

沖縄県竹富島の 集落景観と風環境調整機能の関係性

三浦詩乃¹・川添善行²・中井祐³

¹ 学生非会員 東京大学大学院新領域創成学科 (〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

² 正会員 工博 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻
(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³ 正会員 工博 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻
(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

沖縄県竹富島の伝統集落は、台風・季節風の卓越した風環境の下で石垣、ひんぶん、屋敷林などから成る景観を形成している。景観を構成する要素が集合として風の防御・利用等の風環境の調整機能を有しているという仮説のもとに、集落景観と風環境調整機能の関係を分析するため、現地調査の実測データに基づいて、CFD解析を行った。その結果、景観を構成する要素が互いに影響を与えあいながら風環境調整機能を実現していること、また、現在の竹富島の集落景観から各景観構成要素が風環境調整機能の発揮に適するように配置、組み合わせられていると解釈可能であるとわかった。

キーワード: 竹富島, 集落景観, 景観要素, 風環境, CFD解析

1. 背景と目的

農村等における伝統的風景は、長年かけて、その地域に住まう人々の営みが集積されて形成されたヴァナキュラーな景観であり地域の風土や自然と関わりをもって生きていくための知恵や慣習が形・空間・景観として具現化されている。そのため、景観のあり方はその地域の自然のなかで生活を営むための合理性と必然性を有していると考えられる。



写真-1 竹富島の景観

そこで本論文では、夏期の頻度の高い台風に対する防風対策と猛暑対策が必要となる厳しい風環境下にありながら伝統的集落景観をもつ沖縄県・竹富島を対象とする。その景観を構成する要素が集合とし

て、風環境を防風・利風につながるように調整する集団の効果をもつという仮定をたて、複数の要素同士が合わさった集団的效果の発揮によって現在の竹富島の集落の景観構成が風環境に合理的に対応していることを明らかにすることを目的とする。ここでいう集団的效果とは、景観の各構成要素が何らかの秩序に則って配置されることによって、ある特定の機能に対して集団として効果をもたらすことを意味する。

2. 対象と方法

1) 対象地の概要

a) 位置・気候

沖縄県八重山郡竹富町竹富島は日本最南端の八重山諸島の中に位置する。気候としては亜熱帯性気候と海洋性気候をあわせ持ち年間平均気温 24℃、年間平均降雨量約 2400mmを記録、夏は太平洋高気圧に覆われ晴れて蒸し暑い日が続く、同時に台風の通り道となる。冬は大陸高気圧が張り出し北西の季節風が卓越する。

b) 民家の特徴¹⁾

家屋自体は日常時の開放性と荒天時の閉鎖性を同時に達成している点で琉球列島に共通している。そ

の中で竹富島固有の特徴として基本的に本瓦(赤瓦)葺屋根南入分棟型建物配置であることが挙げられる。

家屋の変容があっても明治～昭和にかけて敷地内の配置は変容していないとされている。屋敷は2～3軒がつらなり1つの区画をなしている。屋敷と道路の配置に注目すると屋敷林を挟んで南に出入りが設けられている。屋敷地内は石垣で囲まれ、南側の出入り口で石垣が途切れた部分にはヒンプンと呼ばれる目隠し塀を後退させ建ててある。北西には屋敷林のフクギが配置されている。フクギは景観の観点から聖なる木として集落景観の形成に貢献する。

2) 関連する先行研究

関連する先行研究として『八重山・竹富島におけるパッシブ環境制御手法に関する研究その1～その4』^{2)～5)}がある。これらの研究では実測やCFD解析を用いて家屋一軒単位・集落単位・島全域単位での景観が風環境に対応している現状を示し、またメカニズムを考察している。竹富を例として景観による環境制御の可能性を検討することを主目的としており、本研究は風環境に対する家屋の集合としての効果を把握し、そこから現在の集落の形の成り立ちを読み解こうとする目的を持つ点で異なる視点に立ったものといえる。以下、手法の違い・結果を詳細にみていく。

