

人口減少の進む島のオフグリッドに向けた風環境観測・予測・分析

—瀬戸内海の男木島を対象とした風環境ポテンシャルマップの試作—

主査 大風 翼^{*1}

委員 川島 範久^{*2}, 藤田 慎之輔^{*3}, 能作 文徳^{*4}

本研究では、瀬戸内海の男木島を対象に、夏と冬の卓越風向に対し、簡易風速計を用い多点計測し、路地内の風速分布を面的に低コストで把握とともに、島全体を対象にした CFD 解析を行った。集落の路地の多くは、周辺の外壁や石垣の高さよりも道幅が狭い路地で構成され、路地空間が風上建物後方の弱風域に入り、弱風域が主流方向に連続することで、集落全体の風速が小さくなっていた。海岸線に直交する路地についても、蛇行することで、風の侵入を防いでいることがわかった。路地内の弱風域は、屋根の包絡線の高さまで形成されており、包絡線は概ね地表面と平行になっていた。更に、平均風速の超過確率の空間分布を求め、通年で、路地空間の強風による非適風範囲となる頻度が小さいことを明らかにした。

キーワード：1) 風環境, 2) 野外観測, 3) 数値流体解析, 4) スマートフォン風速計, 5) 超過確率
6) 発生頻度, 7) 路地, 8) 斜面地, 9) 漁村, 10) 離島

OBSERVATION, PEDICTION AND ANALYSIS OF PEDESTRIAN WIND ENVIRONMENT FOR OFF-GRID ISLAND WITH DECLINING POPULATION

- Potential Maps for Wind Environment in Ogi-Island, Seto Island Sea -

Ch. Tsubasa Okaze

Mem. Norihisa Kawashima, Shinnosuke Fujita, Fuminori Nousaku

This study aims to spatially investigate the pedestrian wind environment in the village located on Ogi island in the Seto Inland Sea, Japan. Then, Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations were performed to analyze the effects of village morphology such as stone retaining walls and alleys configurations, on pedestrian wind environment. The wind speeds in alleys was relaxed owing to its narrow width in winter season and the location of leeward of a mountain. Then, the spatial distributions of exceedance probability for wind speed to contribute to wind potential maps were estimated.

1. はじめに

男木島は高松港より北にフェリーで 40 分の距離に位置し、およそ 100 世帯 150 人が暮らしている¹⁾(表 1-1, 図 1-1)。集落は島の南西部の傾斜地に位置し(図 1-2)、海からの強風への対策として石垣が造成され、その上に建つ中庭形式の住宅や住宅背後の路地により、特徴的な景観が土着的に生み出されている(図 1-3)。安藤ら²⁾は香川県や高知県、愛媛県の離島の沿岸部に位置する集落を対象に、住宅及び集落構成と風環境との関係について調査しており、先の特徴が集落の穏やかな風環境を形成していると述べている。男木島も同様の特徴を持ち、これにより穏やかな風環境が形成されていると考えられる。近年、都市部への人口流出により空き家が増加しており、男木島について調査した安部³⁾は、2013 年時点で空き家が 12%、空き家が 40%、廃屋が 6%存在すると報告している。そのため、空き家の解体や倒壊により従来の集落

構成が維持できず、風環境の悪化が懸念されている。

一方、国内外問わず男木島の集落景観は魅力を与え 2014 年から 2017 年の 3 年間で 15 世帯、39 名が移住している。このような集落景観の魅力や快適な風環境を維持するため、現状の集落全体の風環境の面的把握と、土着的に形成された路地空間の風環境に対し環境工学的知見に基づいた評価が重要である。

近年、小型センサーやウェアラブルセンサーを用いて、自動車^{4,5)}や自転車⁶⁻⁸⁾あるいは歩行者⁹⁾により、歩行者空間の温熱環境を面的に把握しようという試みがなされている。近年、白澤ら¹⁰⁾は高層建築物周辺の住宅地を対象に、地域住民にスマートフォン接続式の簡易風速計を配布し、住民が強風の懸念がある箇所では風速を測定、WEB を通じてデータを集約し、風環境のマップ化を行っている。この研究では、調査対象の街の住民が自ら風速を測定し、風環境に対する理解を深めることや認識の共

^{*1} 東京工業大学 准教授 博士(工学), ^{*2} 東京工業大学 助教 博士(工学), ^{*3} 北九州市立大学 講師 博士(工学), ^{*4} 東京電機大学 准教授 博士(工学)

表 1-1 男木島の概要

所在地	香川県高松市男木町
面積	1.34km ²
最高標高	212.8m
人口	164人
世帯数	105世帯
平均年齢	61.3歳



図 1-1 男木島の周辺状況



図 1-2 男木島の概略図

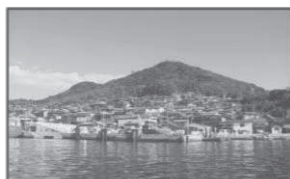


図 1-3 男木島の景観

有化を図ることを目的としている。そのため、測定を行う時間帯や風向に関しては考慮されず、住民が各々関心のある場所・時間に測定したデータが用いられた。

数値流体力学 (CFD: Computational Fluid Dynamics) による風環境予測も盛んに行われている¹¹⁾。CFD によるビル風予測のための知見¹²⁾は「市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブックガイドラインと検証用データベース」として日本建築学会で取りまとめられ、2007年に出版されている¹³⁾。土着建築の CFD による評価は、例えば、早川¹⁴⁾らや小川¹⁵⁾らによって合掌造りの民家を対象に実施されており、小川ら¹⁵⁾は山地の地形を再現し、広域スケールからのネスティング解析により、養蚕に活用された民家の2階分の通風性能を評価している。集落スケールの解析は、例えば、渡部ら¹⁶⁾が宮城県沿岸部の農地の風環境と防風林の影響範囲を CFD により分析している。また、Sato et al.¹⁷⁾は、宮城県の沿岸の漁村を対象に、いくつかの測定点を設け、風速や温湿度の分布を計測結果から、集落の形成要因について分析を行っている。しかし、集落全体の土着的形態と形成される風環境の関係を分析している検討はほとんどない。

そこで本研究では、まず、夏と冬の卓越風向に対し、簡易風速計を用い多点計測し、路地内の風速分布を面的に低コストで把握する。続いて、実測した卓越風向を対象に島全体を対象にした CFD 解析を実施し、実測結果との比較に基づく、精度検証を行うとともに、集落全体の風環境を把握するとともに、集落や路地の構成、路地・沿岸部・高台といった地形的要因と風環境との関係について分析を行った。最後に、16方位の CFD 解析を実施し、適風の発生頻度の面的分布を示し、通風ポテンシャルを評価するためのプロトタイプを作成したので、その結果を報告する。

2. 男木島の風況と路地空間

図 2-1 に拡張 AMeDAS 気象データシステム¹⁸⁾の高松の1時間平均風速より作成した風配図^{注1)}を示す。冬期の

卓越風向は西よりが多く、西側斜面に形成された集落では、海側から山側に向かって風が吹く。夏期の日中は東より、夕方から明け方にかけては西よりの風が吹く。集落を通る東西方向断面の概略図を図 2-2 に示す。冬期の西風は、海風が西側斜面の集落に直接吹き込むため、集落の風環境と密接に関係する。そのため、西面における石垣の造成や、海側には窓を設けず、中庭に開くといった個々の住宅で対策が練られている。また、風上に建つ家や石垣が、風下に建つ家を風から守るように集落が構成されている。さらに、これらが南北方向に連なり、等高線に沿って住宅の東側(風下側)に路地を形成している。

