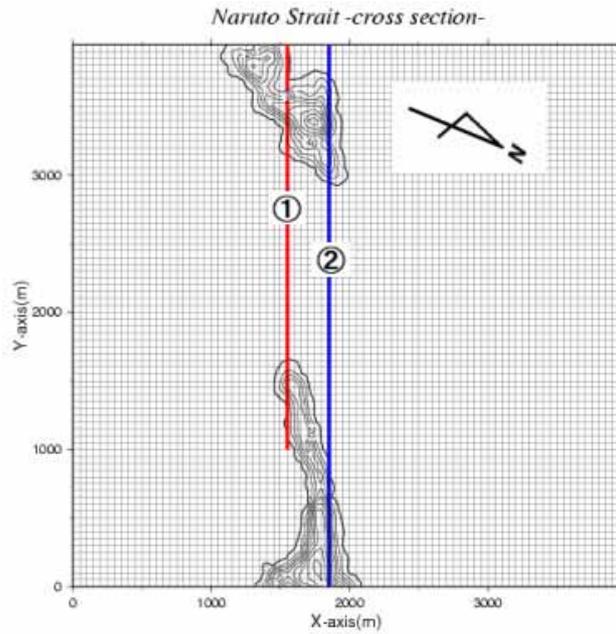


図 22 は図 23 で示す断面図の直線（淡路側の岬先端を通る直線）  
 は図 24 で示す断面図の直線（四国側の岬先端を通る直線）

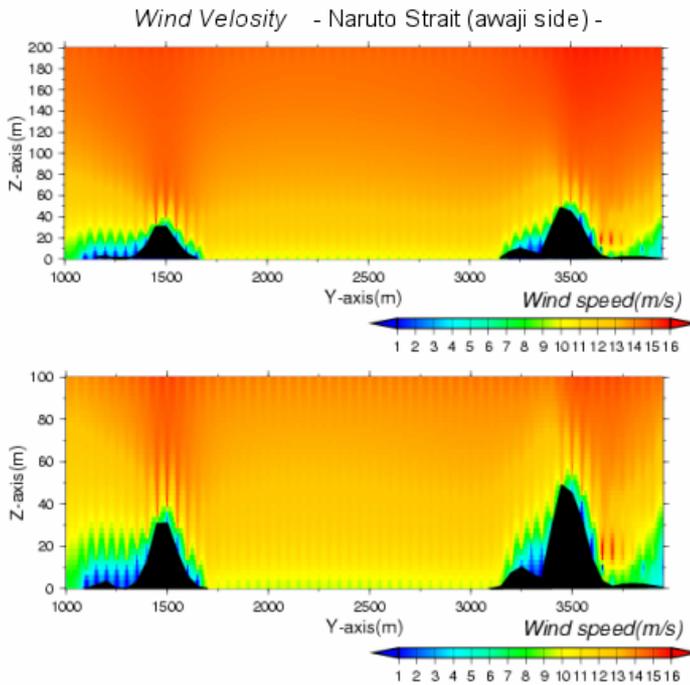


図 23 X = 31 (図 21 のライン) の断面図  
 断面における速度場を示す。  
 上段は高度 200m までの図  
 下段は高度 100m までの図

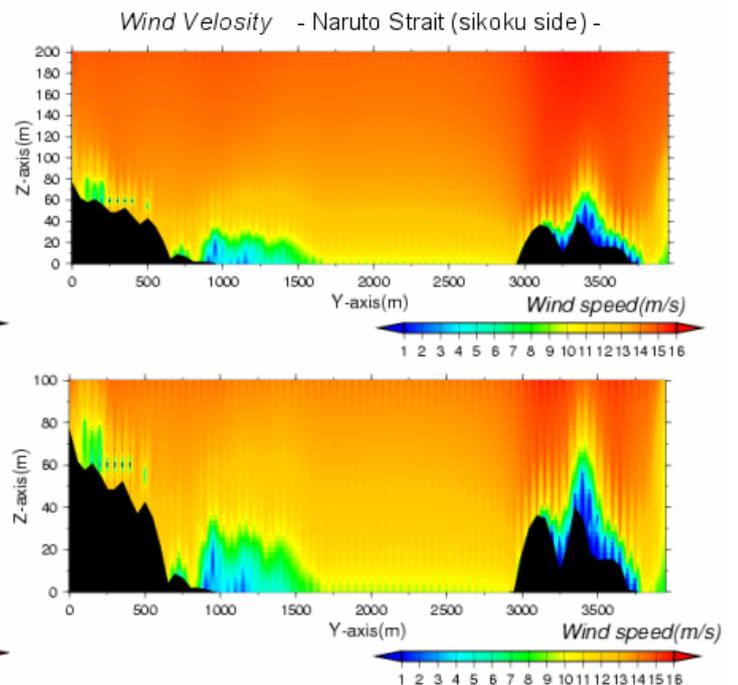


図 24 X = 37 (図 21 のライン) の断面図  
 断面における速度場を示す。  
 上段は高度 200m までの図  
 下段は高度 100m までの図

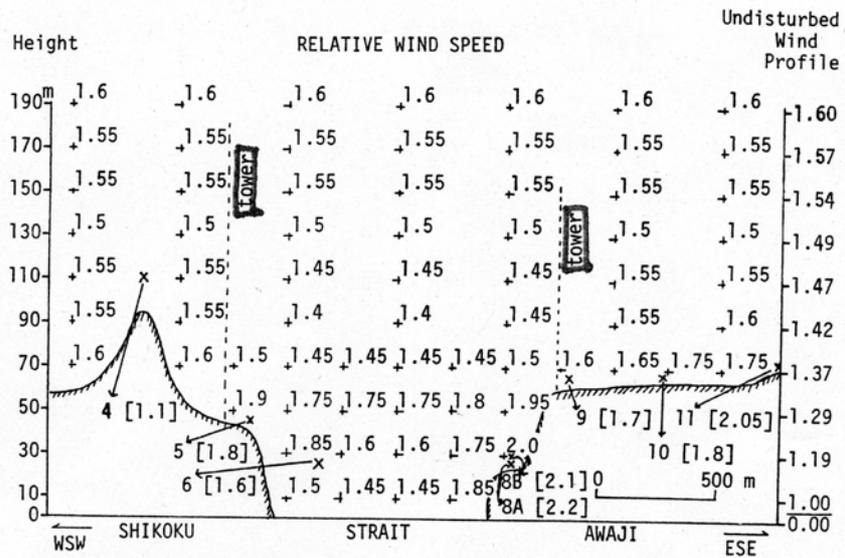


図 25 ポテンシャル流によって求められた海峡の風速相対比  
(Mitsuta,1971 より引用)

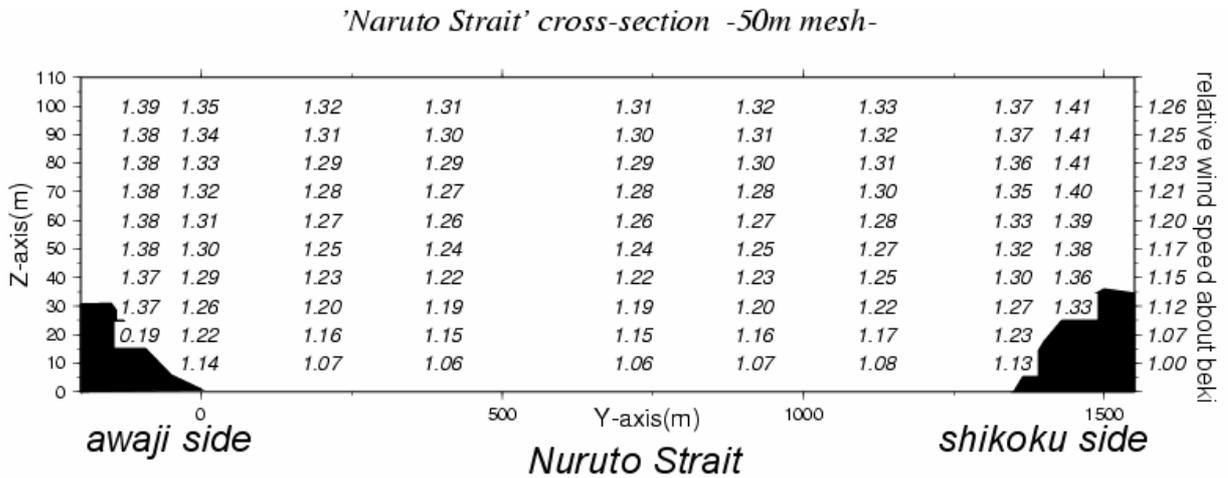


図 26 鳴門海峡の断面における風速相対比 (図 26 のライン)

図中の数値は海峡風上側 10m の風速に対する相対比。図右端の y 軸上の数値は、数値実験の流入条件として与えた鉛直プロファイルの各高度の風速とその 10m における風速の比を示す。

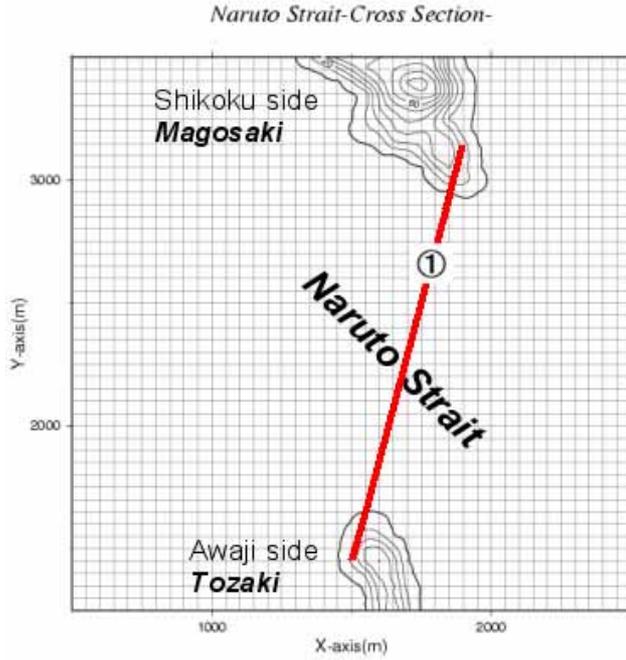


図 27 は図 26 と図 28 下段で示す断面図の直線

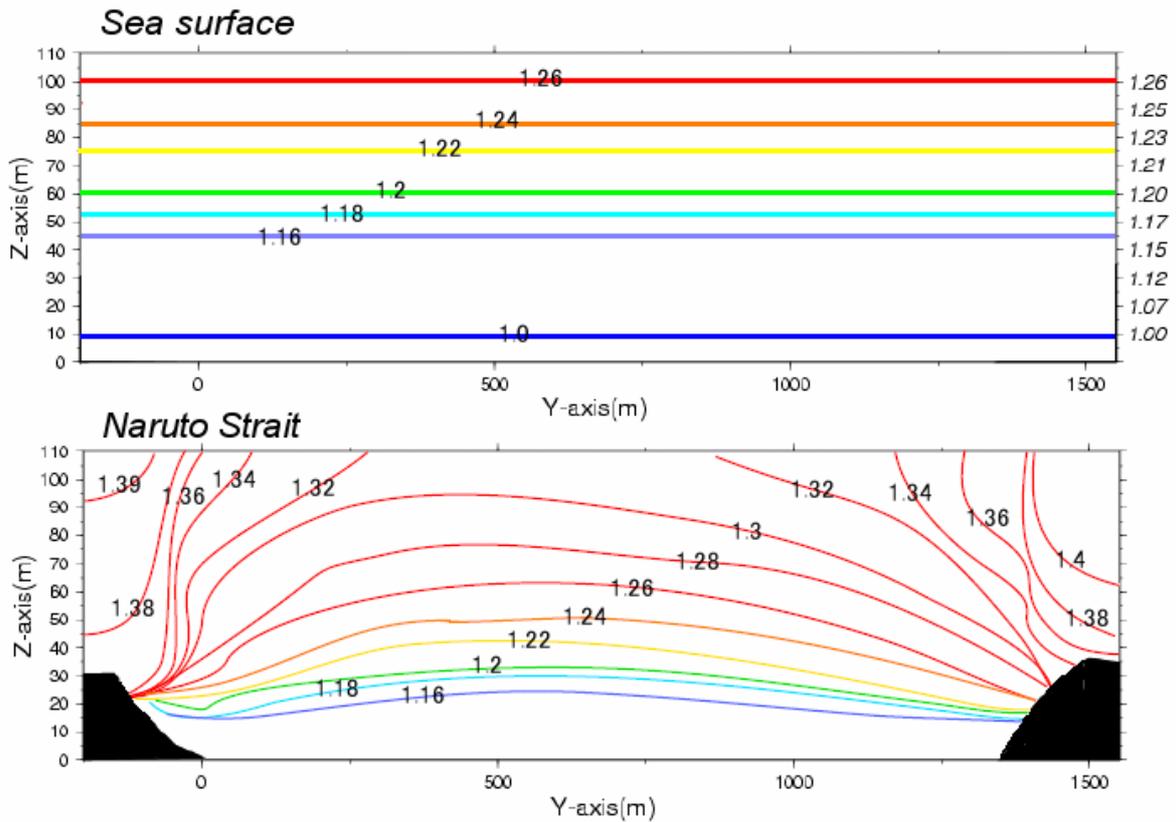


図 28 鳴門海峡における風速分布の断面図（図 26 のライン）

上段は滑らかで静かな海面上 10m と各高度の相対風速の等値線（本数値実験の流入条件に採用した鉛直プロファイル）。下段は図 25 の相対比の等値線。

#### 4.4.3 海峡に突き出る岬の風況 (region 2)

##### 1) 孫埼 (四国側大毛島の岬)

図 30 は、孫埼の高度 10m における風の場合である。四国側の岬では、風上側で一様な南南東風となっているが、海峡部の岬の先端に近づくにつれ、一部の風が北方向に曲げられて岬を迂回するように吹き、風速も多少強まっているのが分かる(図 30(a))。そして、風下側の岬の陰になる部分では風速の分布が全体的に弱くなっている。実際、岬の先端に近い X 軸に平行な断面(図 31)をみると、岬の風上側では V 成分(南北成分)の負の値が分布しており、風下側では逆に正の値を示している(図 31(b))。今、このシミュレーションでは南南東風場を再現するため、地形を 112.5° 回転させている。つまり、南北成分は実際には西南西 - 東北東成分となっており、このことから考えると風上側で負の値(東北東成分)、風下側で正の値(西南西成分)がみられるということは、風が風上側から風下側にかけて岬を迂回する気流が存在することを示している。

図 30(b)をみると、風上側はほぼ全域にわたって収束場で、風下側は発散域と収束域が交互のように分布しているのがわかる。渦度場は風上側のほぼ全域で正の値を示し、風下側では収束場と同じように正の値と負の値が交互に分布している(図 30(c))。なお、図 30(b)の岬の風下側の発散場では、風ベクトルが放射状に吹き出すように分布している。これらのことから、孫埼付近まで進んできた南東風は、風上側で岬によって上昇させられ、岬を越えたあたりで下降して地表面に吹き付け風が発散していると考えられる。実際、図 31(c)や図 33(c)の W 成分(鉛直成分)でも岬の風上側で正の値、風下側で負の値の極大を示しており、この平面におけるベクトルも山を越える流れを示している。