井上らによる『その1 集落スケールの温熱環境緩和、防風効果』²⁾では島全体・集落内の気象実測、壁面・路地表面温度の測定により路地と石垣が温熱環境緩和の効果を果たしていることと防風林・集落自体に特に南風への低減効果があるという知見を得ている。居石らによる『その2 民家内の温熱環境測定結果とCFD解析による防風効果の検討』³⁾では気象実測から集落内部での温熱環境緩和・防風の効果が観測されること、CFD解析から石垣、ひんぶんの有無で防風効果が変化することを導き、室内温熱環境よりも卓越風に対する防風効果を意識した集落形成を結論づけている。これらに対し本研究では竹富島の集落景観を構成するひんぶん、石垣以外にフクギ等の要素にも注目し、それらを変数としてとらえたモデルによる解析により防風・利風に各要素がどれだけの程度で関わっているか、実際に竹富島で起きている景観要素の変容が風環境とどのように関わるか、そして各要素同士の働きに関係性があるまで含めて考察していく。

井上らの『その3 建築様式、住まいに変化が室内温熱環境に及ぼす影響』⁴⁾は実測により家屋のつくりにおいて現在の技術(アルミサッシ、エアコンなど)を取り入れたことがかえって室内温熱環境の質を落としているこ

とを示す。

中山らの『その4 CFD解析による伝統的民家の室内通風性状の評価』⁵⁾では伝統的民家と現在技術をとり入れた民家の室内通風性状を昼夜でそれぞれ比較している。さらに実測とCFD解析にモデルに16方向から風を流すことで、通風性能を検討した。結果として伝統的民家のほうが昼夜の温度差を利用しうまく通風できていることを示す。本研究では個々の建築・敷地ではなく、個々の建築・敷地の構成変化が集落全体の通風による室内温熱環境に対して与える影響を検証していく点でこれらの研究とは着眼点が異なる。

加えて他の先行研究として、『近代における竹富島の集落構成－竹富島の民家と集落の歴史研究(1)～(3)－』⁶⁾、『竹富島における祭祀の機能と集落の空間構成に関する研究』⁷⁾等の竹富島の歴史、祭祀の観点から空間構成の変遷や成り立ちを論じているものが多数存在する。本研究では風環境調整機能の現れとしての景観という観点から論を進めていく点で大きく異なる。

3) 方法

竹富島の景観を複数の要素同士間での集団的效果の関係性を見ていく中で竹富島の景観の変遷を考慮し、その変遷を景観要素の数値条件の変化として再現する。ここでその再現が風洞実験などの他の方法より簡潔に可能な流体を扱うCFD解析では景観要素条件の場合分け(例えば石垣の高さを変える、屋敷林を増やすなど)操作も行きやすく本論文に適している。本論文では以下の手順1～4をとり研究を進めた。

表-1 本論文のとった手順

手順1	竹富島の集落景観を構成する要素の把握と現状データの取得
手順2	CFD解析の入力値・モデル作成
手順3	夏期の①台風・暴風時、②定常風についてCFD解析
手順4	解析結果を用いた考察・分析

a) 竹富島の集落景観を構成する要素の把握と現状データの取得

2009年9月に竹富島を訪れ、現地ヒアリング調査と実測を行った。竹富島のこれまでの歴史と現況を知ること、また、CFD解析に用いるデータ取得ができた。

成果をもとに竹富島の集落景観を構成する要素を把握した。要素として、①石垣②ひんぶん③フクギ(屋敷林)④屋根形状⑤道幅・区画⑥屋敷の向きが挙げられる。事前の『竹富島の集落と民家・竹富島伝統的建造物群保存地区保存計画見直し調査報告書』¹⁾等による文献調査から、過去の石垣は2m近くあったこと

と道路拡幅により道幅が 2m から 4m 程度に変化したこと, そして屋敷が風水に従い南方向を向いていること⁸⁾がわかっていた. 加えて実測時に, 集落全体をまわって 2000 年集落図¹⁾と 2009 年現在の現況と異なる点を調査した結果から集落外縁に新築家屋が増えておりそれらには石垣の高さの低下, ひんぷんの未整備, 平らな屋根がみられた. また, 各屋敷の屋敷林が全体的に減少している, の 2 点が 10 年前と比較して顕著に表れていた. 以上の結果をもとに景観要素の解析条件を決定した.