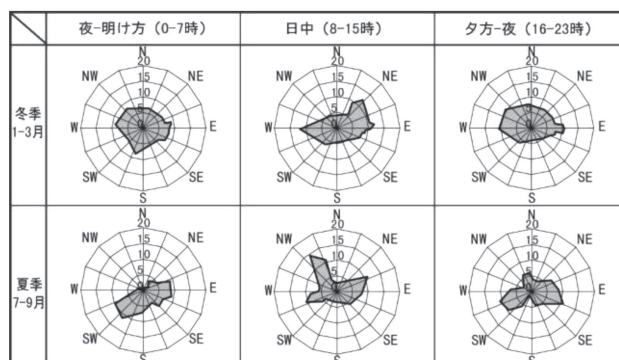


図 2-1 高松市(地点 672)の1時間平均風速の風配図

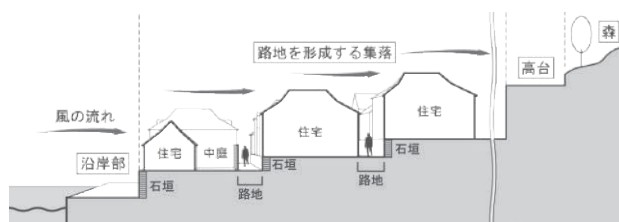


図 2-2 集落を通る東西方向断面の概略図

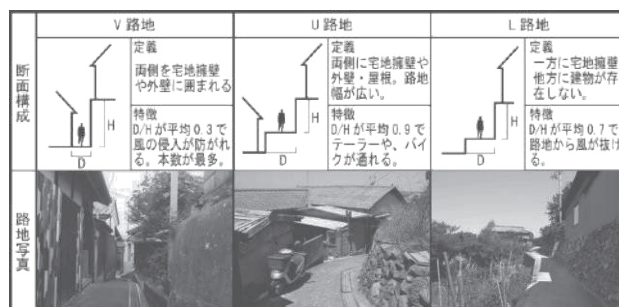


図 2-3 V路地、U路地、L路地の断面構成と特徴

藤井¹⁹⁾は男木島の路地と宅地擁壁について調査を行い、集落の主要な路地を、その形状から3種類(V路地、U路地、L路地)に分類し、これらの特徴を示している。V路地、U路地、L路地の断面構成と写真を図 2-3 に示す。藤井は、宅地擁壁と路地の関係を H (宅地擁壁の高さ)、 D (路地の幅) とし、 D/H が路地を特徴づける1つ

の指標と考え、各々の路地について以下のようにまとめている。V路地は、路地の両側を宅地擁壁や外壁に囲まれ、本数が最も多く主要な路地である。D/Hは平均0.3で宅地擁壁の高さに対し路地幅が狭いため、路地への風の流入が防がれている。U路地は、路地の両側を宅地擁壁や外壁・屋根に囲まれ、D/Hは平均0.9で宅地擁壁の高さと路地幅がほぼ等しい。L路地は、路地の一方に宅地擁壁が存在し、他方に建物が存在しない路地であるため、路地に対し風が抜ける。D/Hは平均0.7で宅地擁壁の高さに対し路地幅が狭い。

以上のように、住宅の平面計画や集落構成によって冬の西風への対策が行われ、それらによって構成される路地空間においても防風効果が期待できる。

3. スマートフォン簡易風速計を用いた野外観測

3.1 観測概要

観測は、夏期と冬期に実施した。冬期は2017年11月30日、12月1日の2日間及び2018年3月10日の2回、夏期は2018年7月29日に1回実施した。

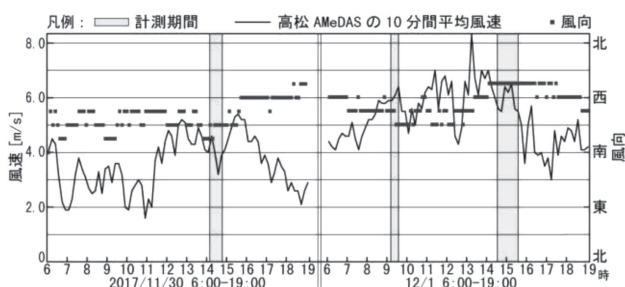
図3-1に測定機器及び測定風景を示す。測定機器として、いずれも簡易さを重視し、スマートフォンの拡張機能として使える機器を選定した。簡易風速計はVaavud社製のMjolinir^{注2)}及びSleipnir^{注3)}を使用した。これらはスマートフォンと接続し、専用のアプリケーションを用いて測定を行う簡易風速計であり、Mjolinirは風速のみ、Sleipnirは風速に加え、風向も測定できる。スマートフォン簡易風速計は、既存の風杯型風速計、プロペラ型風速計、超音波風速計などと比較し、コストが1/10-1/100程度と極めて低コストで、電源や特殊な機器も必要としない。スマートフォンを持ち歩くだけでよく、移動も容易にできるため、広範囲に平均風速の傾向を捉えるような簡易的な面的観測が可能である。これらの簡易風速計は、白澤らによる市民参加型の市街地の風環境調査²⁰⁾などでも活用されている。



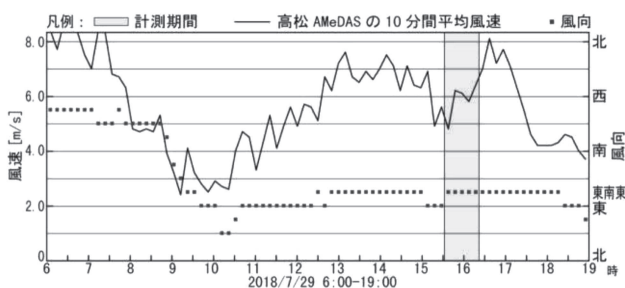
図3-1 測定機器及び測定風景

360°カメラはRICOH社製のTHETA Sを使用した。Wi-Fiを通じてスマートフォンと接続し、撮影後は任意の画角で出力が可能である。

夏期は風速計を5つ(Mjolinirを5つ)、冬期は風速計3つ(Mjolinirを2つ、Sleipnirを1つ)を用い、同時刻に5地点(夏期)ないし3地点(冬期)を計測し、各地点で1分間平均風速を取得した。その後、別の地点に移動し繰り返し計測を行った。測定は、路地(27点)のほか、道路幅員が4m以上かつ海に面している沿岸部(6点)、集落で標高の最も高い高台(3点)とした。測定及び撮影は道路中央で高さは地上およそ2m^{注4)}とした。