鳴門海峡全体の数値実験(region 1)では、高度が上がるにつれて稜線上で風が強まっている様子が見られ、現地観測や光田・森(1974)による風洞実験の結果でも稜線で風が増強されることが分かっている。そこで、このシミュレーションではこのことについて詳細に調べるとともに、現地観測の観測点に相当する地点の風況について解析を行う。各高度における風速場をみると、高度が上がるにつれて岬の先端

や稜線上で強風域がみられ、稜線上では風ベクトルが少しずつ風向を変えている様子が分かる(図 31の各図)。これは、南南東風が岬に直角に近い角度で吹き付ける時に、岬にブロックされ気流が強い地形上昇を受け稜線上を越えていくためと考えられる。実際、これは前述した風上側、風下側での W 成分の分布や水平収束・発散、風ベクトルの様子からも明らかである。

では、ここから四国側の現地観測点に相当する地点の風況についてシミュレーション結果から述べることにする。なお、今回紹介する観測点は四国側で強い風が増強がみられる孫埼灯台とつつじ丘である。図 28をみても分かるように、孫埼灯台は四国側の岬先端付近の観測点で、現地観測では地形増強率は 1.8 と強い。それに対して、つつじ丘は四国側岬の一番高いところに位置し、風速計の地上高は孫埼灯台の 46m の 2 倍以上で 109m である。しかし、地形増強率は 1.1 と孫埼灯台に比べてかなり弱い。普通、標高の高いところの方が風速は強いし、地形上昇もより多く受けるため風速が強いはずであるが、地形増強率を見る限りではそうっていない。

これは、これまでの研究によると、孫埼灯台などの岬先端に近い部分では岬を水平に迂回してくる気流の効果があるためと考えられており、地形上昇における垂直方向への風の効果と合わせて風が増強される。X 軸と Y 軸にそれぞれ平行な孫埼灯台を通るライン(図 29

のライン)の断面等によると、灯台の風速計の高さ辺りでは、他の同高度に比べて強風域となっているのが分かる(図 31(b)、図 32(a)、図 33(a))。この地点は、図 29 や図 31 などの地形を見ても分かるように地形断面は小さめの丘陵上で風が地形にぶつかって上昇し、この丘陵を超える時に縮脈効果によって風速が増強されていると考えられる。

実際、この観測点は W 成分が正の値の極大近くに位置し(図 32(c)、図 33(c))、渦度も正の値を示している(図 32(e)、図 33(e))。ただ、断面における風ベクトルを見ると風が山越えをしている様子は顕著ではない。これは、丘陵の高さが高くないことが原因と考えられる。では、岬の先端付近独特の気流が迂回する効果はどうなっているだろうか。図 32(b)によると、この観測点は V 成分がやや負の値を示している。つまり、気流が岬の先端に向かう効果も

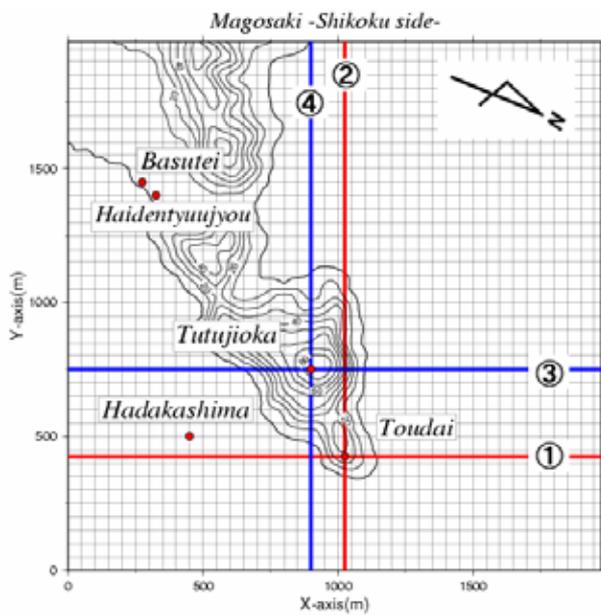
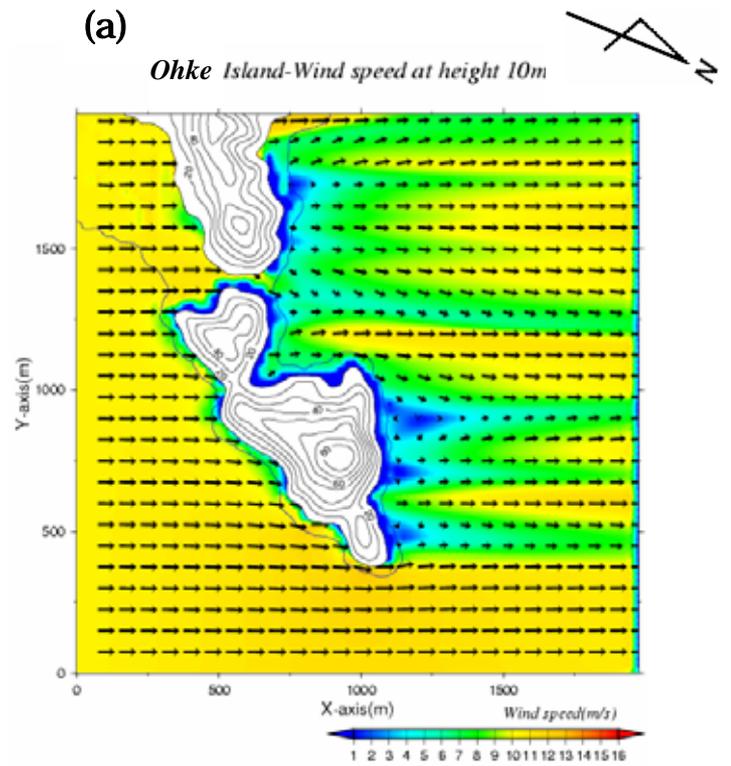
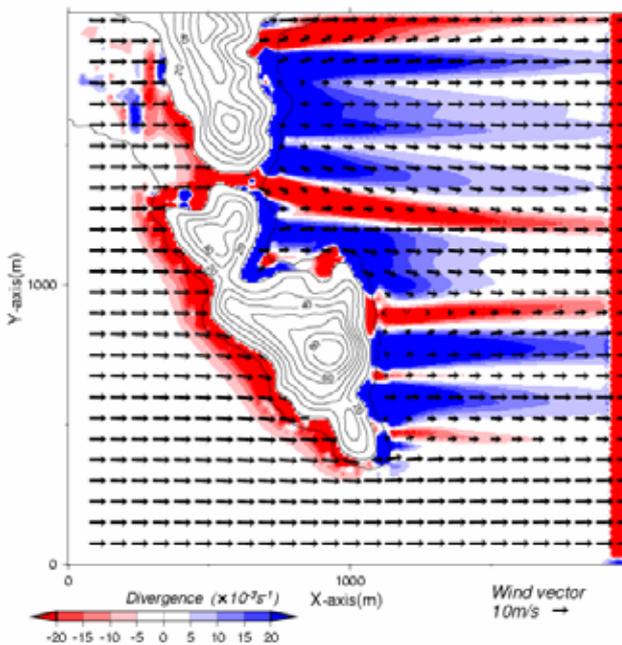


図 29 実験地形上での観測点配置  
 , は図 31,32 で示す孫埼灯台の断面図の直線  
 , は図 33,34 で示すつつじ丘の断面図の直線



(b) Divergence (Z=10m)



(c) Vorticity (Z=10m)

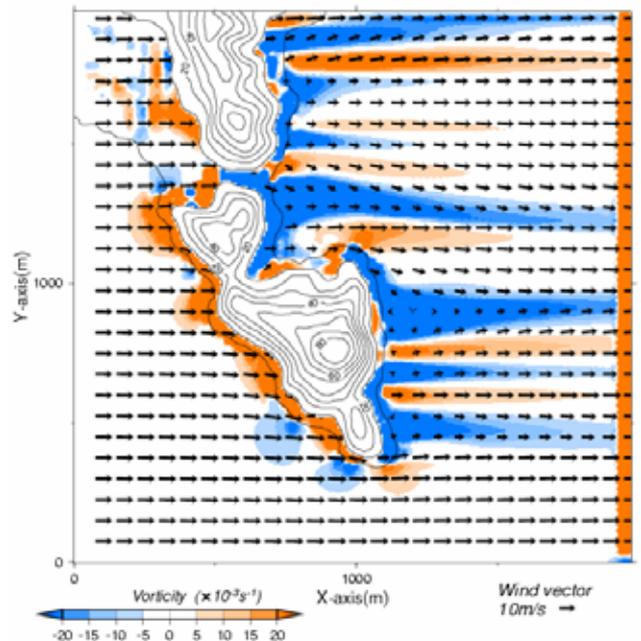


図 30 高度 10mにおける風場 (四国側岬：大毛島)