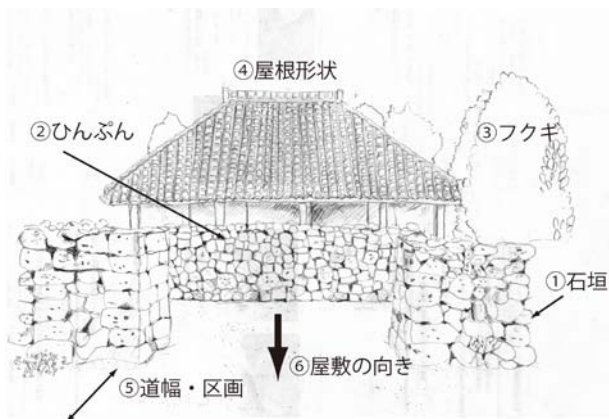


図-1 景観要素

表-2 各景観要素項目

景観要素	条件
石垣	2m(過去), 1.5m(現在), 50 cm(近年の傾向)
ひんぷん	あり(現在), 外縁部ひんぷんなし(近年の傾向) ⁹⁾
フクギ	あり(現在), なし(近年の減少傾向)
屋根形状	寄棟(現在), 平らな屋根(近年の傾向)
道幅	2m(過去), 4m(現在), 8m(現在との対照比較)
屋敷の向き	南, 東, 南西, 東南東, 南南東, 南南西 (南~東寄りの細かい方位)

b) CFD 解析の入力値作成

文献調査・現地調査より a) で挙げた①~⑥の要素に関するデータを取得した. 特に石垣とフクギの高さについては伝統的な配置・建築の屋敷(西屋敷 7 軒, 東屋敷 5 軒, 仲筋 5 軒)におけるデータを選び取り現在の典型的な屋敷の条件をもつ基本モデルを作成した. 解析ではこの基本モデルを基に各景観要素を変数とみて表-2 にあるように入力値を変えて結果を比較・考察していく. 基本モデルの入力値は表-3 のとおりである. ③のフクギの抵抗係数と開口率についてはフクギ固有の値は現段階ではデータとして存在しないため, 今回用いる解析ソフトの中で樹木一般¹⁰⁾の値とされているものを用いた. フクギは広く防風林として知られることから実際の抵抗係数はより大きくなり効果も今回の解析結果より大きいと考えられる. 風速については石垣地方気象台の 2009 年平年値データを用いることとした. 解析

では吹きだし面から一定の風が吹くこととなるので平均風速を入力する.

台風・防風時は乱流で風向きはバラバラの 25m/s とし, 夏期は南南西 5.4~6.5m/s の風が卓越しているため定常風では南南西 6.5m/s を入力した.

表-3 基本モデルの解析条件

基本モデル景観要素	解析条件
石垣	1.5m
ひんぷん	1.5m
フクギ	高さ 7m, 抵抗係数 0.75, 開口率 1
屋根形状	寄棟
道幅・区画	道幅 4m, 3 戸で 1 区画
屋敷の向き	南

さらに, CFD 解析は次式¹¹⁾で表される風速と高さの関係を示すべき乗則に従う.

$$U/U_0 = (H/H_0)^n$$

U: 風速 [m/s], U₀: 基準風速 [m/s], H: 高さ [m], H₀: 基準高さ [m], n: べき乗値, Z_b: 粗度考慮高さ [m]

今回 H₀ は石垣気象観測台風向風速計の高さ 27.1m を入力する. 竹富島は地表面粗度区分 II (田園地帯や草原のような農作物程度の障害物がある地域, 樹木・低層建築物などが散在している地域) に分類され, べき乗値 n=0.15, 粗度考慮高さ Z_b=5m をとる.