(1) 冬期



(2) 夏期

図3-2 計測期間の高松地方気象台の10分間平均風向・風速

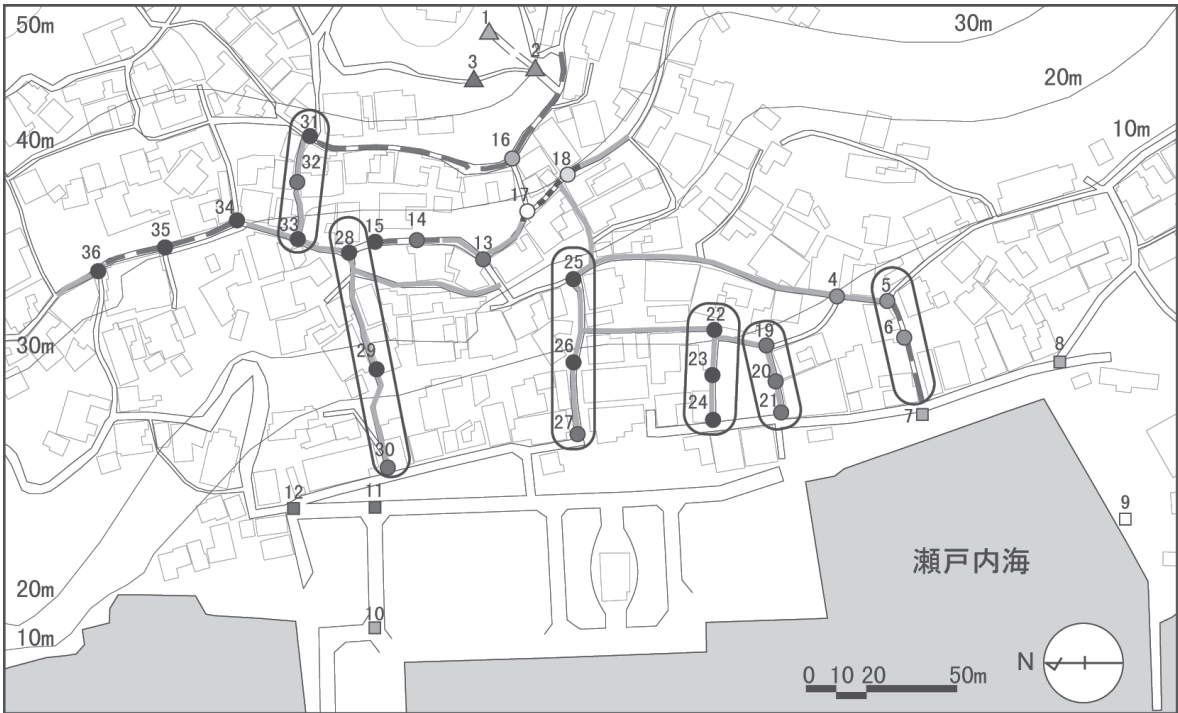
3.2 観測結果

冬期は観測を2回実施したが、以降、風向のより安定していた2017年11月30日、12月1日の結果を以降の分析に用いた。

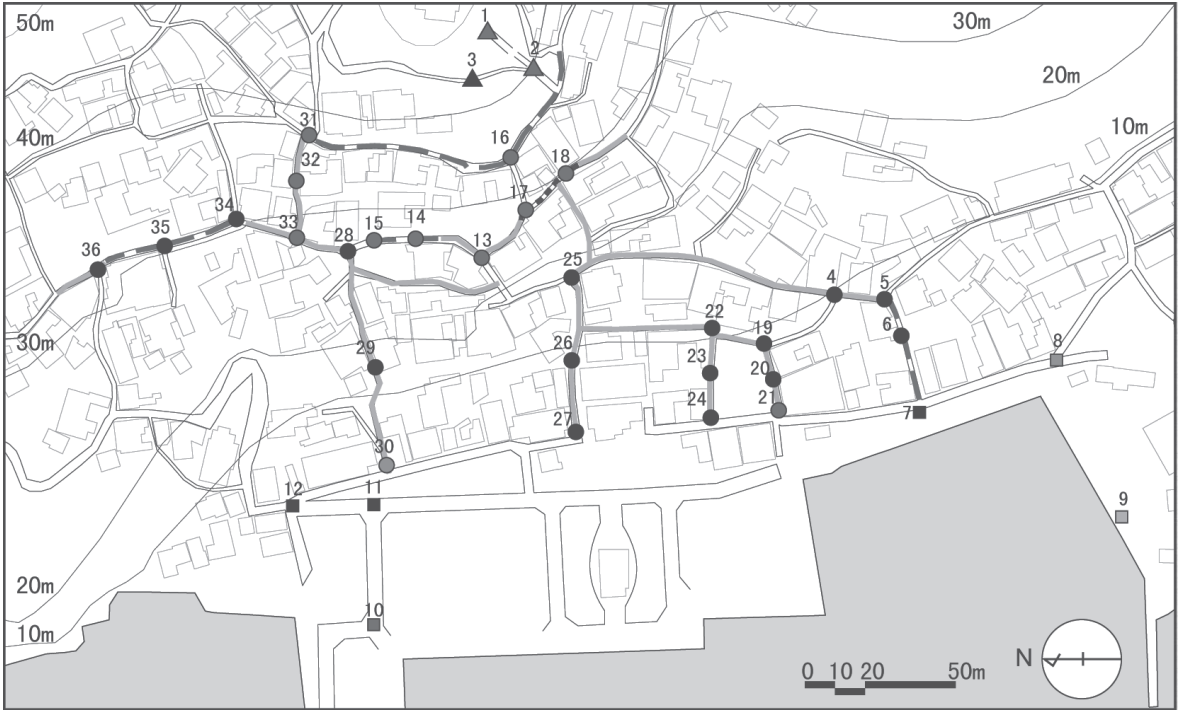
図3-2に調査を行った期間の高松地方気象台^{注5)}の10分間平均風速と風向を示す。冬期については、風向は概ね西よりで安定していた。また、この間の10分間平均風速は4.0-6.0m/sであった。夏期については、風向は東南東で安定し、5.0-6.5m/s程度であった。

図3-3に各地点の基準化風速及び、観測地点の分類、路地の形態を基準化風速マップに示す。各地点において1分間平均風速^{注6,7)}を取得し、測定時刻間の平均風速の変化の影響を排除するため、測定時刻の含まれる高松地方気象台の10分間平均風速で基準化した。

凡例	基準化風速 U/U_{ref} [-]	観測点の分類	路地形態	路地の調査主体
	0.4 0.6 0.8 1.0 1.2	● 路地 ■ 沿岸部 ▲ 高台	— V路地 - - - U路地 - · - L路地	囲いなし 藤井の研究から引用した路地 囲いあり 本調査により追加した路地



(1)冬期



(2)夏期

図 3-3 測定点及び測定結果

藤井¹⁹⁾が調査した等高線に沿う路地（南北方向）に加え、等高線に直交する方向（東西方向）の路地も追加調査を行い、V路地、U路地、L路地に分類した。追加調査を行った路地は、地点 31-32-33 を通る路地、その南側の地点 28-29-30 を通る路地、地点 25-26-27 を通る路地、地点 22-23-24 を通る路地、地点 19-20-21 を通る路地、地点 5-6 を通る路地の計 6 つの路地である。冬期は、沿岸部や高台に比べ、地点 17, 18 を除き、大部分の路地の風速は小さかった。一方、夏期は、路地、沿岸部、高台の区分を問わず、全体的に、冬期の路地と同程度の基準化風速となっていた。

図 3-4 に、地点分類ごとの基準化風速の分布を示す。冬期の路地の風速は、ばらつきはあるものの、路地全体の平均風速が 0.49、中央値は 0.41 と、沿岸部に比べ 5 割程度小さくなっていた。路地の風速の大きな路地の地点は、17, 18 であり、図 3-3 に示すとおり、比較的、高台に近い地点である。一方、夏期は前述したとおり、路地、沿岸部、高台の区別なく、基準化風速が小さく、0.4 程度であった。

図 3-5 に冬期の路地毎の基準過風速を示す。路地の多くが、V路地に区分されており、その風速は他の路地に比べると小さな値となっている。V路地は、海岸線に平行な南北方向の路地と直交する東西方向の路地の 2 つがあるが、いずれの路地でも風速が小さかった。U路地の 2 地点は、高台の近くに位置しているものの、周辺の地点は風速が小さいので、建物や路地形状に起因して局所的に特異な流れ場が形成されている可能性がある。L路地は、沿岸部ほどではないが、平均風速は V路地の値より大きく、周囲のいずれかが開けている影響で、風が吹き込みやすくなったためと考えられる。

日本建築学会建築物荷重指針・同解説²²⁾によると、海面などのほとんど気流障害物のない地域は、地表面粗度区分 I の平均風速 $U(z)$ 分布にしたがい、その鉛直分布は、高さ z の関数として(1)式で表現される。

$$U(z) = U_R \left(\frac{z}{z_R} \right)^{0.1} \quad (1)$$

ここで、 z_R 及び U_R は、任意の参照点高さ及び参照点高さの平均風速である。ここで、高松地方気象台は、沿岸部に位置するので、地方気象台の風速と男木島近傍の海面上の風速が等しいと仮定すると、地方気象台の風速の測定点高さは 17.5m であるので、(1)式で得られる基準化風速（地上 17.5m の風速に対する 2.0m の風速の比）は、およそ 0.81 となる。冬期の沿岸部の測定点では、風上に遮るものがないため、これと同程度の値となると推察され、測定した基準化風速の平均値が 0.79 と、概ね粗度区分 I を仮定した風速分布から得られる基準化風速(0.81)と一致している。これに対し、冬期の路地の風速は、沿岸部の 1/2 程度と小さくなっており、風上に建つ家や石垣が

風下に建つ家を風から守るような集落の形態が、その内部の風環境を大きく緩和していると考えられる。

夏期は、沿岸部の地点 8, 9 で風速が大きいものの多くの地点は、前述のように基準化風速 0.4 程度の小さな値となっており、集落の形態よりは、広域の地形的要因が大きいと考えられる。集落は、東寄りの風に対しては島中央の山の風下に位置し、集落全体が山の弱風域に入っていた可能性がある。

次章以降では、これらの風環境形成要因の分析と風環境の空間的な把握のため、地形及び建物を再現した CFD 解析を実施し、実測結果との比較に基づき、CFD の予測精度の検証を行うとともに、特徴的な実測地点の風環境形成要因を分析する。