(a)速度場、(b)水平発散場、(c)鉛直渦度場をシェードで示した。ベクトルは、水平風のベクトルである。

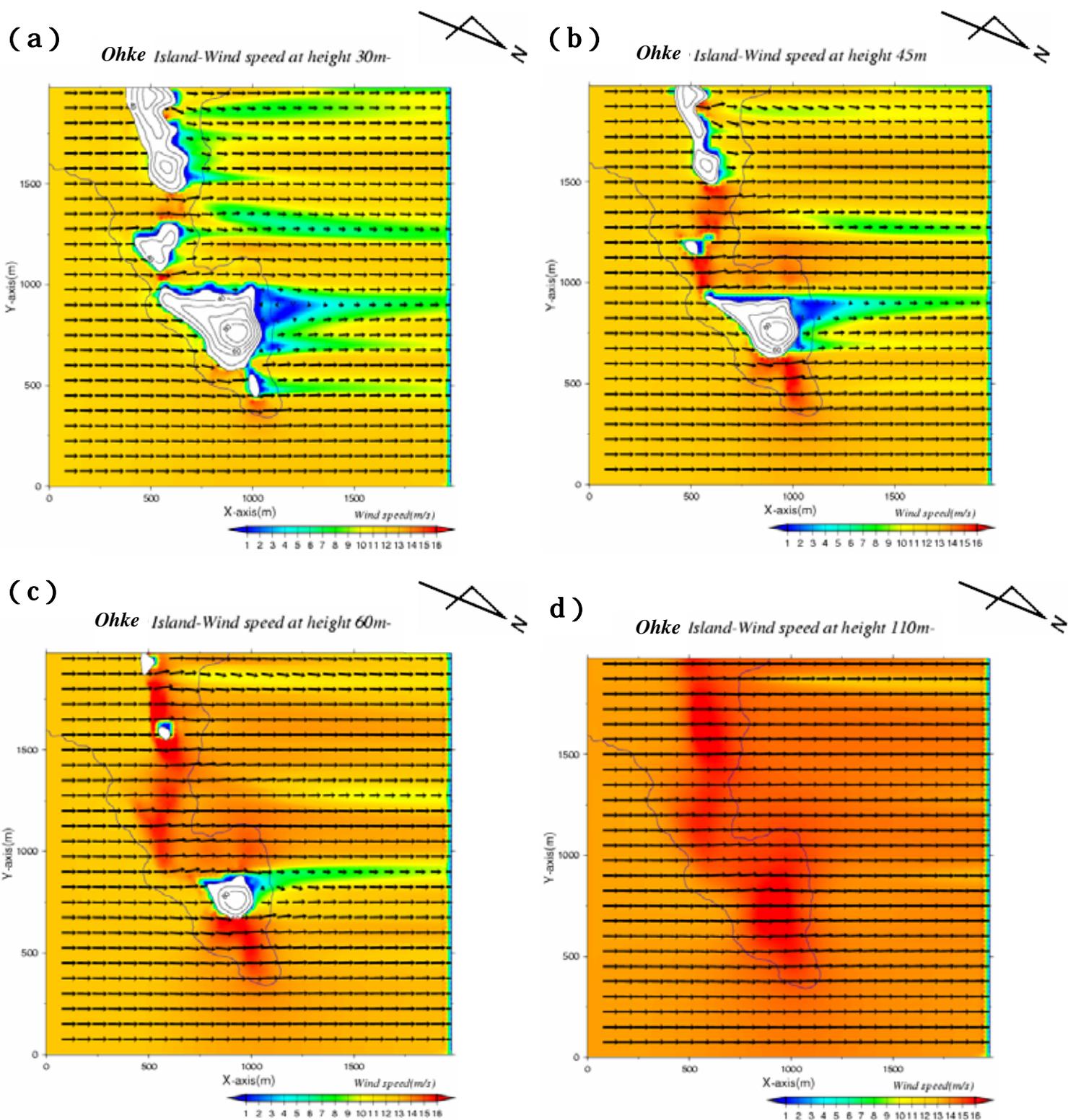


図 31 各高度における風速分布

(a)30m , (b)45m , (c)60m , (d)110m の風速をシェードで示した。ベクトルは、水平風のベクトルである。

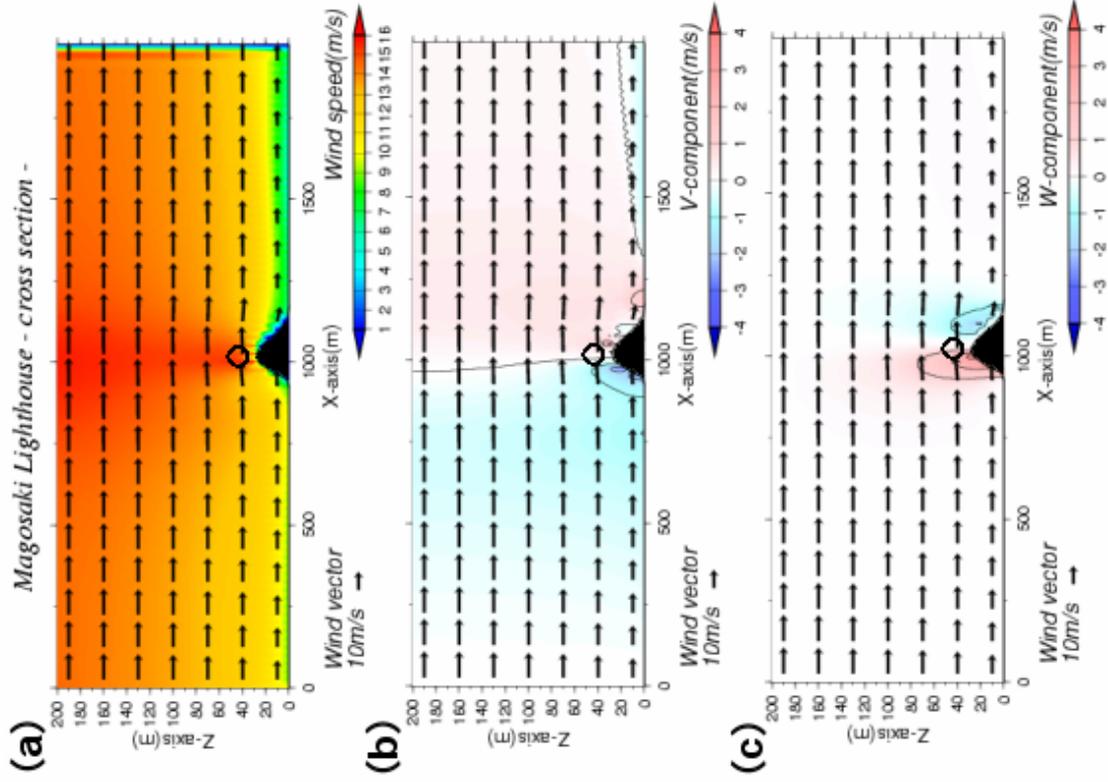
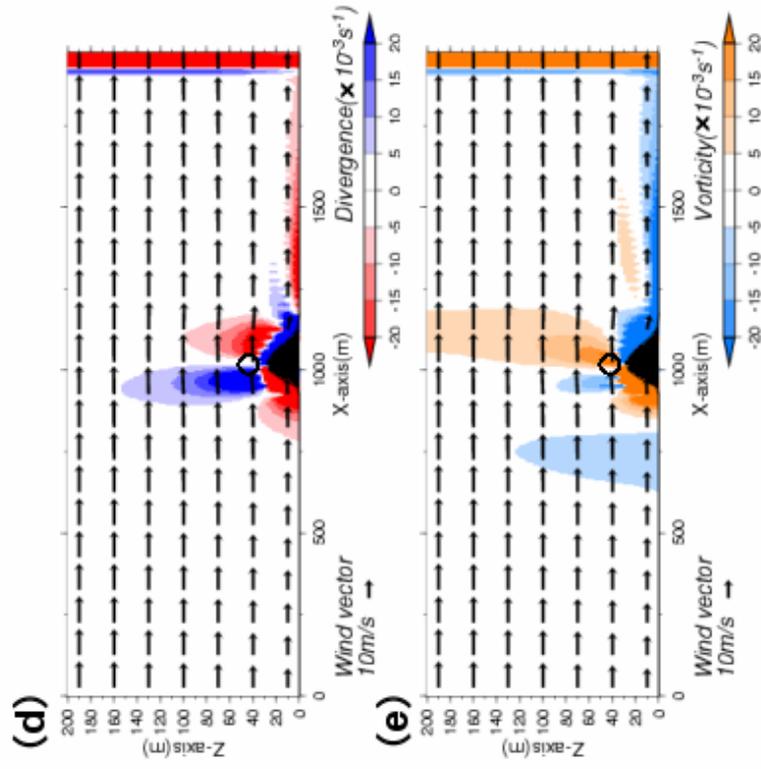


図 32 Y = 17 ( 図 29 のライン ) の断面図

(a)断面における速度場, (b)風の V 成分, (c)風の W 成分, (d)断面における発散場, (e)断面における渦度場をシェードで示す。ベクトルはこの平面における風ベクトル。それぞれの図中にある丸印は現地観測の風速計の設置ポイントに相当する位置



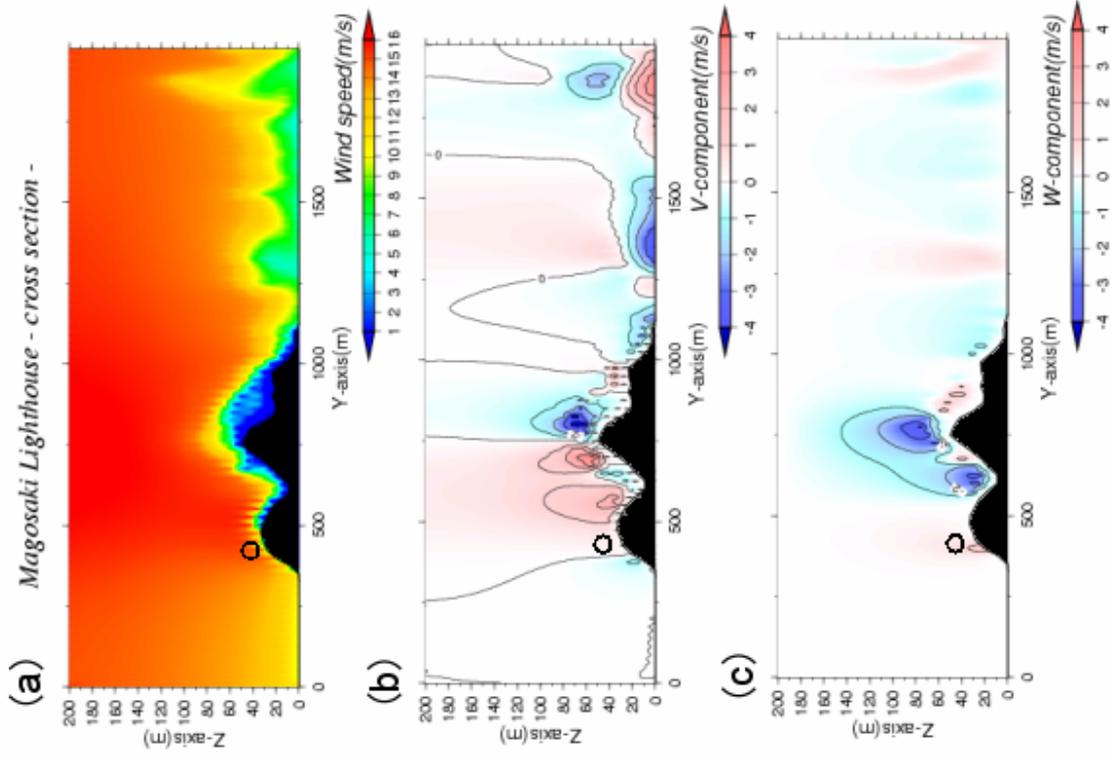


図 33 X = 41 ( 図 29 のライン ) の断面図  
 (a)断面における速度場, (b)風の V 成分, (c)風の W 成分,  
 (d)断面における発散場, (e)断面における渦度場をシェードで  
 示す。それぞれの図中にある丸印は現地観測の風速計の設置ポイ  
 ントに相当する位置

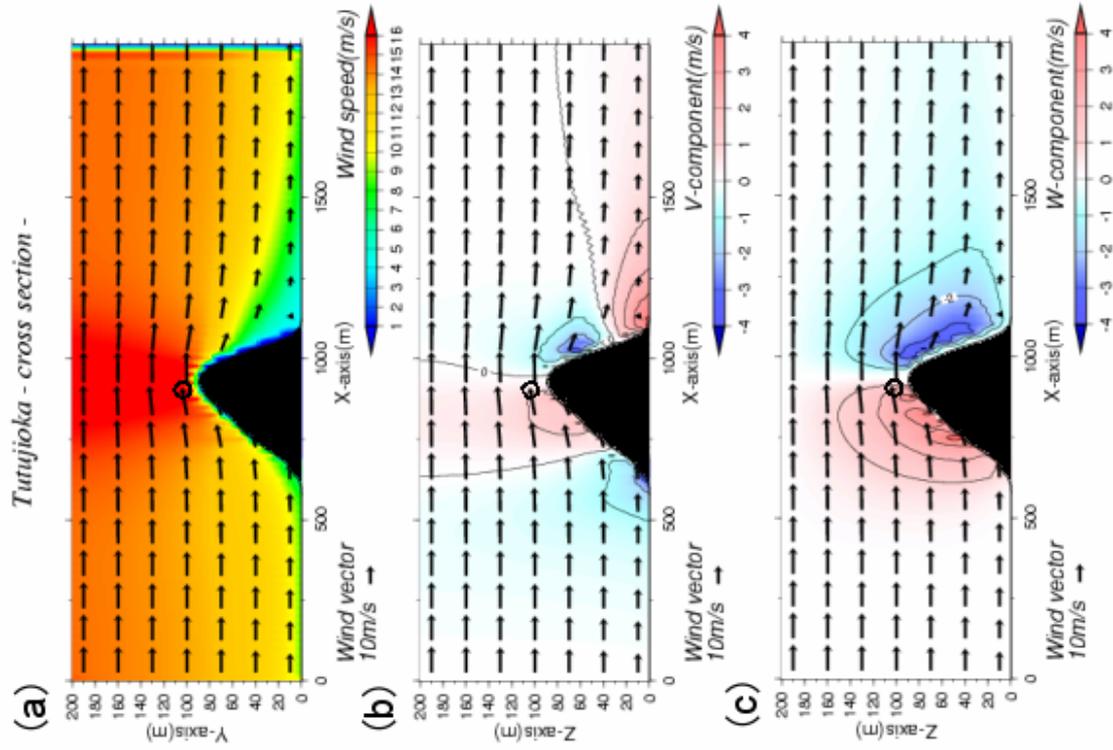


図 34 Y = 30 ( 図 29 のライン ) の断面図

(a)断面における速度場, (b)風の V 成分, (c)風の W 成分, (d)断面における発散場, (e)断面における渦度場をシェードで示す。ベクトルはこの平面における風ベクトル。それぞれの図中にある丸印は現地観測の風速計の設置ポイントに相当する位置

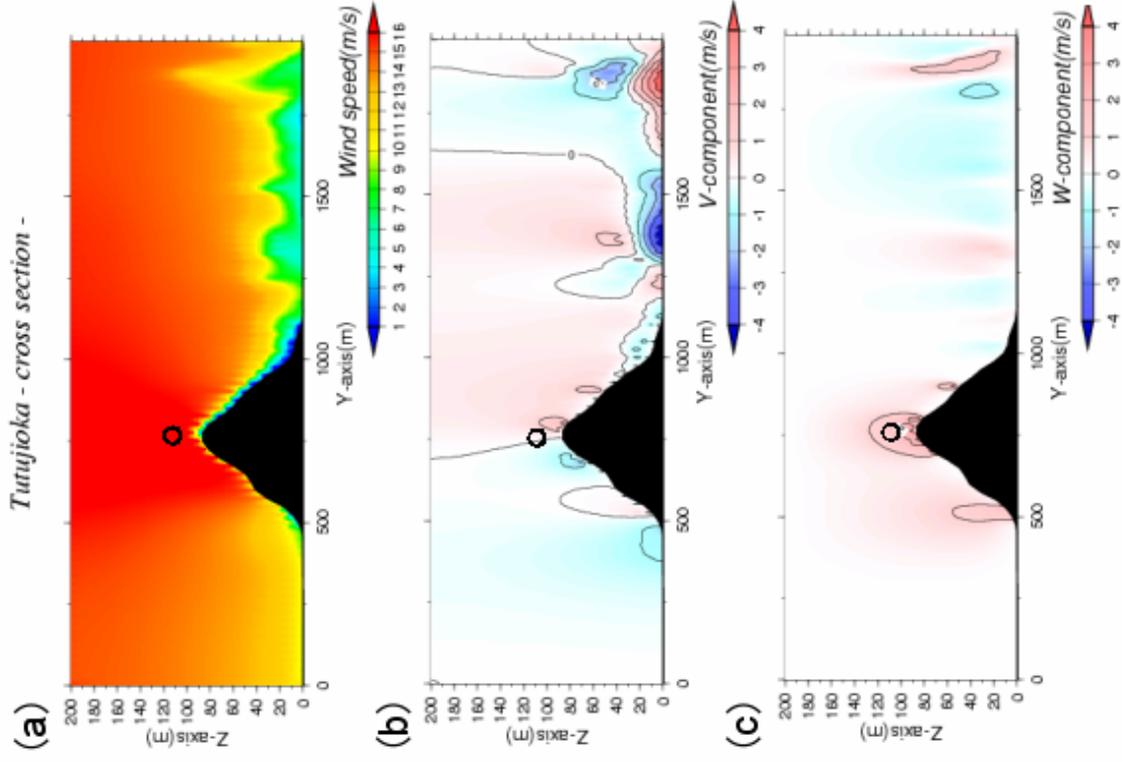
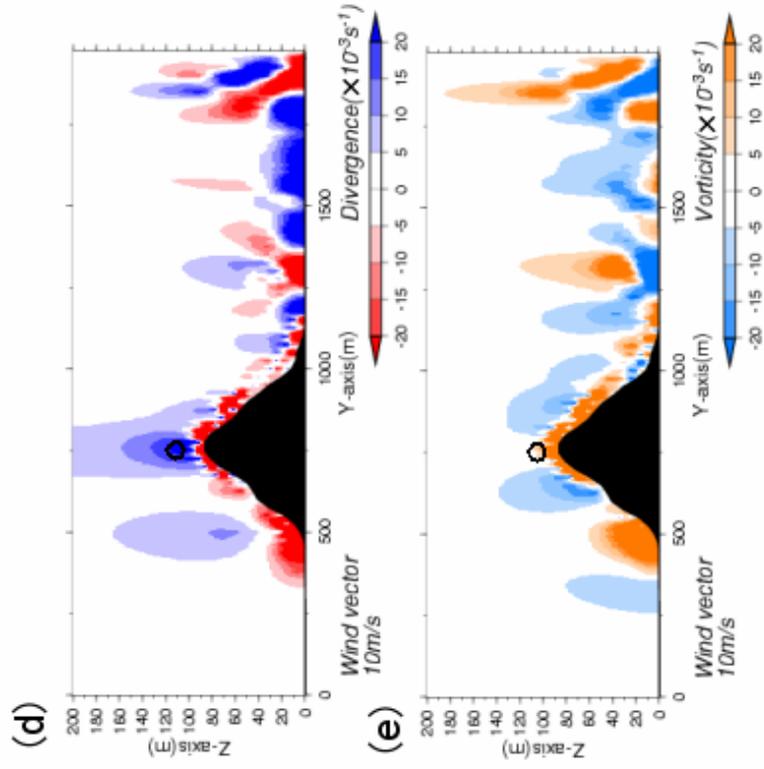


図 35 X = 36 ( 図 29 のライン ) の断面図  
 (a)断面における速度場, (b)風の V 成分, (c)風の W 成分,  
 (d)断面における発散場, (e)断面における渦度場をシェードで  
 示す。それぞれの図中にある丸印は現地観測の風速計の設置ポイ  
 ントに相当する位置



少なからずあるということである。しかし、図 33 (b) では正の値を示しており、今回のシミュレーション結果では明らかに気流の回り込みの効果を確認することはできなかった。

次に、つつじ丘を通るライン(図 29 のライン)について試みる。つつじ丘の風速計設置高度 109m に近い高度 110m の図 31 (d) では、つつじ丘を含め岬の稜線上は強い風速が分布している。X 軸に平行なライン(図 29 のライン)上では他の同高度地点より、はるかに大きい風速となっており、その平面における風ベクトルも大きく山を越えている様子が分かる(図 34 (a))。同様に Y 軸に平行なライン(図 29 のライン)でも風速計の位置は強風域内に位置している(図 35 (a))。それに伴って、X 軸に平行なライン(図 29 のライン)上の風上側では特に W 成分の正の極大域(図 34 (c))や正渦度極大(図 34 (e))、収束極大(図 34 (d))が存在し、風下側ではそれを補うように負渦度極大(図 34 (e))と W 成分の負の極大域(図 34 (c))、発散極大(図 34 (d))が存在している。ただ、収束発散場と渦度場の分布をみている限りでは、単に風上側で上昇して山を越え風下側で下降するというパターンではないことが分かる。