これらの結果を次の風環境解析のモデル作成に用いていく.

c) CFD 解析のモデル作成

まず, 竹富島の家屋を再現した 3D モデルを作成した. 図面作成ソフト VectorWorks, 解析に CFD 解析ソフト 3 次元熱流体解析プログラム Wind Perfect V3.5 1000 万メッシュ対応を用いて進めた.

集落内部の構造物の配置, 伝統的建造物の内部構造については詳細な図面¹⁾が分かる前与那国家住宅を参考に作成した. ただし, 敷地の広さ・内部の配置についてはモデルに一般性をもたせるために前与那国家固有の値ではなく現地調査結果を参考に設定した.

台風・防風時は雨戸閉鎖状態 (closed), 定常風下は雨戸と襖を解放した状態 (opened) でモデリングしている. ただし, 閉鎖状態時でも木性の雨戸であることから気密性を高くせず, 開口部にすきまをつくっている. また, 敷地の入口については風水に従った南向きになっている.

フクギモデルは流動抵抗として 9 個配置して一様に回転体としてモデル化した. 風に対する抵抗は葉の密度によるため幹の部分は除いている¹²⁾.

実際のとおり 1 戸モデルを横に 3 戸並べ 1 区画と

し、9 戸の敷地がならぶ範囲の解析を実現した。その結果、図-2 のようなメッシュ数：3136000，最小格子の大きさ：約 0.18×0.23×0.11mのモデルが完成した。以下、南から順に 1, 2, 3 区画と呼ぶこととする。

1 区画目の 3 件の結果は各敷地を単体で取り出した結果とほぼ同じであり、集落としての集団的効果を確認するために結果の考察について全 9 件を対象として比較を行っている。

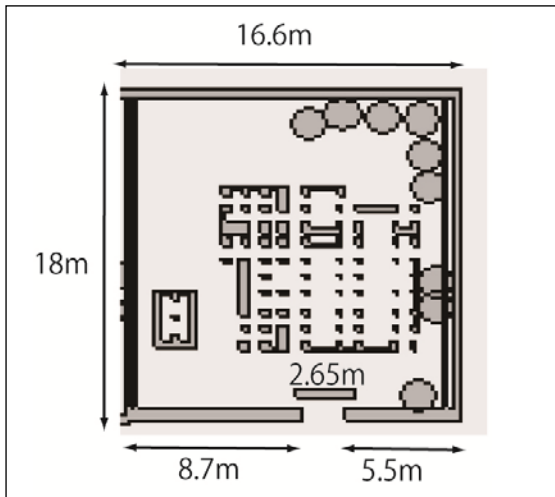


図-2 一戸の解析モデル（図の上側を北とする）

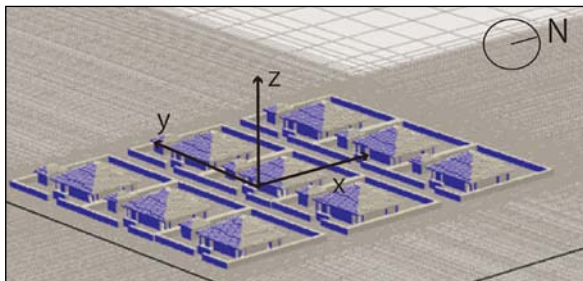


図-3 3区画のモデル

d) CDF解析手順

強風時の解析手法として、①5.4~6.5m/sの南南西の風を流し風の相似則を用いる。もしくは②台風の暴風域での平均風速25m/sを直接入力し可視化の際、細かく風性状を読み取りやすくする、の2手法を使い分けた。a)の解析条件に従い以下の表のような入力を行い解析を行った。

台風時は乱流が発生するため、絶えず様々な方角から風が吹きつける。今回のシミュレーションではそのような状態の再現までは技術上できないため代表風向を南南西とにおいて解析した。