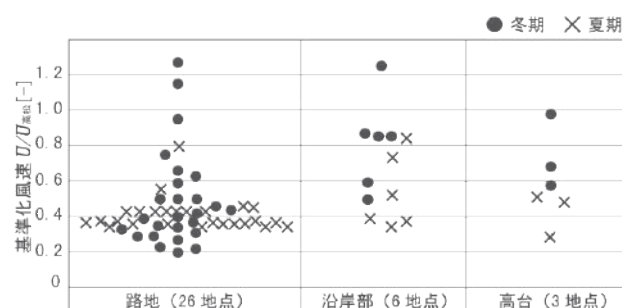


図 3-4 地点分類（路地、沿岸部、高台）における基準化風速

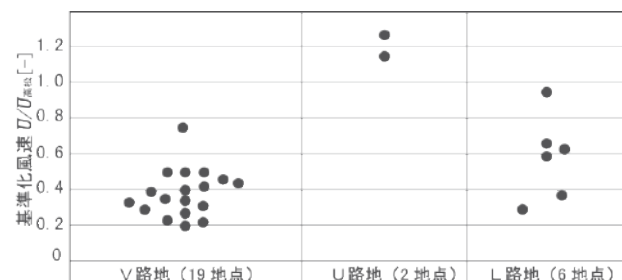
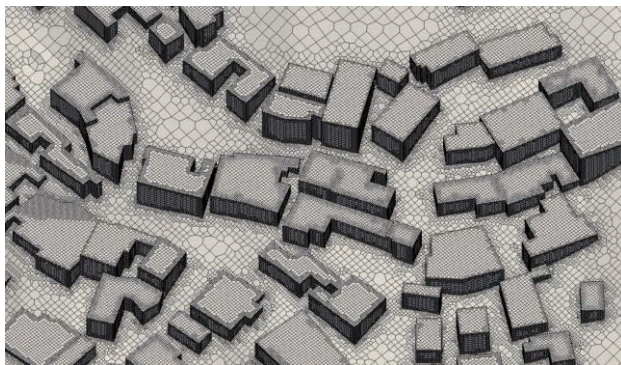


図 3-5 冬期の路地毎の基準化風速

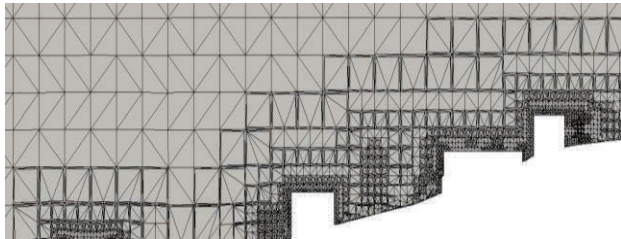
4. 夏期及び冬期の卓越風向を対象とした CFD 解析

4.1 解析条件

地形は、立体地図(地理院地図 3D・触地図)²³⁾を用いて再現した。建物は、基盤地図情報 建築物の外周線 (2018 年)²⁴⁾より住宅の輪郭を取得し、その形状を再現した。屋根形状については、計算負荷削減のため、その形状や軒は再現しなかった。集落近傍の地表面第一セルの高さは 0.5m、地表面付近の水平方向の空間解像度はおよそ 4m とした。建物近傍の計算格子は、更に細分化を施し、25cm 程度とした。建物周辺の格子分割は、図 4-1 を参照されたい。解析条件は、まとめて表 4-1 に示す。解析条件は、文献 13 を参考に与えた。流入風は、地表面粗度区分 I と仮定し鉛直分布を与え、風向は前節の実測時の風向(冬期：西、夏期：東南東)とした。乱流モデルは、改良型 k-ε モデルの一つである RNG k-ε モデルを用いた。



(1) 建物表面の計算格子



(2) 集落内の計算格子（鉛直断面図）

図 4-1 建物近傍の計算格子

表 4-1 解析条件

解析ソフト	OpenFOAM ver.4.1 ²⁵⁾
乱流モデル	RNG k-ε モデル ²⁶⁾
解析領域	島を中心に 4760m×5500m×1000m
流入境界	地表面粗度区分 I にしたがう平均風速分布を与えた。 乱流エネルギー及び粘性消散率は、文献 13 に倣って与えた。 風向は、冬期は西、夏期は東南東とした。
流出面	法線方向の勾配をゼロ
解析領域 上面・側面	Slip 壁
地表面・壁面	滑面用の対数則
離散スキーム	移流項：1 次精度風上差分 拡散項：中心差分
圧力速度連成	SIMPLE 法

4.2 解析結果

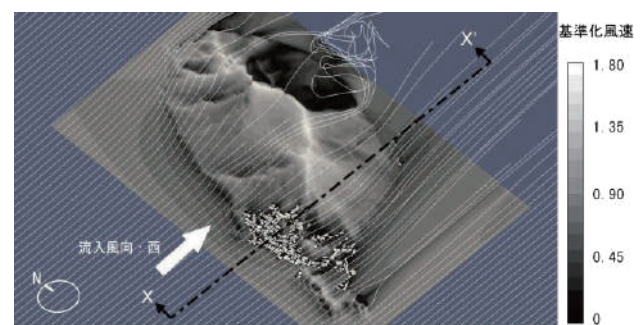
解析結果は、流入面の地上 17.5m（高松地方気象台の風速の観測点高さ）の風速で基準化した。流入面の地上 17.5m の平均風速と高松地方気象台の風速が等しいと仮定し、実測の基準化風速との比較を行う。

図 4-2 に島全体の地上 2m における解析結果を示す。流線は流入面の地上 2m で発生させたものである。冬期の西風時は、海側から島の西側斜面に直接風が吹き込む様子がわかる。全体的に島の西側斜面で風速が大きく、東側斜面で風速が小さいが、集落風下の南東斜面では、集落や山を回り込む風により、西側斜面と同程度の風速となっている。夏期は、南西部に位置する集落の大部分の風速は小さくなっている。図 4-2 に集落を通る鉛直断面図の風速分布を示す。冬期は集落の上方の風速は大きいですが、路地空間内の風速は全体的に小さくなっている様子がわかる。夏期は、地形の影響で集落の風上側ではく

離し、集落の上方まで弱風域を形成している様子がわかる。

図 4-3 に、地上 2m における実測および解析結果をしめす。冬期は、路地の風速が小さく、地点分類（路地、沿岸部、高台）毎の風速分布の特徴をよく再現できている。比較的高台に位置する路地の実測値が大きかったが、その周辺で解析結果の風速も大きくなっている。夏期は、全体的に解析結果が小さいものの集落全体の風速が小さくなる傾向を良く再現できている。

図 4-4 実測結果と解析結果の比較を示す。冬期は、全体的に実測結果をよく再現できている。夏期は、多くの点で過小評価しているが、基準化風速が 0.4 付近において実測が同じ値を示している結果が多くあり、風速計の分解能や測定値下限付近であることなどが考えられる。高台 2 地点の風速のみ、わずかに過大評価となっているが、図 4-3 に示すとおり、いずれも標高の高い地点で、高台の風上にある山の植生による影響を考慮していないためと考えられる。

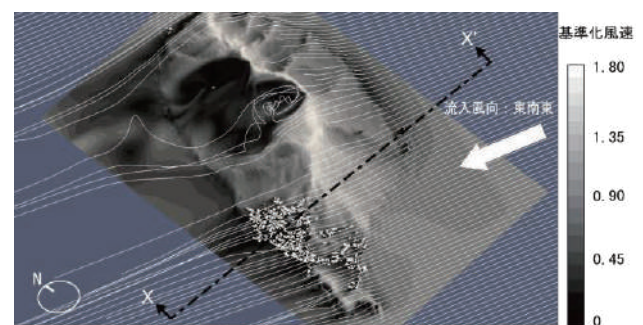


(A) 男木島の地上2mにおける風速分布の俯瞰図



(B) 実測を行った集落を通る断面図 (X-X' 断面)