つつじ丘は、前述したように四国側の岬の一番高いところに位置している。よって、風が岬にブロックされた時に水平方向に流れるということはあるが、山越え気流による縮脈効果によって風の増強が起こっている。実際、V 成分を見ても先ほどの孫崎灯台 V 成分のパターンとは全然違っている。

この region2 孫崎のシミュレーション結果では、孫崎灯台に相当する場所の風速は約 15m/s でつつじ丘に相当する場所での風速は約 17m/s であった。地形の影響を受けていない海上 10m での風速との比による数値実験上での地形増強率(相対風速)は、淡路側の説明の後に述べ、現地観測の結果と比較することにする。しかし、すでに現地点で、実測ではつつじ丘に対して風速の強い孫崎灯台が、今回の数値実験ではつつじ丘よりも風速が弱くなっている。

## 2) 門崎(淡路側淡路島の岬)

図 37 は、門崎における高度 10m の風の場合である。淡路側の岬では、風上側で一様な南東

よりの風となっているが、海峡部の岬の先端に近づくにつれ、一部の風が北方向に曲げられて岬を迂回するように吹き、風速も多少強まっているのが分かる(図 37(a))。そして、風下側の岬の陰になる部分では風速の分布が全体的に弱くなっていて、観測点 11 ガレ(図 36)の風下側では風速の極小域がある。なお、先ほどの四国側の孫崎に比べ、この門崎のほうが岬を迂回するような風が顕著に表れている。これは、孫崎に比べ門崎の方の岬が細長く単純な形をしているため、風が岬を迂回しやすいためと考えられる。

岬の先端に近い X 軸に平行な断面(図 39 (b))を見てみると、風上側の岬斜面上には V 成分(南北成分)の正の値の極大域が、風下側の岬斜面上には負の値の極大が分布している。実際、淡路側では地形を 98.5°回転させているので V 成分は北東 - 南西よりの成分であるから、風上側では南西方向に、風下側では北東方向に気流の流れがあることになる。つまり、これは風上側で岬の先端に向かう流れ、風下側で逆の流れがあることになり、気流は岬を迂回していることになる。また、四国側孫崎の先端付近の断面(図 31(b))と比べると、淡路側のほうが稜線の標高が低いにも関わらず、V 成分の値は大きい。普通、標高が高いものに比べ、低いほうが風は容易に山越えをしやすいため、水平方向に流れを変えにくいと考えられる。しかし、標高の低い淡路側のほうが、岬を迂回する流れが強いということは、迂回する流れが生じやすい地形要素があるということである。

図 37 (b),(c) をみると、風上側全体に収束場と正渦度場があり、風下側では発散場、負渦度場となっている。そして、各高度の風の場合(図 38)を見ると、高度が上がるにつれ高度 10m で風の強かった岬先端、さらに稜線を中心に強風域が現れ、稜線上では風向が反時計回りの方向に曲げられているのが分かる。これは、直進してきた南東よりの風が岬に当たって、風上側で地形上昇し、岬の稜線上を山越えしたのち、岬を越えた風が下降しているためと考えられる。

では、次に淡路側の現地観測点に相当する地点の風況についてシミュレーション結果から述べることにする。なお、今回紹介する観測点は淡路側で強い風の増強がみられる地点 8A 鳥居(上)と地点 10 駐車場、地点 11 ガレである。図 36 をみても分かるように、鳥居は四国

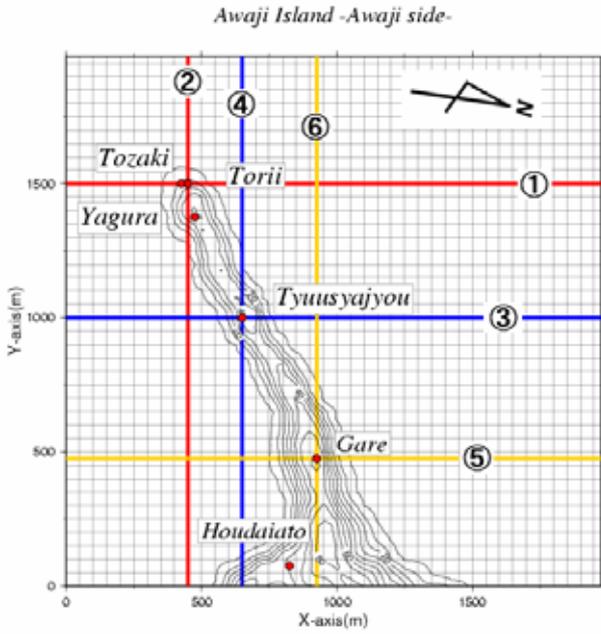
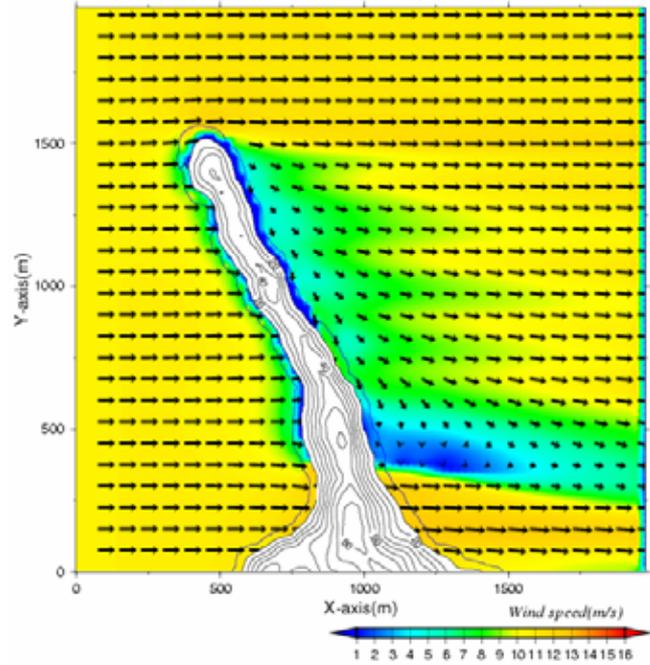
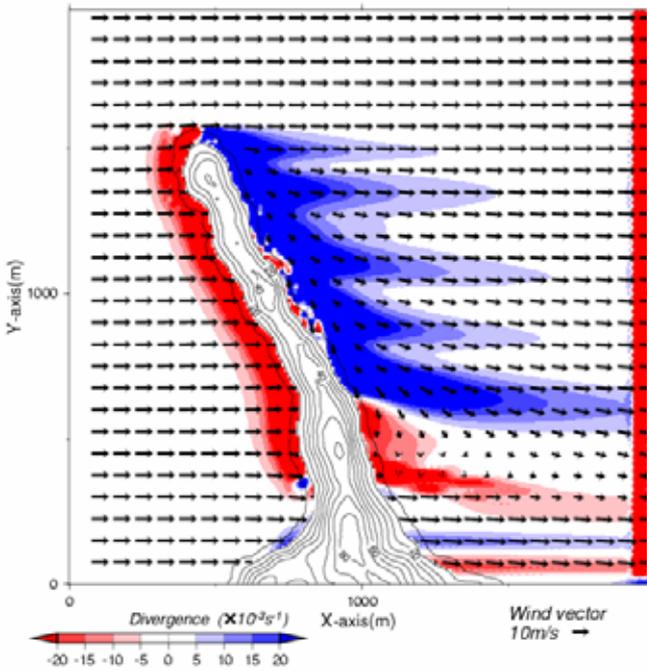


図 36 実験地形上での観測点配置  
 , は図 39,40 で示す鳥居の断面図の直線  
 , は図 41,42 で示す駐車場の断面図の直線  
 , は図 43,44 で示すガレの断面図の直線

(a) Awaji Island - Wind speed at height 10m-



(b) Divergence (Z=10m)



(c) Vorticity (Z=10m)

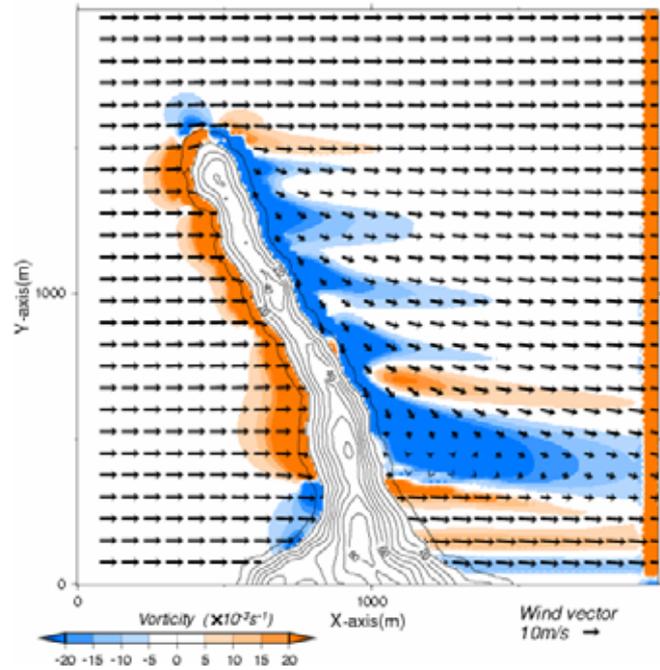


図 37 高度 10m における風の間 (淡路側岬：淡路島)

(a)速度場、(b)水平発散場、(c)鉛直渦度場をシェードで示した。ベクトルは、水平風のベクトルである。

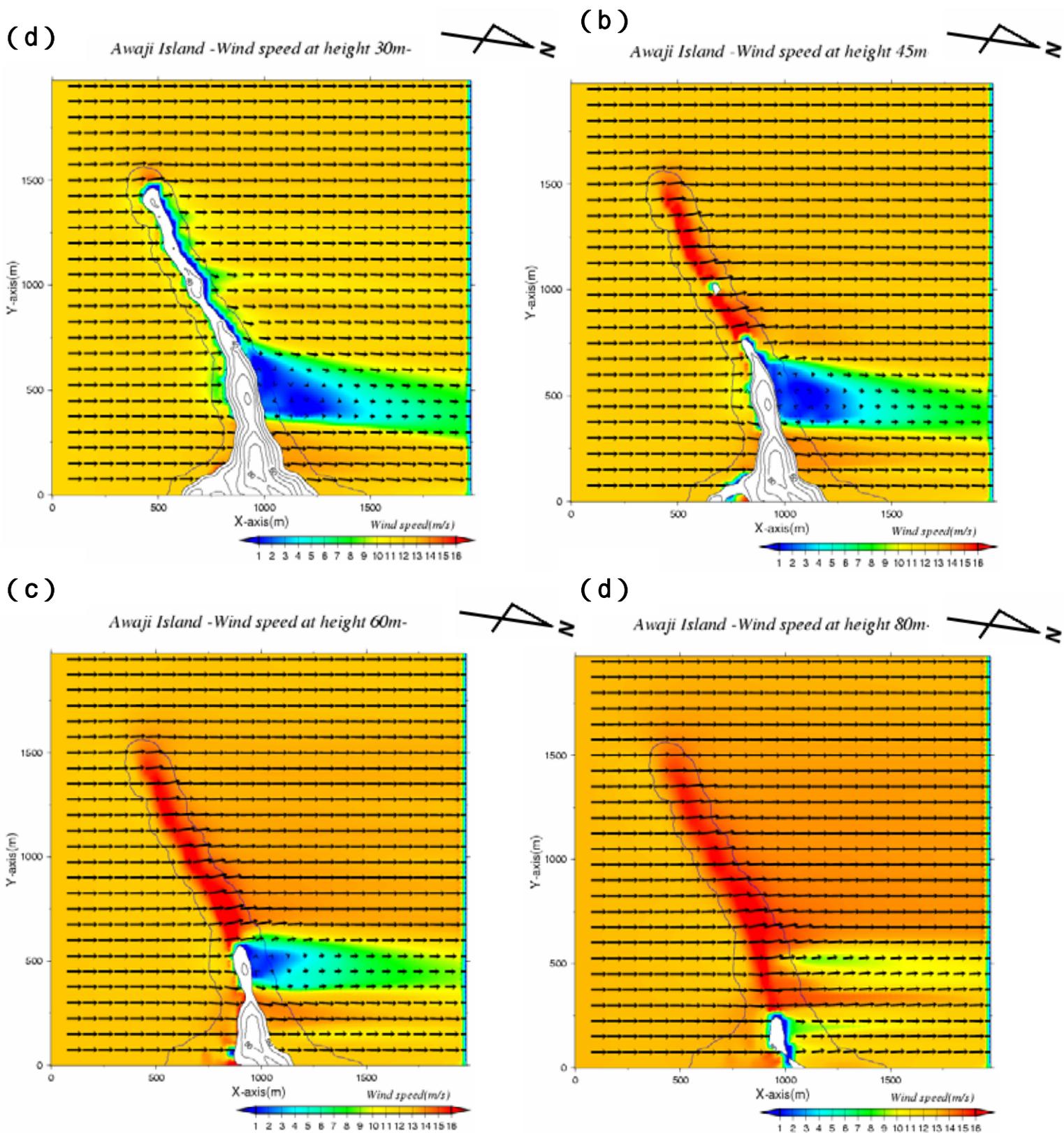


図 38 各高度における風速分布

(a)30m , (b)45m , (c)60m , (d)80m の風速をシェードで示した。ベクトルは、水平風のベクトルである。

側の岬先端付近の観測点で、現地観測では地形増強率は 2.1 と最も強い値が確認されている。それに対して、駐車場は淡路側岬の真中辺りに位置し、ガレは岬の根元の少し前付近である。風速計が設置されている高さの海拔高度は鳥居が 30m、駐車場が 47m、ガレが 30m である。駐車場とガレの地形増強率は、それぞれ 1.8 と 2.05 で、鳥居（上）と比べると 2 地点ともに標高が高いのに、増強率は同程度もしくは低くなっている。

鳥居を通る X 軸と Y 軸にそれぞれ平行なライン（図 36 のライン）の断面等によると、灯台の風速計の高さ辺りでは、他の同高度に比べて強風域となっているのが分かる（図 38(a)、図 39(a)、図 40a)）。南東よりの風が吹き付けてくる方向の断面（図 36 のライン、図 39）をみると、このポイントは V 成分で正の値の極大域付近（図 39(b)）、W 成分や収束場、渦度場では、やや正の値よりで、収束域で正渦度域であることが分かる。また、Y 軸に平行なライン（図 36 のライン、図 40）でも V 成分が正の極大域（図 40(b)）で、W 成分正の値（図 40(c)）、収束場（図 40(d)）、正渦度域（図 40(e)）である。このことから、この鳥居では風を増強させる要因としては、V 成分の要因（気流の回り込み効果）と山越え気流の要因ともにあるものの、気流の回り込み効果のほうが強い感がある。

駐車場を通るラインでは、X 軸と Y 軸平行なライン両方（図 36 のライン）ともに、鳥居の標高と比べて稜線の標高が高くなり斜面の勾配が大きくなった影響もあり、風上側斜面で W 成分（図 41(c)、図 42(c)）が V 成分（図 41(b)、図 42(b)）に比べて卓越しているのが分かる。つまり、これは地形によって風が上昇させられ、その効果によって風速が増強されていると考えられる。実際、このポイントでは同じ断面上の同高度に比べて強風が吹いていて（図 41(a)、図 42(a)）、風ベクトルが山越えをしている様子が良く分かる。なお、稜線頂上付近で V 成分の正の値が強くなっているが、この要因によって頂上付近での風向が反時計回り（V 成分正の方向）に曲げられる（図 38）と推測される。

ガレを通る X 軸に平行なライン（図 36 のライン）では、駐車場の場合と同じく稜線の標高が高くなり斜面の勾配が大きくなった影響もあり、風上側斜面で W 成分（図 43(c)）が卓

越しているのが分かる。そして、風ベクトルに注目すると、風が山越えをしている様子が良く分かる。風の速度場をみると両ラインともに、強風が吹いている（図 43(a)、図 44(a)）。なお、ガレを通る Y 軸に平行なライン（図 36 のライン）はガレから岬の根元の稜線上を走っており、これをみると稜線上はほぼどの高度でも同高度の他の地点に比べて強風が吹いていることが分かる。なお、V 成分の正の値が頂上付近に分布（図 43(b)、図 44(b)）しており、X 軸に平行な断面（図 36 のライン）では高度 40m から上空で頂上から風下側 500m の距離くらいまで V 成分正の領域が伸びている（図 43(b)）。これは、図 38(d)のガレの頂上から風下側にかけての風向が反時計回り（V 成分正の方向）に曲がることに対応している。

この region2 門崎のシミュレーション結果では、鳥居（上）に相当する場所の風速は約 15m/s で駐車場、ガレに相当する場所での風速はそれぞれ約 17m/s、約 17m/s、であった。結局、この門崎におけるシミュレーションでも実測では他の 2 地点より風速の強い鳥居（上）が、今回の数値実験では他 2 地点よりも風速が弱かった。

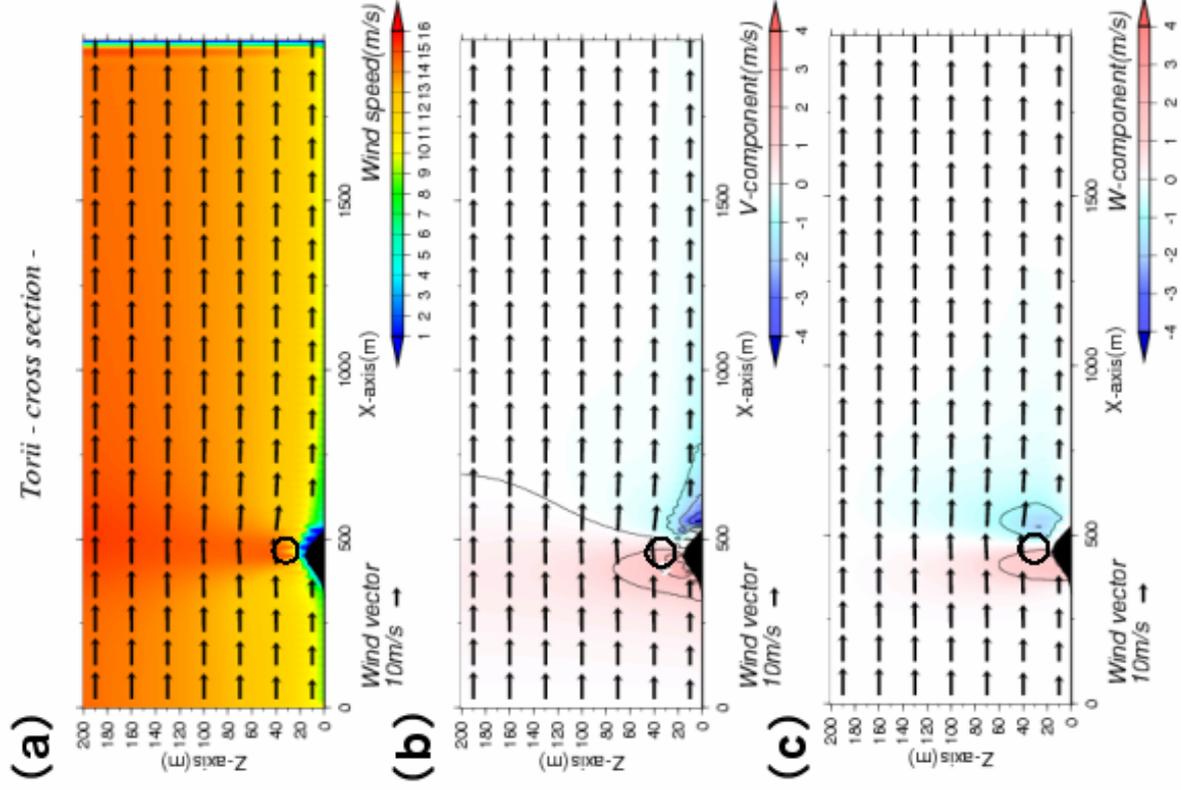


図 39 Y = 60 ( 図 36 のライン ) の断面図

(a)断面における速度場，(b)風の V 成分，(c)風の W 成分，  
 (d)断面における発散場，(e)断面における渦度場をシェードで  
 示す。ベクトルはこの平面における風ベクトル。それぞれの図中  
 にある丸印は現地観測の風速計の設置ポイントに相当する位置

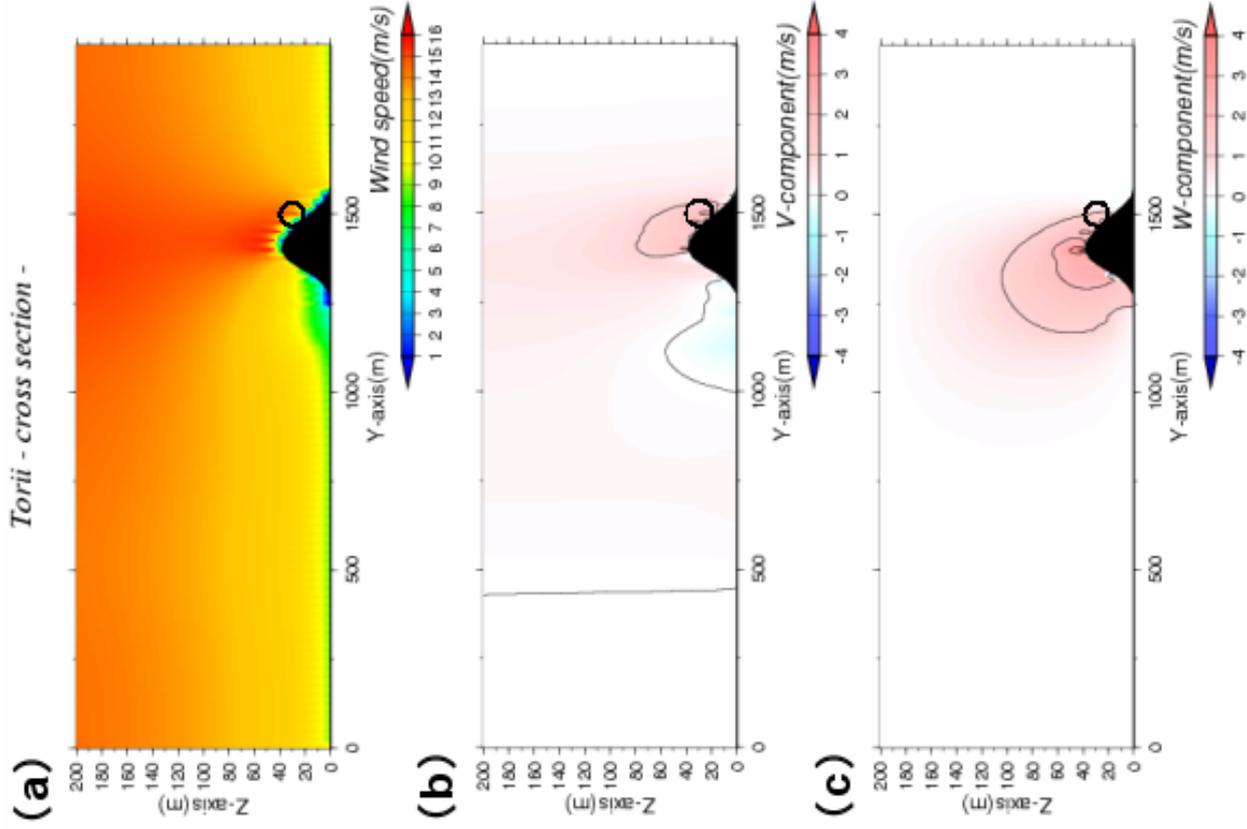
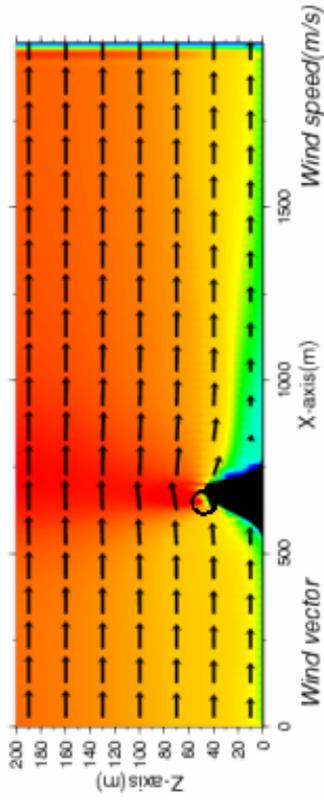
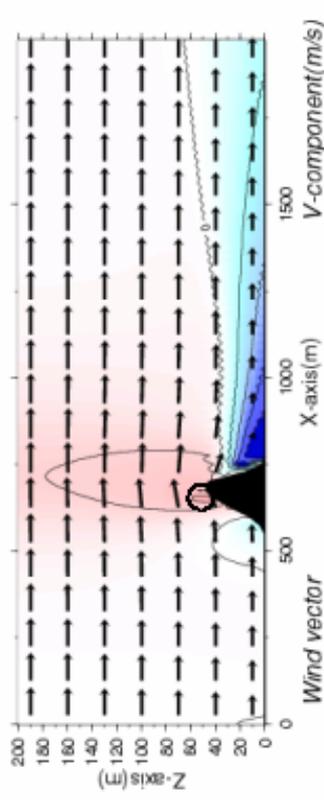


図 40 X = 18 (図 36 のライン) の断面図  
 (a)断面における速度場, (b)風の V 成分, (c)風の W 成分,  
 (d)断面における発散場, (e)断面における渦度場をシェードで  
 示す。それぞれの図中にある丸印は現地観測の風速計の設置ポイ  
 ントに相当する位置

(a) Tyusyajyou - cross section -



(b)



(c)

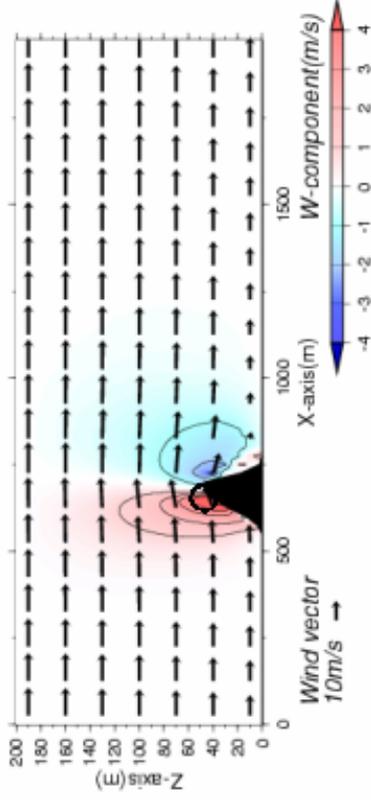


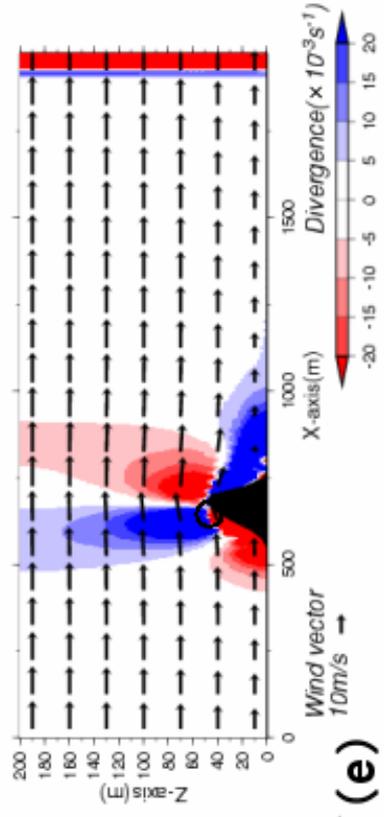
図 41 Y = 40 ( 図 36 のライン ) の断面図

(a)断面における速度場, (b)風の V 成分, (c)風の W 成分,

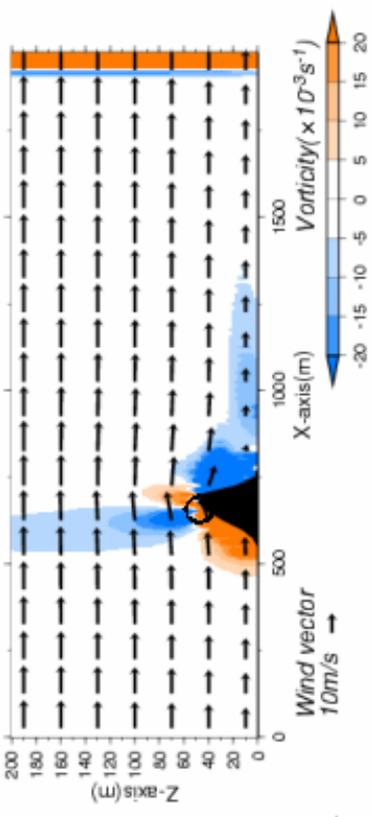
(d)断面における発散場, (e)断面における渦度場をシェードで

示す。バクトルはこの平面における風ベクトル。それぞれの図中にある丸印は現地観測の風速計の設置ポイントに相当する位置

(d)



(e)