(1) 冬期



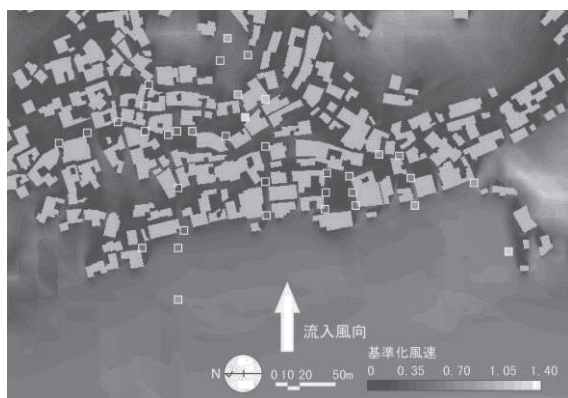
(A) 男木島の地上2mにおける風速分布の俯瞰図



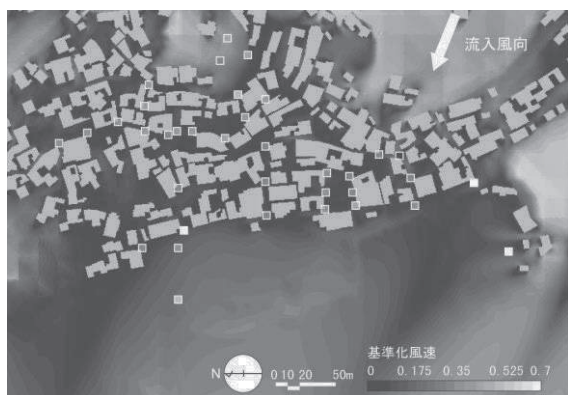
(B) 実測を行った集落を通る断面図 (X-X' 断面)

(2) 夏期

図 4-2 島全体の CFD 解析結果

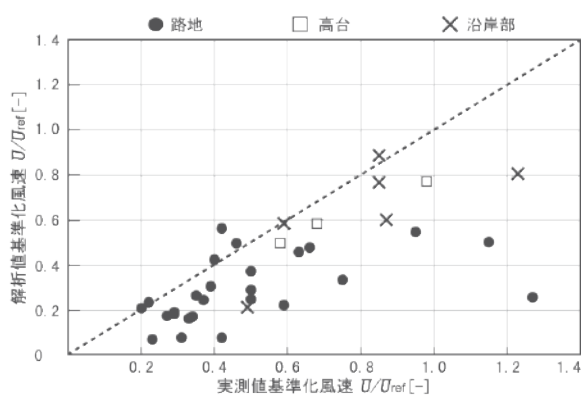


(1) 冬期

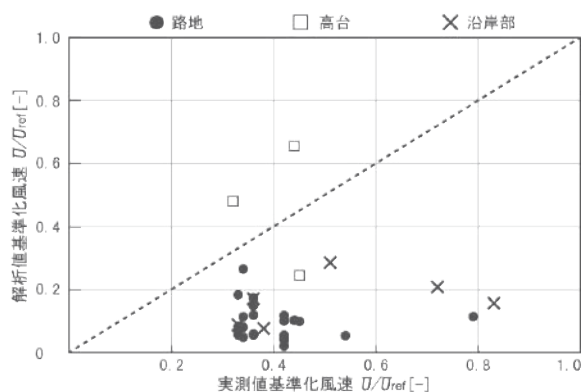


(2) 夏期

図 4-3 地上 2m における無次元風速の実測および解析結果
(コンタは解析結果、口の中は実測結果を示す。)



(1) 冬期



(2) 夏期

図 4-4 地点分類（路地、沿岸部、高台）における基準化風速

以上より、冬期の西風に対しては集落構成により、夏期の東風に対しては島の風下側に集落を形成されていることにより、路地空間が弱風となっていることがわかる。次節では、集落構成によって路地空間の風速を緩和していると考えられる西風を対象に、風速が小さかった路地や局所的に風速が大きかった地点を抽出し、その形成要因の分析を行う。

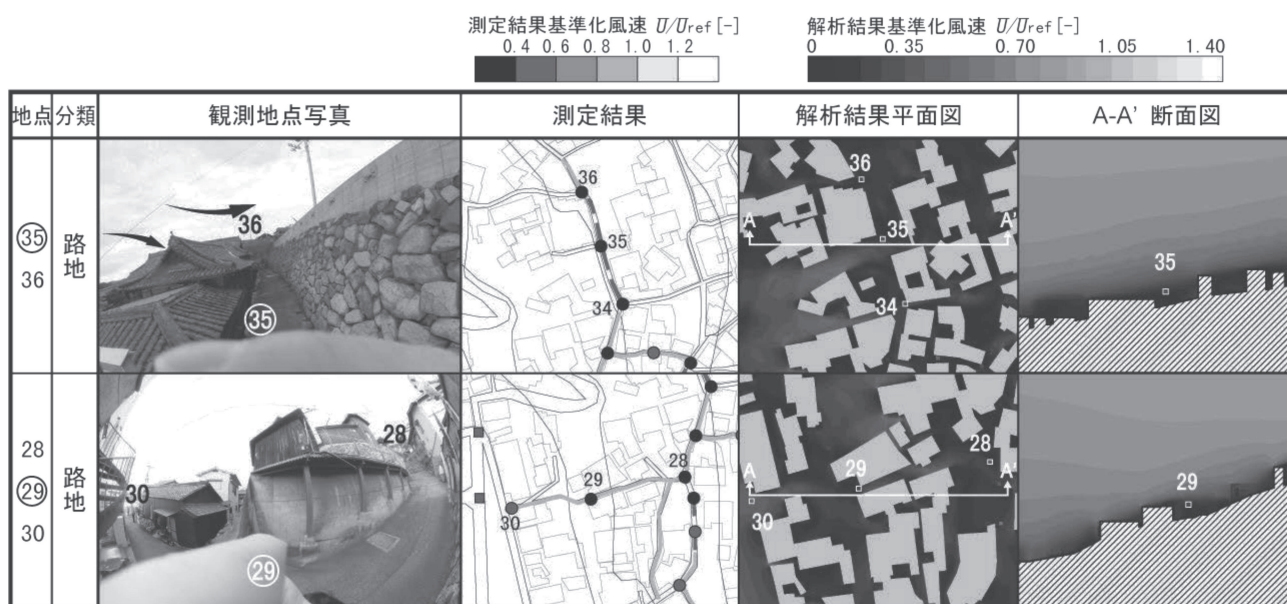
5. 路地の風環境形成要因の分析

図 5-1 に、冬期に弱風域及び強風域を形成した地点をいくつか抽出し、写真と実測結果、解析結果を示す。弱風域の代表的な地点として、海岸に平行な路地の地点 35、海岸に直交する路地の地点 29 とそれらの周辺を抽出した。また、強風域の代表的な地点として、沿岸部の地点 8 とその周辺、高台の地点 2 とその周辺、高台近くの路地の地点 17 とその周辺を抽出した。地点番号は、図 3-3 を参照されたい。写真は、図 5-1 の地点番号で丸をつけた地点で、360°カメラを用い撮影したものである。

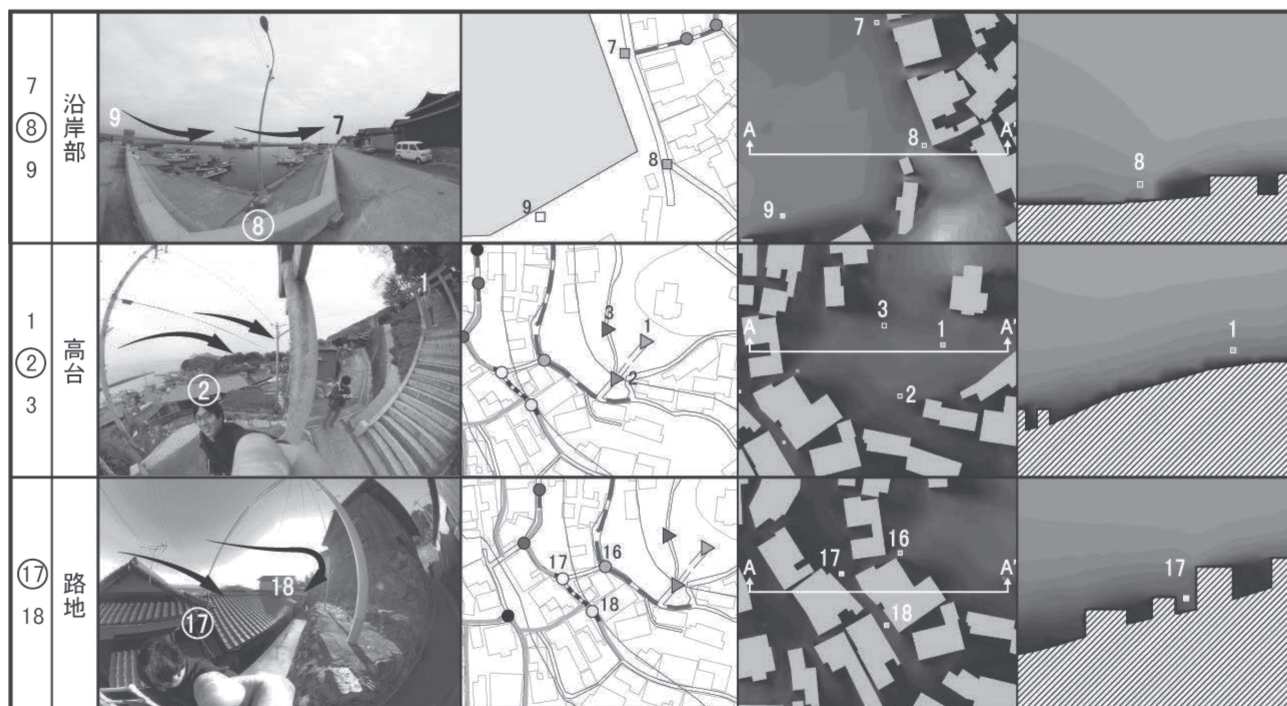
地点 35、36 は海岸線に平行な路地に位置し、弱風域となっていた地点である。地点 36 は、V 路地であり、西側の建物と東側の石垣に囲まれた狭い空間であることがわかる。図 3-3 に示すとおり、地点 36 から南に地点 13 まで基準化風速が 0.4 程度と弱風域が形成されていた。基準化風速が 0.4 程度の弱風域は、鉛直断面図を見ると、集落の屋根を結ぶ包絡線の下に形成されている。屋根の包絡線は概ね地上の傾斜と並行で、形成される弱風域も概ね地面の傾斜に沿っており、路地の風上の建物の後方に形成された弱風域が連続している様子がわかる。