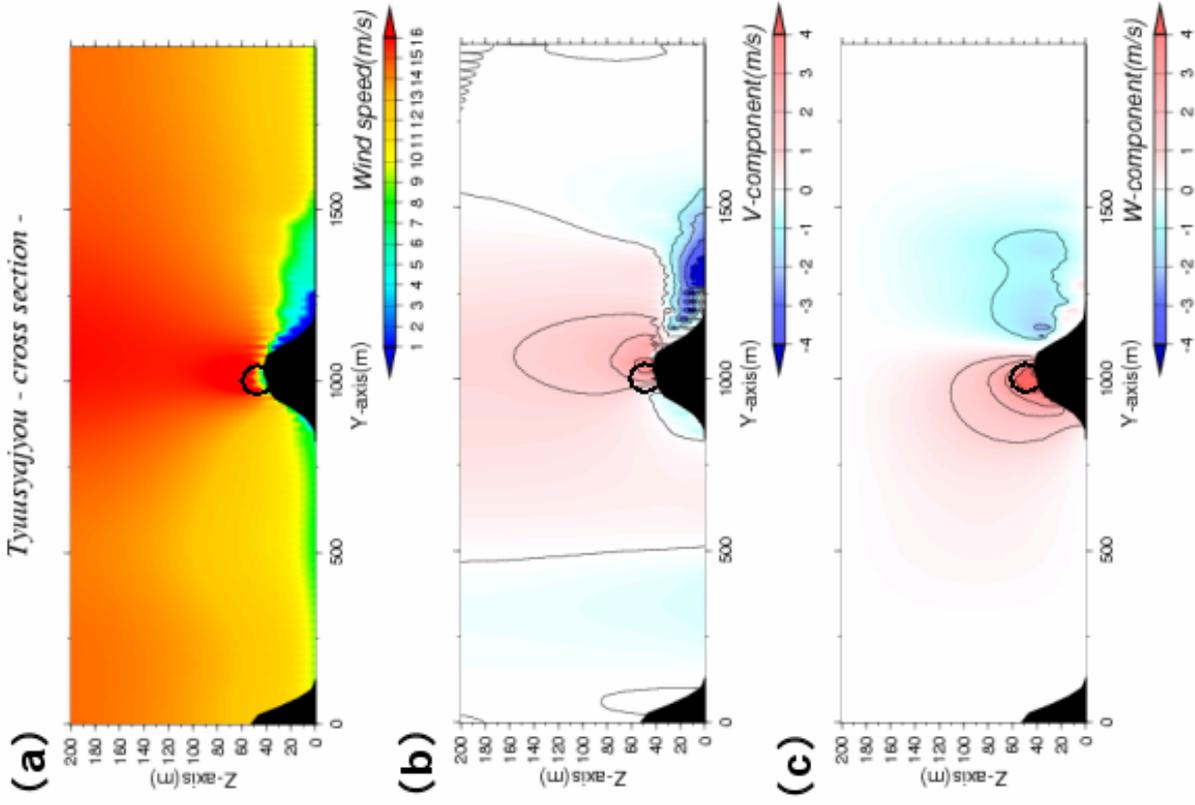


図 42 X = 26 ( 図 36 のライン ) の断面図  
 (a)断面における速度場 , (b)風の V 成分 , (c)風の W 成分 ,  
 (d)断面における発散場 , (e)断面における渦度場をシェードで  
 示す。それぞれの図中にある丸印は現地観測の風速計の設置ポイ  
 ントに相当する位置

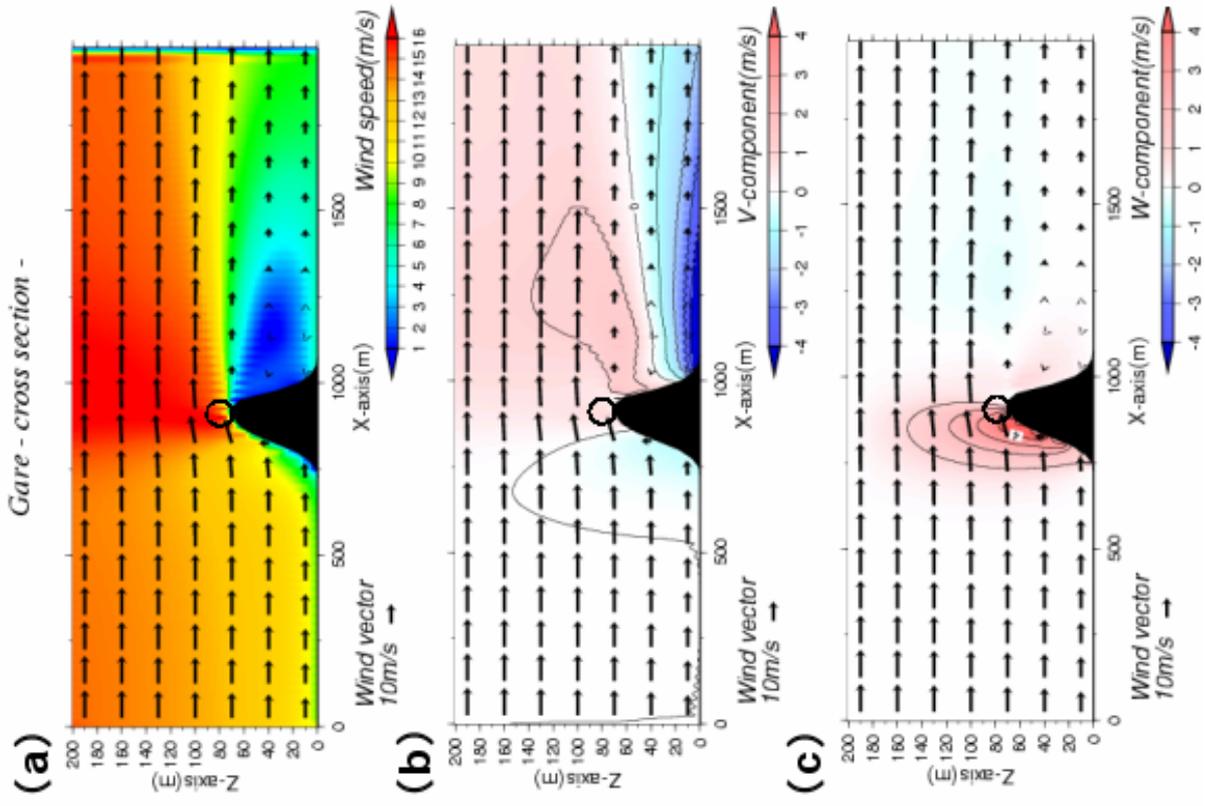


図 43 Y = 19 ( 図 36 のライン ) の断面図  
 (a)断面における速度場 , (b)風の V 成分 , (c)風の W 成分 ,  
 (d)断面における発散場 , (e)断面における渦度場をシェードで  
 示す。ベクトルはこの平面における風ベクトル。それぞれの図中  
 にある丸印は現地観測の風速計の設置ポイントに相当する位置

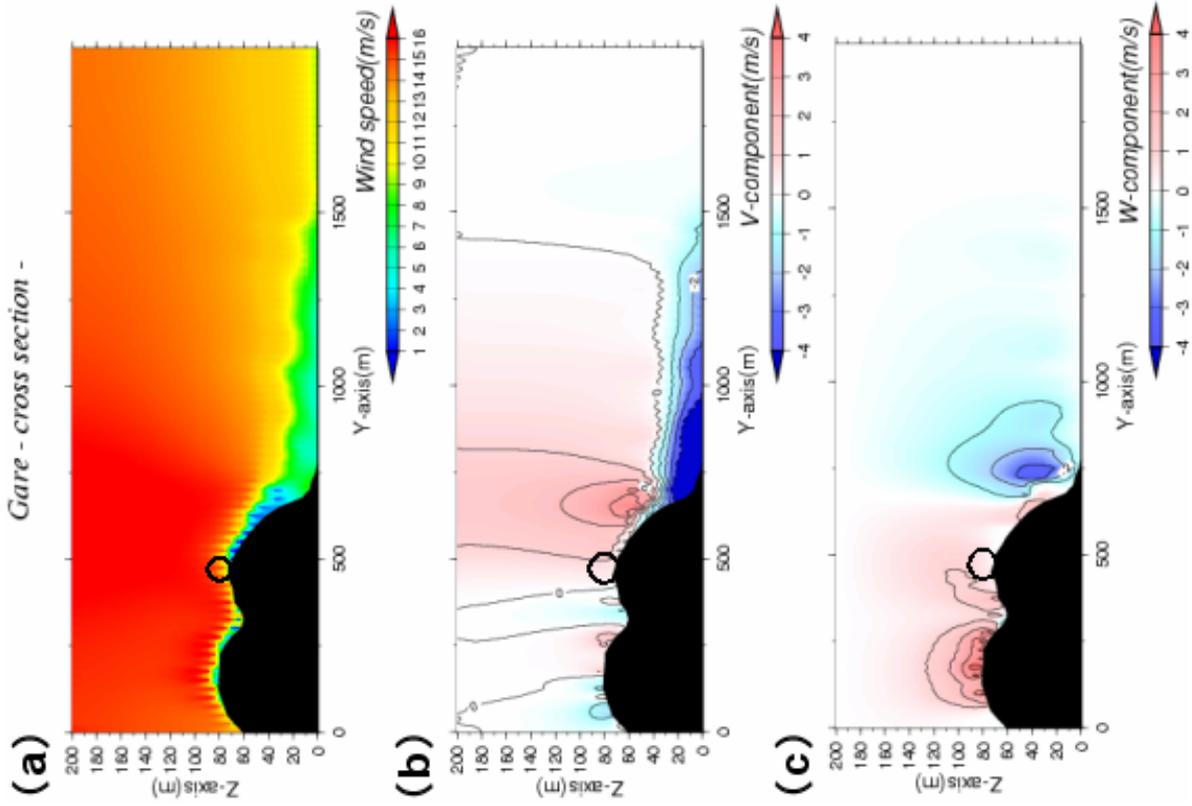


図 44 X = 37 ( 図 36 のライン ) の断面図

(a)断面における速度場, (b)風の V 成分, (c)風の W 成分, (d)断面における発散場, (e)断面における渦度場をシェードで示す。それぞれの図中の丸印は現地観測の風速計の設置ポイントに相当する位置

#### 4.4.4 地形増強率

region2までによるシミュレーション結果から、現地観測が行われた各観測点に相当するシミュレーション上の地点での風速を求め、地形増強率を計算し、実測の地形増強率との比較を行うことにする。表2は、シミュレーションと現地観測の地形増強率である。なお、増強率を算出するにあたり、シミュレーションでの里浦の風速は region1 の海峡風上側で地形の影響を受けていない流入境界に近い海面上 10m の風速を使用している。これは、現地観測で里浦の上空 10m の風を地形の影響を受けていない海面上 10m の風と仮定して基準値として使っているためである。

シミュレーションでの地形増強率の最高値は、つつじ丘で 1.7 であった。これは、実測の 1.1 と比べるとかなり大きな値となっている。では、実測で大きな値となっていた海峡に近い岬先端付近の門崎鳥居、やぐら、孫崎灯台の値を比較してみる。シミュレーションでは、門崎鳥居 1.4、やぐら 1.5、孫崎灯台 1.4 となっていた。これは、実測に比べるとどれもその差は大きい。シミュレーションと実測の結果を見ると、駐車場の増強率が一致しているのみで、後の値には差が見られた。これは、今回行ったシミュレーションで実際の地形上に起こっている風速の増強を再現できていないと考えざるを得ない。

それでは、ここからシミュレーションでの地形増強率について、もう少し考察してみることにする。

全体的に増強率を見ると、つつじ丘を除き、全体的にその増強率が実測に比べて小さいことに気づく。特に、岬先端付近での増強率が小さいように感じられる。これは、恐らく今回の数値実験で与えている地形に起因しているのではないかと考えられる。今回の数値実験では、シミュレーションの計算処理の問題から、一番大きな範囲をカバーしている region1 でも海峡に突き出ている岬の根元付近までしか計算領域に組み入れることができなかった。可能なら、里浦までをカバーする領域を計算地形に入れ、なるべく小さい格子間隔でシミュレーションを行うことが望ましいと考えられる。そうすることで、里浦付近から鳴門海峡に向かって徐々に海域が狭まっていく効果（風の収束）などのもう少しスケールの大きな効果を計算に取り込むことができると思われる。

ただし、これを行うには計算量が莫大になり、またシミュレーション方法にも一工夫必要になる。また他の要因として、岬の先端に向かって迂回する水平方向の気流が完全には再現されていないと考えられる。この効果は今回のシミュレーションにおいても見られるが、大きくない。これは、水平格子間隔が扱っている現象に対して大きいため、水平方向の流れが計算により弱められている可能性があるかと推測される。これは、この後の region3 や region4 でももう少し考えてみることにする。

	標高(m)	風速計高(m)	高さ(m)	実最大風速(m/s)	実相対比	実験風速(m/s)	実験相対比
里浦	10	5	15	17.9	1.0	10.49	1.0
公園バス停	5	5	10	-	-	10.80	1.0
配電柱状	54	5	59	-	-	12.94	1.2
つつじ丘	99	10	109	20.2	1.1	17.32	1.7
孫崎灯台	36	10	46	33.5	1.9	14.99	1.4
飛島	25	3	28	19	1.1	-	-
裸島	19	5	24	27.5	1.5	11.94	1.1
門崎鳥居(上)	20	10	30	37.6	2.1	14.72	1.4
やぐら	50	10	60	39.2	2.2	15.68	1.5
駐車場	42	5	47	28.8	1.6	17.06	1.6
ガレ	75	5	80	35.4	2.0	17.14	1.6
笹山	92	5	97	30	1.7	-	-
砲台跡	51	8	59	-	-	12.71	1.2
門崎	19	3	22	-	-	13.28	1.3

表2 シミュレーションと現地観測の地形増強率

実測による地形増強率は実相対比、シミュレーションによるものは実験相対比として示してある。表中の高さは標高と風速計高を足したもので、地表面から風速計までの距離を表す。なお、配電柱上の標高は配電柱の柱の高さである。

今回のシミュレーションでの地形増強率の数値自体は、実測の風速の増強を再現できてないと考えられる。しかしながら、シミュレーションの増強率の傾向を見ると、鳴門海峡における風速の増強は示していることが分かる。例えば、配電柱上（図 29 参照）は一様な南南東風が直撃する岬の中ほど少し後ろに位置し、その高さも 59m である。それに対して、地形増強率は標高の低い岬先端付近に位置する孫崎灯台や鳥居のほうが大きくなっている。

最後に、光田・森（1974）で行われた風洞実験より求められた地形増強率との比較をする。図 45 はその結果である。シミュレーション結果より求めた地形増強率（表 2）と風洞実験による地形増強率（図 45）を比較すると、全体の値においてシミュレーション結果の方が良い数値となっている。ただ、風洞実験の数値を見ると、実測で最も増強率の大きい鳥居の値が他の地点よりも大きく、その増加傾向で言うと風洞実験による結果の方が実測に対応していると考えられる。

#### 4.4.5 門崎先端付近の風況（region3, 4）

図 46、図 47 は、region3 と region4 それぞれの各高度における風速分布である。この図を見ると、これまで述べてきた region1 や region2 と同じように岬の先端部分で強い風速がみられ、高度が上がるにつれて岬の稜線部分にも強い風速が現れている。風のベクトルをみると、先ほどより格子間隔が小さくなっているのでより風の流れが分かり、岬先端部分では風が曲げられて岬を回っている様子がよく分かる。また、両方の図の稜線上（図 46（c）、図 47（c））では風ベクトルが稜線を越える際に反時計回りに曲げられているのが分かる。なお、この 2 つの解析領域には、門崎、鳥居、やぐらの 3 地点に相当するポイントが含まれている。これらのポイントは、図 46 と図 47 でみるといずれも強風域となっており、地形による風速増強を受けていると考えられる。

そこで、実際に 3 地点の風速をみることにす

地点番号 地点名	実測値 (相対比)	風洞実験					
		縮率 1/12,000 模型		縮率 1/4,000 模型		縮率 1/2,000 模型	
1 里浦	1.0	12m 70	1.00				
		20m 71					
4 つつじ丘	1.1	12m 91	1.28	12m 77	1.10		
		20m 92		20m 87			
5 燈台	1.8	12m 79	1.13	12m 77	1.10		
		20m 83		20m 81			
6 飛島	1.15	12m 72	1.03	12m 83	1.19		
		20m 76		20m 82			
7 裸島	1.6	12m 72	1.03	12m 75	1.07		
		20m 72		20m 81			
8 鳥居(上)	2.1	12m 77	1.10	12m 89	1.27	6m 88	
		20m 87		20m 89		10m 91	1.30
						20m 93	
9 やぐら	1.7	12m 87	1.24	12m 91	1.30	6m 81	
		20m 87		20m 92		10m 87	1.24
						20m 87	
10 駐車場	1.8	12m 79	1.13	12m 80	1.14	6m 81	
		20m 82		20m 80		10m 82	1.17
						20m 80	
11 カレ	2.05	12m 82	1.17	12m 84	1.20		
		20m 81		20m 88			
12 笹山	1.8	12m 80	1.14				
		20m 75					

図 45 風洞実験による地形増強率（光田・森，1974 より引用）

る。region3 の 10m 格子間隔では、門崎が約 13m/s、鳥居が約 15 m/s、やぐらが 16 m/s であった。そして、地形増強率は門崎 1.3、鳥居 1.5、やぐら 1.5 であった。region4 の 5m 格子間隔では、門崎が約 14m/s、鳥居が約 16 m/s、やぐらが 16 m/s で、地形増強率は門崎 1.4、鳥居 1.5、やぐら 1.5 であった。4.4.4 節の 25m メッシュのものと比べると、メッシュが小さくなるにつれて風速が増し、実測に近づいているのが分かる。しかし、まだ実測には及ばない。これは、メッシュを小さくしてシミュレーションの精度が上がったものの、格子間隔を小さくしたが故に岬の先端付近の地形しか計算領域に組み込むことができず、岬の根元付近から先端までを含む水平方向の気流の先端へ向かう流れ、つまり岬を迂回する流れが過小評価されたと推測される。もちろん、岬全体を計算領域に組み込んでシミュレーションを行った場合に、地形増強率が実測のものと同じになる保証はない。

#### 4.4.6 理想門崎によるシミュレーション

region3 と region4 の解析と同じ条件を用いて、今度は実地形ではなく立体図形を組み合わせさせて淡路側の岬先端付近を再現し、数値実験を行った。なお、使用した立体図形（以後理想門崎と呼ぶ）は、PHOENICS に組み込まれているもので、岬先端は楕円錐を縦に割ったもの、

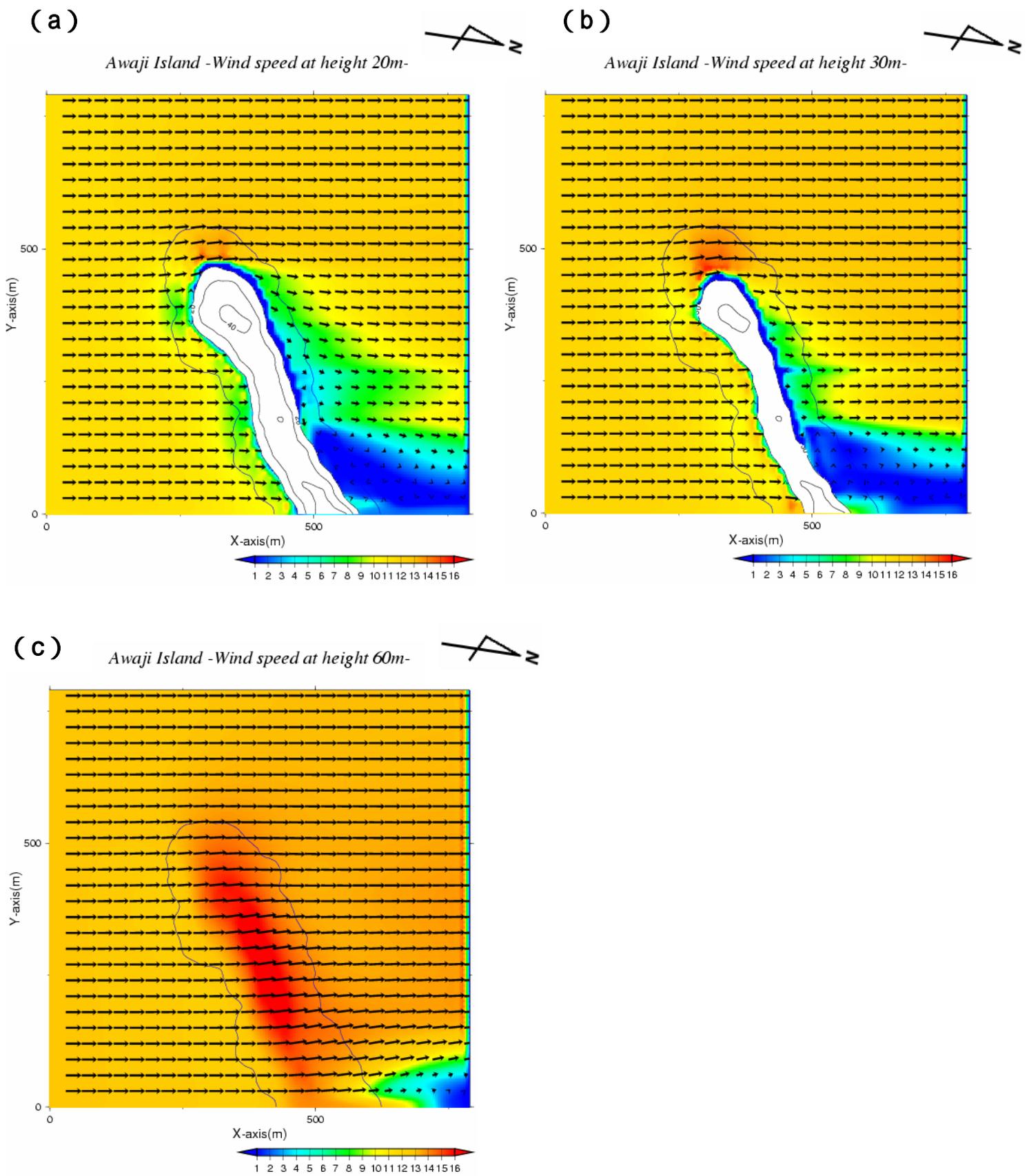


図 46 各高度における風速分布 (region3)

(a)20m , (b)30m , (c)60m の風速をシェードで示した。ベクトルは、水平風のベクトルである。

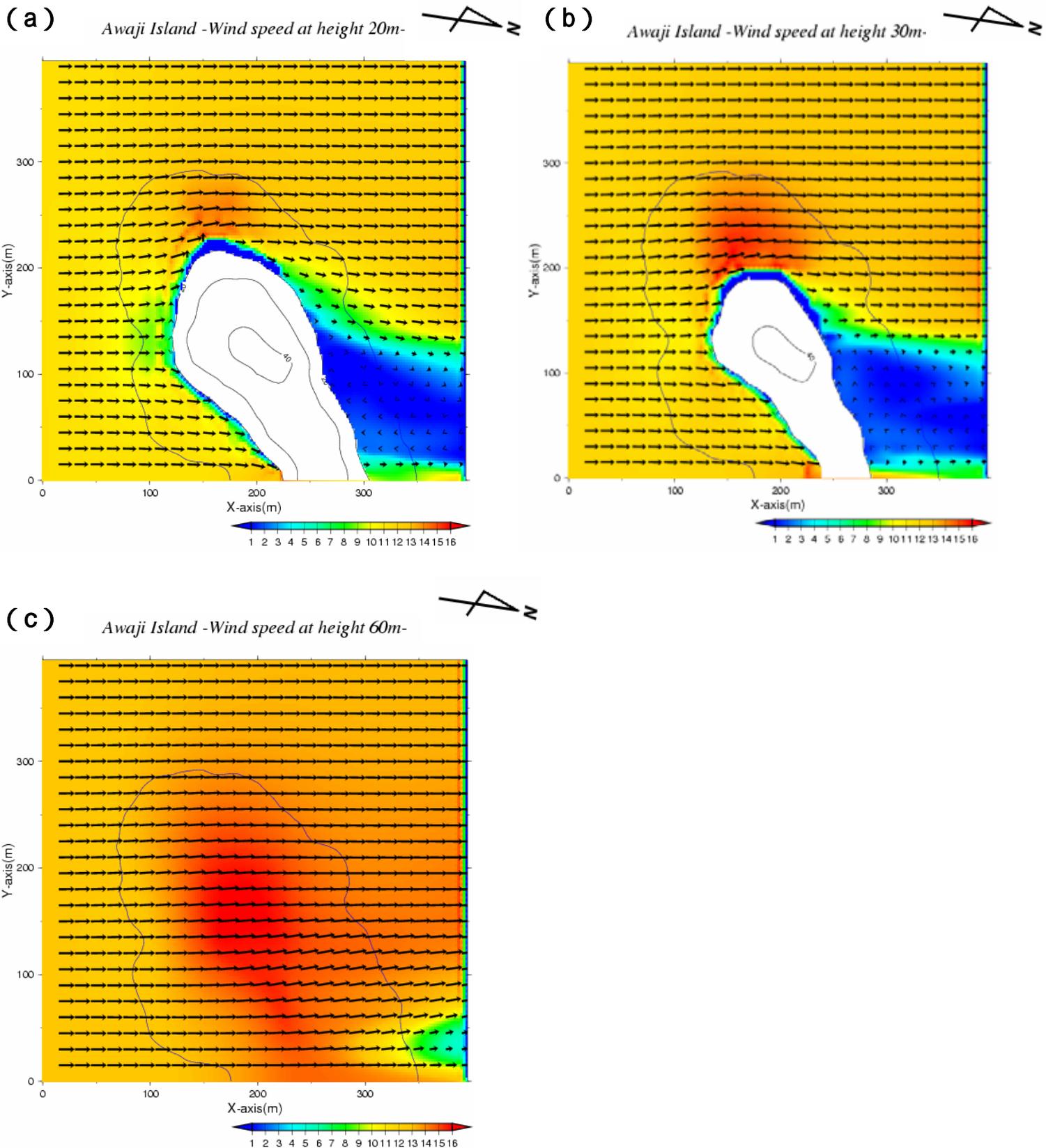
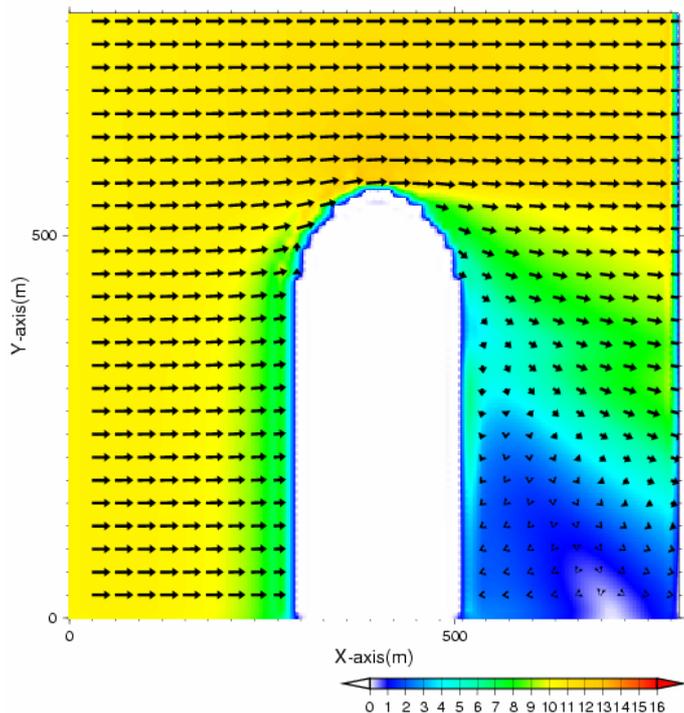


図 47 各高度における風速分布 (region4)

(a)20m , (b)30m , (c)60m の風速をシェードで示した。ベクトルは、水平風のベクトルである。

Ideal Awaji Island -Wind speed at height 10m-



Ideal Awaji Island -Wind speed at height 30m-

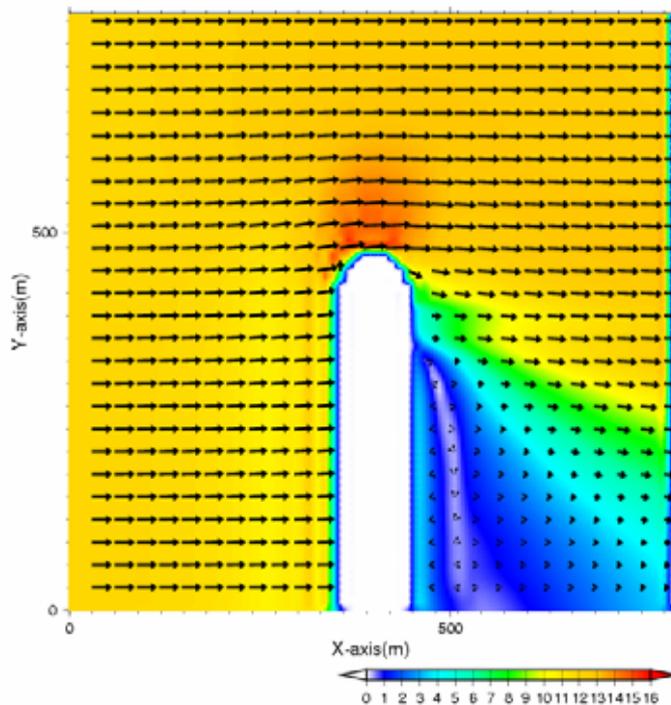
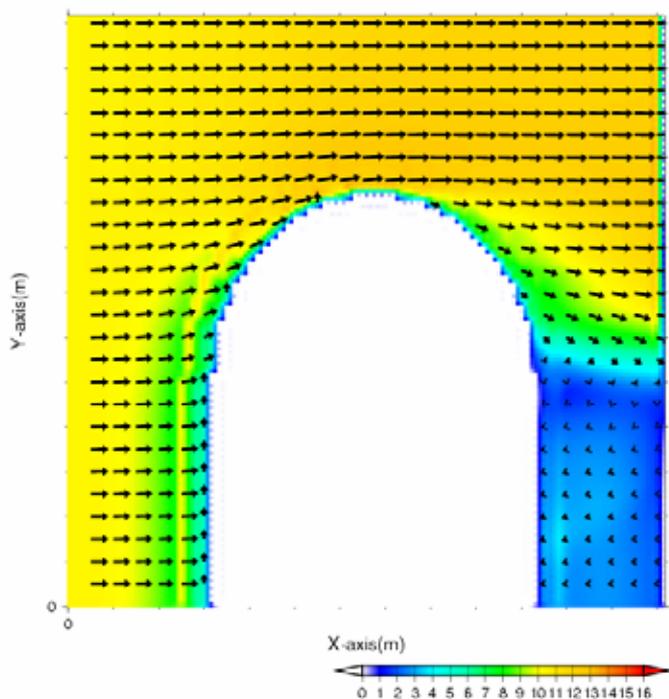