地点 28、29、30 は海岸線に直交する V 路地である。僅かではあるが、実測では、海に近い地点 30 に比べ地点 28、29 の風速は小さくなっており、解析でもその傾向が再現できている。沿岸部付近に位置しており、海風の路地内への流入が懸念されるが、路地幅が狭く、緩やかに蛇行していることで、風上の建物が風を遮り、弱風域を形成していたと考えられる。鉛直断面を見ると、前述の海岸線に平行な路地の断面に比べ、断面上に見える建物は少ないが、屋根を結ぶ包絡線より下の空間に弱風域が形成される傾向は等しく、傾斜はより急であるが、包絡線と地表面が概ね平行な点も海岸線に平行な路地の場合と同様である。

続いて、強風だった地点について、分析をすすめる。地点 7、8、9 は沿岸部で風上に障害物がなく、基準化風速で 0.8 程度の値が、風上に向かって連続している。地点 8 近傍の断面図を見ても、路地に至るまでの地上付近の風速が大きくなっていることがわかる。地点 7 や 8 の風下側は、沿岸部に隣接する建物の直後より、弱風域が形成され始めており、沿岸部の建物が集落全体の風環境形成に大きく寄与していると考えられる。



(1) 弱風域



(2) 強風域

図 5-1 冬期に弱風域、強風域を形成した地点の 360 度写真と模式図

地点 1, 2, 3 は高台で、地点 1 は集落で最も標高の高い場所に位置し、直接海を臨む事ができる地点であるため、海風を直接受け強風域が形成されたと考えられる。地上 2m の解析結果を見ると、地点 1, 2, 3 の周辺で、風上の路地内の風速よりも大きくなっており、鉛直断面図より、風上の建物後方の弱風域の影響範囲外となっていることもわかる。

地点 17, 18 は路地内であるが、実測で沿岸部と同程度に風速が局所的に大きかった地点である。路地は、比較

的道幅が広い U 路地である。鉛直断面の解析結果を見ると、地点 17 を含む路地のみ風速が大きくなっており、1 つ風上や風下の路地は風速が小さい。地点 17 の地上付近の風速は風上建物の屋根面上方の風速と同程度であり、また、地点 17 後方の建物が、周辺の建物の屋根を結ぶ包絡線よりも高いことから、地点 17 前方建物ではなく離れた流れが、地点 17 後方の建物の前方壁面に衝突し、地表面に吹き下ろしてきたため、地点 17 で高風速になったと考えられる。地点 18 も高風速となっているが、地

点 17 で吹き下ろした風が地点 18 へ流れたためだと考えられ、地上 2m の解析結果を見ると、地点 17 から 18 にかけて局所的に風速が大きい領域が形成されている。集落内部の風環境維持には、集落の屋根の包絡線が斜面の傾斜と概ね平行になるようにすることも重要であると考えられる。

6. 風環境ポテンシャルマップの試作

6.1. 平均風速の超過確率の推定

第 4 章において、冬期の卓越風向の西風、夏期の卓越風向の東南東の風に対し、実測結果との比較から、CFD により、本研究で用いる各種解析条件で、概ね風速分布を再現できることを確認した。CFD 解析を他の風向にも適用することで、16 風向の風向別の高松地方気象台高さと島内の任意の地点の風速比を求めることができる。これに、高松地方気象台の AMeDAS の 10 分間平均風速の観測結果を組み合わせることで、島内の任意の 10 分間平均風速の超過確率の空間分布を推定することが可能となる。平均風速の超過確率の空間分布は、路地空間の適風範囲の計画、通風利用、風力エネルギー利用等様々な活用が想定され、任意の地点の風環境ポテンシャルを表現するものである。以下に、平均風速の超過確率の推定方法を示す。推定方法は、ビル風の評価方法²⁷⁻²⁹⁾を援用したものである。高松地方気象台の AMeDAS の風速の観測点高さ(地上高さ 17.5m)で、10 分平均風速(u_0)を超過する確率 $p_m(\langle u \rangle > \langle u_0 \rangle)$ は、ワイブル分布を仮定すると(2)式に示すとおりである。

$$p_m(\langle u \rangle > \langle u_0 \rangle) = \exp\left[-\frac{\langle u_0 \rangle}{C_m}\right]^{K_m} \quad (m=1 \sim 16) \quad (2)$$

K_m , C_m はワイブルパラメータである。一方、CFD 解析により任意の地点の風速が求められることから、風向別に CFD 解析の流入境界面の高さ 17.5m の平均風速(u_{in})と任意の地点の平均風速(u_i)の比 $R (= \langle u_i \rangle / \langle u_{in} \rangle)$ を得ることができる。ここで、AMeDAS の地上高さ 17.5m の平均風速(u)と CFD 解析の流入境界面の高さ 17.5m の平均風速(u_{in})が等しい($\langle u \rangle = \langle u_{in} \rangle$)と仮定すると、風速比 R を用いて、任意の地点の平均風速が(u_i)のときの AMeDAS 地点の平均風速を推定できる。ある地点において平均風速(u_i)のとき、AMeDAS 地点では(u_i)/ R の風速が観測されることになる。したがって、風向別の任意の地点の平均風速が(u_i)を超過する確率は、(3)式で表現できる。

$$p_m\left(\langle u \rangle > \frac{\langle u_i \rangle}{R_m}\right) = \exp\left[-\frac{\langle u_i \rangle}{R_m C_m}\right]^{K_m} \quad (m=1 \sim 16) \quad (3)$$

(3)式において、AMeDAS から得られた風向の発生頻度 A_m で重み付けし、16 風向分足し合わせることで任意の

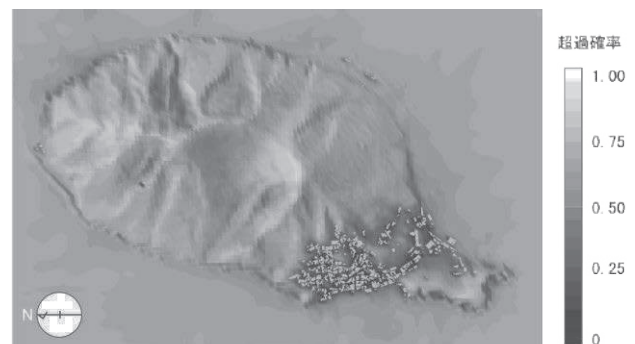
地点の平均風速の超過確率((4)式)を求めることができる。

$$P\left(\langle u \rangle > \frac{\langle u_t \rangle}{R}\right) = \sum_m^{16} A_m \cdot \exp\left[-\frac{\langle u_t \rangle}{R_m C_m}\right]^{K_m} \quad (4)$$