図 48 10m メッシュにおける理想門崎での風の間 (左図 : 高度 10m、右図 : 高度 30m) 風速をシェードで示し、ベクトルは水平風のベクトルである。

Ideal Awaji Island -Wind speed at height 10m-



Ideal Awaji Island -Wind speed at height 30m-

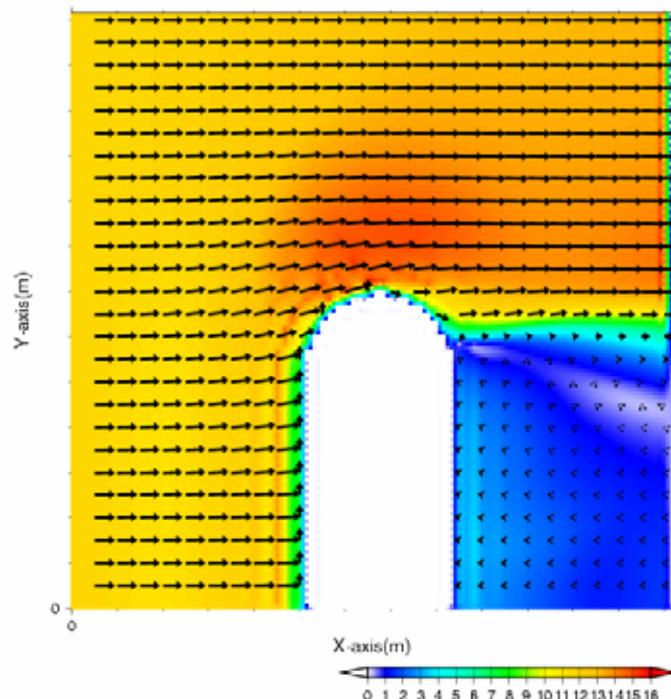


図 49 5m メッシュにおける理想門崎での風の間 (左図 : 高度 10m、右図 : 高度 30m) 風速をシェードで示し、ベクトルは水平風のベクトルである。

岬の稜線部分は三角柱状地形でこの 2 つを組み合わせて門崎を再現した。岬の幅は実地形と同じようにし、稜線の高さは 45m で一定となっている。その結果は、図 48 と図 49 に示す。図 48、図 49 の風の様子をみると、ともに岬先端部分で風速が最も強くなり、風のベクトルは岬を回るようになっているのが分かる。これらのパターンは、実地形と一致している。

次に、理想門崎における鳥居に相当する場所の風速と地形増強率を調べてみた。その結果、10m メッシュでは風速約 14m/s、地形増強率 1.35 で、5m メッシュでは風速 13.5m/s、地形増強率 1.29 であった。これらは、実地形における同じ格子間隔のもの比べると小さいことが分かる。これは、理想門崎が立体図形を組み合わせたものであるためと推測される。つまり、このことから鳴門での風の増強は、3 章の女木島のように単純な地形と風向だけで再現できず、周りの微地形の影響やその他の要因が複雑に影響しあっているものと考えられる。

#### 4.4.7 門崎での風の鉛直プロファイル

4.3 節でも述べたように、鳴門海峡では送電線完成後、完成した送電鉄塔に風速計や温度計を取り付けての観測が行われている。そこで、今回のシミュレーションでもその送電線に相

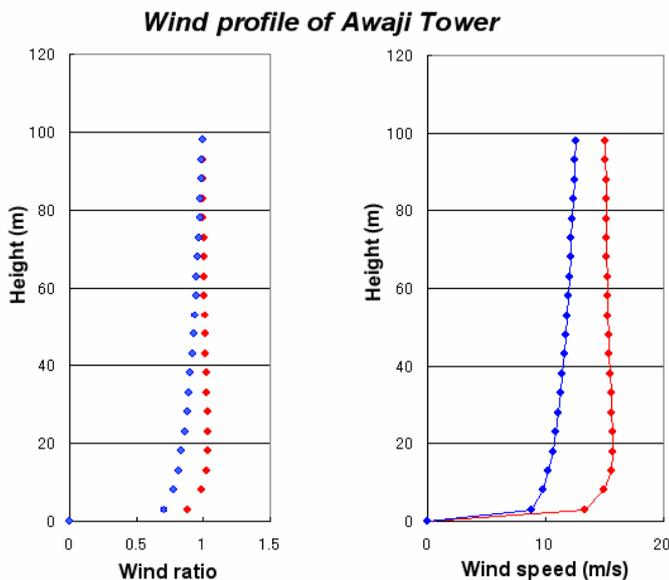


図 50 シミュレーションでの風の鉛直プロファイル  
右図は各高度の風速分布、左図は最高高度の風速と各高度の比を示す。青はべき分布によるプロファイル、赤が淡路側鉄塔に相当する位置のプロファイル。

当する場所での風の鉛直プロファイルを求め、現地観測の結果と比較してみることにする。

図 50 がシミュレーションでのもの、図 51 が現地観測によるもので台風 6414 号が接近した時に得られたものである。この 2 つを比べると、地上からの高度 20m あたりに風速の極大がくること、その後少し風速が減少してほぼ一定になることなど非常に特徴がよく似ており、シミュレーションでも鉛直方向の風のプロファイルをよく再現できているといえる。

図 50 には、べき分布による海上での風速のプロファイルも合わせて載せているが、この図を見る限りでも淡路側の先端付近では風速が通常の海面のプロファイルに比べて強く、その分布も通常から変形していることがよく分かる。なお、図 18 の風速プロファイルと大気安定度、風速の関係を示したもののうち最高高度の風速が 15m/s 以上で成層が安定な時のものと図 50 の左図を比べても大体の形は一致していることが分かる。

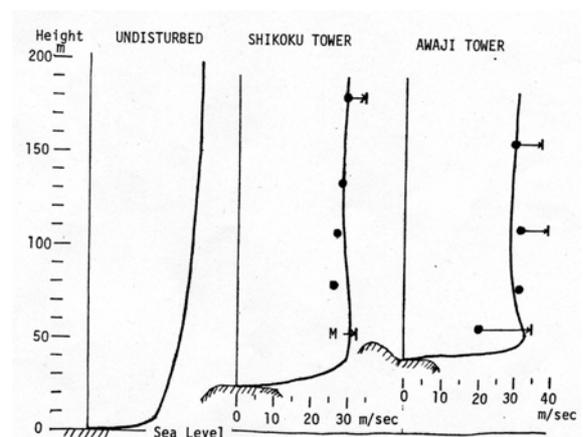


図 51 現地観測での風の鉛直プロファイル  
左端の図が淡路鉄塔のもの。  
(Mitsuta, 1971 より引用)

#### 4.5 鳴門海峡での考察とまとめ

鳴門海峡付近の実地形と理想門崎地形を使い、数値実験を行った結果を考察する。

これまでの研究から鳴門海峡の強風は地形による海峡部での風の収束や岬を迂回する気流の効果、気流が山越える際の地形上昇の効果等により生じると考えられている。そのため、数値実験での計算領域はそれらの地形効果を考慮して設定を行った。

まず、鳴門海峡中央部での風の増強を調べるため、海峡全域を解析領域とする region1 でシミュレーションを試みた。その結果、海峡付近で風速が強まっていることが明らかになった。風速が強まっていたのは、海峡部と海峡を挟む四国側・淡路側岬の先端及び岬の稜線上で、特に岬の先端や稜線では強くなっていた。また、どの高度においてもそれらの特徴がみられた。風のベクトルは岬の先端で曲げられて岬を回りこむように分布していた。これらは、これまでの研究ともよく対応している。なお、海峡域の断面図を作成した結果、岬先端付近では海峡中央部よりも大きな値の等相対風速線の下降等があることが分かった。そして、海峡部分では、風上側と比べて少なくとも鉛直方向 100m までは風速が増強されており、風速は海峡中央よりも陸に近づくほど大きくなるという特徴がみられた。この region1 におけるシミュレーションでは、鳴門海峡中央付近で風上側と比べて、実際に風速が増大することが確認できた。これは、風洞実験（光田・森，1974）では再現されていない。

次に、各岬の詳しい風況を調べるために、各岬を解析領域とする region2 でシミュレーションを行い、各観測点に相当する場所で風速が現地観測と同じように増強されるかについて試みた。その結果、各岬で region1 と同じようなパターンで風速の増強が起こっており、断面図などから気流が岬を迂回する動きをしていること、また稜線上の風速の増強は風上側で岬によって地形上昇を受け、山越える際に縮脈効果により風速が強められていることが分かった。この region2 の結果から、地形増強率を求め現地観測のものと比較を行った。その結果、シミュレーションの地形増強率は、現地観測のものに比べ増強率が小さく、実際の地形上に起こっている風速の増強を再現できていなかった。これは、シミュレーションを行う上での

様々な問題が考えられ、今後検討していかなければならない。ただ、各岬での風速は確実に地形効果により増強されているのは、確かである。また、実地形で標高の低い岬の先端付近が一番風速が増強されるという事実から、風上側で岬にぶつかった風が水平方向に向きを変え、岬を迂回するという現象をシミュレーション上で的確に再現できるかが、この鳴門での強風のメカニズムを明らかにする鍵であると考えられる。

region3 と 4 では、さらに岬先端の詳しい風況を調べるためにシミュレーションを行った。その結果、風が岬の先端で曲げられる様子がこれまで以上にはっきり再現され、メッシュを細かくするにつれて少しずつではあるが風速が実測に近づいた。なお、region3, 4 と同じ解析領域で立体図形を組み合わせて理想門崎をつくり、その風の場を調べた。その結果、実地形とよく似た風のパターンが得られた。しかし、地形増強率は実地形のほうが大きいことが分かった。

最後に門崎の鉄塔で観測された風の鉛直プロファイルについて、シミュレーションと実測を比較した。その結果、地上からの高度 20m あたりに風速の極大がくることやその後少し風速が減少してほぼ一定になることなど非常に特徴がよく似ていることが分かり、シミュレーションで鉛直方向の風のプロファイルをよく再現できていることが明らかになった。

#### 4.6 「鳴門の強風」解析の今後の課題

今回の解析では、風速の増強が起こる場所や風の流れについてなどは数値シミュレーションを使って再現することができた。しかし、地形増強率は実測に比べて小さかった。これを解決するには様々な工夫が必要である。格子間隔に関する問題や解析領域の問題、数値実験の計算処理に関することなどまだまだ解決しなければならないことがたくさんある。よって、今後更なる研究が必要である。また、今回行えなかった大気の安定度を考慮しての実験も今後行ってみたい。

## 5. まとめと考察

今回、女木島と鳴門海峡について、数値シミュレーションを行い、地形による風の変形について調べた。

女木島については立体図形を組み合わせて単純な理想女木島地形を作り上げ、現地観測や実地形を用いたシミュレーション結果と比較し、女木島での強風「オトシ」が島のどのような地形の効果により生じているのかを明らかにすることができた。鳴門海峡の解析では、実地形を用いてシミュレーションを行い、現地観測や風洞実験結果との比較によって地形によって風が増強されている様子を調べたが、実測ほど風が増強している様子を再現することはできなかった。これは、様々な原因が考えられる。ただ、今回の研究から女木島のような海に浮かぶ孤立峰等の地形によって生じる風の変形はシミュレーションしやすく良い結果が得られるが、鳴門海峡のように周囲の地形が複雑に作用しあうような場所ではかなりの工夫が必要とされ、良い結果を得るのはなかなか困難であるということが分かった。

しかし、今回の数値実験を通して言えるのは、とにかくこのような地形による風の変形を数値実験で調べる際には、その各々の地形をよく吟味し、境界条件や解析領域の与え方などを工夫することが最も大切だということである。そして、その実験結果と現地観測、風洞実験を比較して風がどのような影響を周囲に与えるか、またどのような地形によって変形が起きているのかを見定めなければならない。また、このような数値実験結果や比較する現地観測データの蓄積も今後これらの現象を明らかにするためには必要なことである。

地形による風の変形によって周囲の構造物などにどのような影響を与えるかを推測する際に、数値シミュレーションは有効な手段の一つである。よって、今後コンピューターや解析モデルのさらなる進歩や知識の蓄積によって、地形による風の変形が次々に明らかになっていくものと期待される。

## 謝辞

この研究を行うにあたり、ご指導下さった森征洋教授、数値実験にあたって適切なアドバイスや一部プログラムを提供して下さいました渡邊匡央さん（松江地方気象台）に感謝致します。

## 参考文献

- Yasushi MITSUTA, 1971 :  
CHARACTERISTICS OF AIRFLOW OVER THE BARRIERS IN THE STORM ,  
International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo,1-10
- 青山茂行, 1991 : 備讃瀬戸地域島嶼における集落立地と風,香川大学教育学部地理学教室
- 石原孟, 2002 : 複雑地形における局所風況の測定と数値予測, 日本風工学会誌第 91 号, 3-8
- 石原孟, 山口敦, 藤野陽三, 2003 : 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, 195-211
- 川鍋安次, 1964 : 300m 層以下の垂直 profile , 神戸海洋気象台彙報, 174, 93-118
- 斎藤通, 1996 : 地形による風の歪み, 日本風工学会誌第 67 号, 61-66
- 田村哲郎, 1996 : 風工学での地形風シミュレーションはどのように行うか, 日本風工学会誌第 67 号, 79-84
- 滑川忠夫, 1960 : 設計風圧選定の目的で施工した鳴門海峡における暴風観測報告( 終末報告 第 5 報 ), 関西電力工務部送電課
- 光田寧, 滑川忠夫, 1959 : 設計風圧選定の目的で施工した鳴門海峡における暴風観測報告( 中間報告 第 3 報 ), 関西電力工務部送電課
- 光田寧, 滑川忠夫, 1965 : 鳴門海峡横断送電線鉄塔における風速観測結果報告( 中間報告 第 3 報 ), 関西電力工務部送電課, 1-4
- 光田寧, 森征洋, 1974 : 鳴門海峡付近の風の実験的研究, 構造物の耐風性に関する第 3 回シンポジウム論文集, 45-51

吉田真純, 森征洋, 渡邊匡央, 2004: 女木島における局地的強風「オトシ」の数値シミュレーション, 日本気象学会関西支部 例会講演要旨集 第 104 号, 17-20

渡邊匡央, 2003: 女木島における局地的強風「オトシ」について 現地観測と数値シミュレーション, 香川大学大学院教育学研究科修士論文

渡邊匡央, 森征洋, 2004: 女木島における局地的強風「オトシ」について 現地観測, 香川大学教育学部研究報告, 第 部

石崎潑雄, 1977: 耐風工学, 朝倉書店, 33-46

塩谷正雄, 1992: 強風の性質 - 構造物の台風設計に関連して -, 開発社, 201

二宮洸三, 2000: 気象がわかる数と式, オーム社, 303

橋と風編集グループ, 1990: 橋と風, コスミック, 115-188