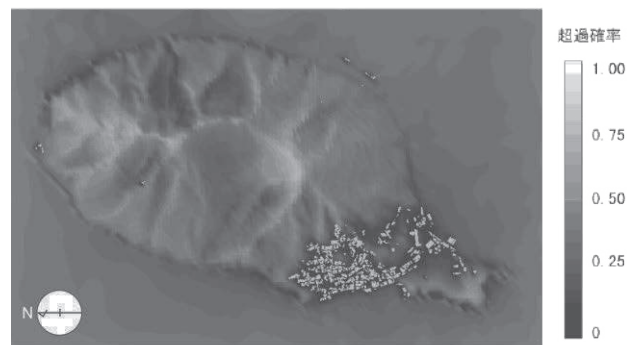
(4)式において、閾値の平均風速(u_t)を設定することで、任意の平均風速の超過確率を求めることができる。

6.2 平均風速の超過確率と発生頻度

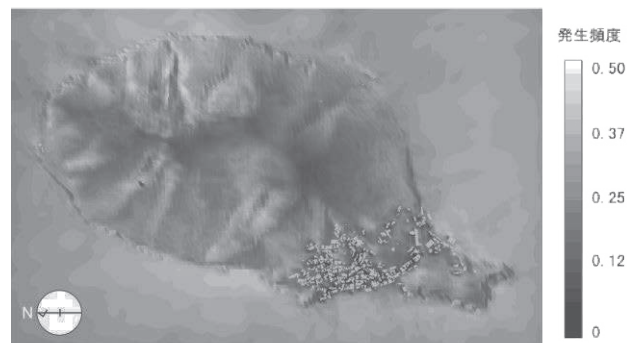
村上ら³⁰⁾によると、気温を考慮しない場合の弱風による非適風範囲、適風範囲、強風による非適風範囲は各々、地上 1.5m の日平均風速が 0.6m/s 以下、0.6 から 1.5m/s、2.5m/s 以上であり、適風域と強風による非適風域の 1.5 から 2.5m/s は中間域としている。この適風範囲が 10 分間平均風速にも適用できると仮定し、0.6m/s の超過確率から 1.5m/s の超過確率を引くことで、適風範囲の発生頻度を推定することができる。



(1) 高さ 2m における風速 0.6m/s の超過確率

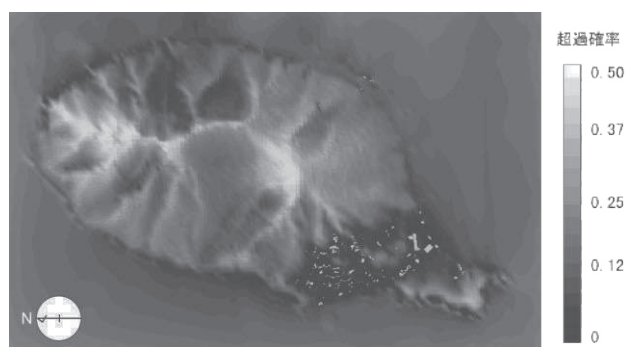


(2) 高さ 2m における風速 1.5m/s の超過確率

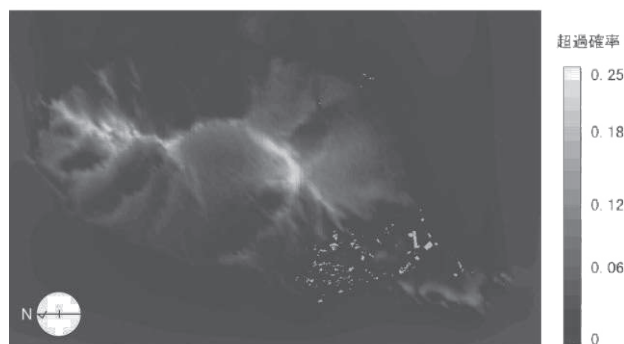


(3) 高さ 2m における適風範囲の発生頻度

図 6-1 地上 2m における平均風速 0.6m/s 及び 1.5m/s の超過確率と適風範囲の発生頻度



(1) 高さ 6m における風速 2.5m/s の超過確率



(2) 高さ 6m における風速 5.0m/s の超過確率

図 6-2 地上 6m の平均風速の超過確率

図 6-1 に、地上 2m における平均風速 0.6m/s 及び 1.5m/s の超過確率と適風範囲の発生頻度を示す。図 6-1 (1) を見ると、集落内の路地空間では、50%以下、その他で約 75%以上となっている。1.5m/s の超過確率を見ると、集落内では 25%以下、その他の島内では 50%以下、山の稜線部分のみ 80%以上となっている。適風範囲の発生頻度を算出すると、集落内は 20~25%程度であった。島の沿岸部は、30%程度であり、集落内よりも適風の頻度が大きい。これは、現状、弱風による非適風範囲を設定しているためであり、集落内は弱風による非適風範囲に入る頻度が大きい。村上らによる、気温を考慮した場合、日平均気温が 20 度以下では、弱風による非適風範囲は無い。気温を考慮することで、集落内の適風の発生頻度は大きくなり、中間期や冬期をより適切に評価した適風発生頻度となると考えられる。また、弱風による非適風範囲は、夜間も含んでいるため、夜間の弱風時に形成される斜面冷気流の活用なども考えられる。山の稜線部分の適風の発生頻度が小さくなっているのは、図 6-1 (2) で示したとおり、強風の発生頻度が大きいためである。

図 6-2 に、屋根上方の風力エネルギー利用を想定した地上 6m の平均風速の超過確率を示す。平均風速 2.5m/s はマイクロ風力発電機の起動風速程度の風速値である。山の稜線部分で 50%を超えており、山の斜面及び島の南端で 30%程度となっている。集落内は、全体的に小さな値で、10%程度以下となっているが、高台の部分のみ 30%程度の値となっている。これは、図 4-3 でも示したよう

に、夏期の東風時でも、高台部分は比較的風速が大きい。のに対し、沿岸部は山の風下側の弱風域に入るためであると考えられる。瀬戸内海は全体的に風が穏やかで 5m/s の超過確率は全体的に小さいが、集落近傍では、集落東側で山の南側の斜面や島の南端で、10~15%程度の値となっている。山の東側や西側の斜面は、冬期の西寄りの風、夏期の東寄りの風のいずれの風向時には、山の後方の弱風域に入るのに対し、山の南側の斜面は、冬期の西寄りの風、夏期の東寄りの風のいずれの風向に対しても、山の側方に位置し、山を回り込む風が加速されるため、超過確率も他の斜面より大きくなったと考えられる。

8. まとめと今後の展望

本研究では、夏と冬の卓越風向に対し、簡易風速計を用い多点計測し、路地内の風速分布を面的に低コストで把握とともに、島全体を対象にした CFD 解析を行い、風環境ポテンシャルマップとして、平均風速の超過確率の空間分布を求めた。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 集落の路地の多くは、周辺の外壁や石垣の高さよりも道幅が狭い、いわゆる V 路地で構成され、集落に風が直接吹き込む風向時にも、沿岸部の風速の半分程度の値まで、緩和されていた。路地空間は、風上建物後方の弱風域に入っており、弱風域が連続することで、集落全体の風速が小さくなっていた。斜面を登る海岸線に直交する路地についても、緩やかに蛇行することで、風の侵入を防いでいることがわかった。平地の大気境界層内の都市において、建物が密集すると、建物の屋根面を滑るように流れ、歩行者空間は弱風になる Skimming flow^{31, 32)}という flow regime が現れるが、同様の流れ場となっている可能性がある。
- 2) 弱風域は、屋根の包絡線の高さまで形成されており、包絡線は概ね地表面と平行になっていた。一部、包絡線の高さを超える建物があり、その周辺で局所的に強風域が形成されていた。斜面の勾配と屋根の包絡線の包絡線の勾配が等しいことで、集落全体に連続する弱風域が形成される。これが経験的になされて来たことで、平屋で段々に斜面に集落が広がる、路地の風環境的にも極めて合理的でかつ独特で美しい景観が形成されてきた可能性がある。
- 3) 冬期の西寄りの海風が路地へ侵入するのを防ぐには、海岸線の住宅の形態が大きな影響を及ぼす。海岸に隣接する住宅の階高、屋根形状、向き、中庭の形態、窓面積など、さらなる調査が期待される。実測より、一部が開けた L 路地では、V 路地に比べ、やや風速が大きくなっており、現状の路地形態の維持が風環境の維持につながる。また、人口減少に伴い、空き家が増加しており、将来的に空き地となる領域も含め、空き地が連続する領域への植林などによる防風対策とその

効果の検討も期待される。

- 4) 平均風速の発生頻度分布より、山の南側の斜面や島の南端、集落の高台での風力エネルギー利用の可能性が考えられる。地上 2m の 1.5m/s の超過確率は、集落内では 25%以下で、穏やかな風環境が形成されていることがわかった。気温を考慮した適風範囲の検討や弱風時の夜間の斜面冷気流の発生の有無、また、その活用や路地形態との関係の分析は今後の課題である。
- 5) スマートフォン風速計を用いた多点計測により、路地内の風速分布を面的に把握することができ、概ね CFD の解析と対応する結果が得られた。風向が大きく変化する場合や吹き下ろしなど鉛直流が卓越するような場合の適用性については、今後の課題であるが、本計測手順を援用することで、都市建築空間の風環境を安価かつ簡易に、定性的な傾向を捉えることができる可能性がある。

<謝辞>

本研究を遂行するにあたり、多くの男木島の島民の方の協力を得ました。香川大学藤井容子助教には、男木島における路地の特徴を把握するためのご助言をいただいたほか、貴重な調査結果の生データをご提供いただいた。ここに記して謝意を表します。

<注>

- 1) 高松地方気象台における 2000-2010 年で観測されたデータを、拡張 AMeDAS 気象データシステムを用いて、夏期・冬期、1 日を 3 分割した時間帯にまとめた。
- 2) 白澤ら²⁰⁾によると、乱れの少ない一様流中の風洞中では 10% 程度の誤差で測定できることが示されている。
- 3) Mjølner と Sleipnir を近接する 2 地点で同時に測定を行い、ほぼ等しい結果が得られることを確認している。風洞などを用いた詳細な測定精度の違いについては、今後の課題としたい。
- 4) 人体が風速の測定結果に及ぼす影響を小さくするため、図 3-1 に示すように直立し、腕を上へ伸ばして測定した。
- 5) 高松地方気象台は男木島から最寄りに位置する気象台で、測定期間中の卓越風向は同一であることを確認している。
- 6) 白澤ら¹⁰⁾は、強風の中で計測する際の安全と負担を考慮し、測定時間を 1 分間としている。また、Durst²¹⁾は、10 分間平均風速に対する 1 分間平均風速のばらつきの標準偏差の比は、0.10 と報告している。本研究では、1 分間平均風速に基づく議論に留めており、10 分間平均風速との差は、測定点間の差に比べ、十分小さいものと考えられ、観測者の負担や住民の通行への妨げを考慮し、測定時間を 1 分間とした。
- 7) 地点 26 は、測定時間内で起動風速以下の時間が長く、定量的に風速を正しく計測できていないと判断し、以下の分析からは除外している。

<参考文献>

- 1) NPO 法人男木島生活研究所：2018 年 4 月現在の男木島の統計情報、<http://ogijima.kagawa.jp/> (2017 年 7 月 12 日最終アクセス)
- 2) 安藤亮，畔柳昭雄，中村茂樹：沿海強風地域に立地する集落の生活空間特性に関する研究，日本建築学会計画系論文集，pp.107-114, 1999
- 3) 安部良：男木島の魅力とみらい，安部良アトリエ級建築事務所，pp.10-35, 2016
- 4) 鍋島美奈子，古崎靖朗，中尾正喜，西岡真稔：移動観測によるヒートアイランド現象の実測 大阪平野の夜間気温分布，日本ヒートアイランド学会論文集，Vol.1, pp.23-29, 2006
- 5) 水野雅士，鍋島美奈子，中尾正喜，西岡真稔：自動車をを用いた移動観測による市街地気温分布調査 -セミバリオグラムとクリギング補間による気温水平分布の分析-，日本建築学会環系論文集，pp.1179-1185, 2009
- 6) 松尾聡，高木直樹，岩井一博，山下泰弘：移動測定による内陸地方都市の気候実態に関する研究，日本建築学会環境系論文集，pp.81-86, 2005
- 7) 高山成，山本春彦，張継権，石谷潔，王斐，原田陽子，兼石篤志，土谷安司，森博隆：都市ヒートアイランド実態調査のための移動気象観測法の開発および中国長春市における適用，日本建築学会技術報告集，pp.827-832, 2009
- 8) Yokoyama H., Ooka R., Kikumoto H.: Study of mobile measurements for detailed temperature distribution in a high-density urban area in Tokyo, Urban Climate, pp.517-528, 2018
- 9) Nakayoshi M., Kanda M., Shi R., de Dear R.: Outdoor thermal physiology along human pathways: a study using a wearable measurement system, Int. J. Biometeorol., pp.503-515, 2015
- 10) 白澤多一，義江龍一郎，藤井邦雄，福留伸高，吉田真紗子：住民参加型風環境マップの作成（その 1）風環境マップの作成方法，日本建築学会大会学術講演会梗概集，D-2, pp.783-784, 2016
- 11) Blocken B.: 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.129, pp.69-102, 2014
- 12) Tominaga, Y. et al.: AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., vol.96, pp.1749-1761, 2008
- 13) 日本建築学会：市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブックーガイドラインと検証用データベースー，2007
- 14) 早川紀朱，宮岡大：白川村荻町の合掌造集落における風環境に関する CFD 解析，都市住宅学，Vol.79, pp.14-19, 2012
- 15) 小川夕季，出口清孝，川久保俊，大風翼：白川村の地形モデルを用いた CFD 解析と合掌造り民家の温熱環境解析，日本建築学会環境系論文集，Vol.84, No.763, pp.865-872, 2019
- 16) 渡部朱生，大風翼，高野芳央，今野雅，持田灯，小林宏康：CFD を用いた仙台平野沿岸部の防潮林が農地の飛砂発生頻

度に及ぼす影響の検討. システム農学 Vol.32, pp.11-18, 2016

- 17) Sato N., Hashimoto T., Kaijima M.: The Spatial Composition of a Fishing Village through Counter-measures in Respond to Tsunamis and Adapts in Climatic Condition, Proceedings of 5th International conference on Human-Environment System, 2016.
- 18) 赤坂裕, 二宮秀興, 松本真一, 曾我和弘, 三木信博, 永村一雄, 永村悦子, 武政孝治: 拡張アメダス気象データ, 日本建築学会, 2000
- 19) 藤井容子: 男木島の路地および宅地擁壁の特徴からみた街路景観に関する研究, 日本建築学会技術報告集, pp.249-252, 2016
- 20) 白澤多一, 義江龍一郎, 藤井邦雄, 吉田真紗子: ポケットサイズ風速計によるビル風の簡易測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), D-2, pp.675-676, 2015
- 21) Durst, C. D.: Wind speeds over short periods of time, Meteorological Magazine, Vol.89, pp.181-186, 1960
- 22) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2015
- 23) 国土地理院: 立体地図 (地理院地図 3D・触地図), <https://maps.gsi.go.jp/3d/>, 2019
- 24) 国土地理院: 基盤地図情報, 基本項目 (建築物の外周線), <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>, 2018
- 25) OpenFOAM: OpenFOAM version 4.1, <https://openfoam.org/>
- 26) Yakhot V., Orszag S. A., Thangam S., Gatski, T. B. and Speziale, C. G.: Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique, Phys. Fluids, A4, pp.1510-1520, 1992.
- 27) 日本建築学会編: 都市の風環境評価と計画—ビル風から適風環境まで—, 日本建築学会, 1993
- 28) 村上周三: 風論, 新建築学体系 (8) 自然環境, 彰国社, 2019
- 29) 風工学研究所編著: ビル風の基礎知識. 鹿島出版会, 2005
- 30) 村上周三, 森川康成: 気温の影響を考慮した風環境評価度に関する研究, -日平均風速と日平均気温に基づく適風, 非適風範囲の設定-, 日本建築学会計画系論文集, Vol.358, pp.9-17, 1985
- 31) Li, W. & Meroney, R. N.: Gas dispersion near a cubical model building, Part I, Mean concentration measurements, J. Wind Engrg, & Ind. Aerodyn., Vol.12, pp.15-33, 1983
- 32) Oke, T.R.: Street design and urban canopy layer climate. Energy and Buildings, Vol.11, 103-113, 1998

<研究協力者>

南 健斗 東京工業大学 環境・社会理工学院 博士課程