表-4 台風・強風時：代表風向として南南西・風速25m/s

	石垣	ひんぷん	フクギ	屋根形状	道幅	屋敷方角
(1-a) 基本モデル	1.5m	1.5m	7m	寄棟	4m	南
(1-b) 1区画目 ひんぷんなし	1.5m	1区画のみ 0m	7m	寄棟	4m	南
(1-c) 全フクギなし	1.5m	1.5m	0m	寄棟	4m	南
(1-d) 1区画目 屋根形状変化	1.5m	1.5m	7m	1区画のみ 平ら	4m	南
(1-e) 石垣 50cm	50cm	1.5m	7m	寄棟	4m	南
(1-f) 石垣 2m	2m	1.5m	7m	寄棟	4m	南
(1-g) 道幅 2m	1.5m	1.5m	7m	寄棟	2m	南
(1-h) 道幅 8m	1.5m	1.5m	7m	寄棟	8m	南

表-5 定常風：南南西・風速6.5m/s

	石垣	ひんぷん	フクギ	屋根形状	道幅	屋敷方角
(2-a) 基本モデル	1.5m	1.5m	7m	寄棟	4m	南
(2-b) 石垣 50cm	50cm	1.5m	7m	寄棟	4m	南
(2-c) 石垣 2m	2m	1.5m	7m	寄棟	4m	南
(2-d) 屋敷方角	1.5m	1.5m	7m	寄棟	4m	南 西南 南東 南南東 南南西 南南東

3. 結果と考察

解析結果を x 断面と z 断面で切断し風の分布をみていく。z 断面については切断座標は人が体感しやすい z=1m 付近で比較した。

今回、結果に集団的効果が明確に現れた 2 つの解析結果（図-4, 5 参照）については特に詳細に記載する。

(1) 台風・強風時：南南西・風速 25m/s

a) 全解析の結果と考察

次に示す表-6 の結果より風環境と景観という観点

では公共事業による道路拡幅自体は問題ではなく、むしろ、拡幅による石垣の高さ低下のほうが風環境に対して影響を及ぼしたと考えられる。

表-6 台風・強風時の解析結果と考察

	結果・考察
(1-a) 基本モデル	風の下流方向においての敷地内・入口において風速低減がみられる。
(1-b) 1区画目 ひんぷんなし	ひんぷんがないと風が屋敷に直接あたりやすくなる。ひんぷんは風向を変え、後方の屋敷に吹き込む風量を減少させている点で集团的効果を担う景観要素である。
(1-c) 全フクギなし	フクギは人の頭上～屋根の高さレベルで風速低減効果を発揮している。
(1-d) 1区画目 屋根形状変化	形状変化により風が屋敷に直接あたりやすくなる。寄棟の屋根は風向を変え、後方の屋敷に吹き込む風量を減少させている点で集团的効果を担う景観要素である。
(1-e) 石垣 50 cm	石垣 50 cm では風が屋敷に直接あたりやすくなる。風向を変え、後方の屋敷に吹き込む風量を減少させている点で集团的効果を担う景観要素である。
(1-f) 石垣 2m	大きく風速低減がみられる。フクギの効果が後方の区画まで及ぶ状況がみられる。
(1-g) 道幅 2m	基本モデルと比較して、風速増大がみられる。
(1-h) 道幅 8m	基本モデルと比較して、多少の風速低減がみられる。

a) 基本モデル（石垣 1.5m）と石垣 2m の場合の比較（図-4）

基本モデルではベクトルの向きが分散していることから風が弱まり厳しい風環境に適応しているといえよう。

石垣 2m の場合、基本モデルと比較すると敷地内・道・隣方向ともさらに風速が弱まっており特に屋敷後方で顕著で z 方向減速部分の厚みが大きい。道路は地表面～2m の高さで風速が減少している。

z 断面に注目すると屋根近くの風のうねりが減少し、地面と平行に風が流れる。また、フクギの効果が大きくなり次の屋根まで速度減少がみられる。したがって屋敷周囲で強風にさらされるのはほとんどなく、石垣が 2m であることは大変強風条件下に適応しているといえる。石垣について 50 cm の違いにより風性状にこのような大きな違いが表れることは注目すべきことである。

加えてみられるのは基本モデルの際にはない、フクギの風速低減効果が後方の区画まで及ぶことである。石垣が 2m であるときフクギの集团的効果の発揮に貢献しているといえる。

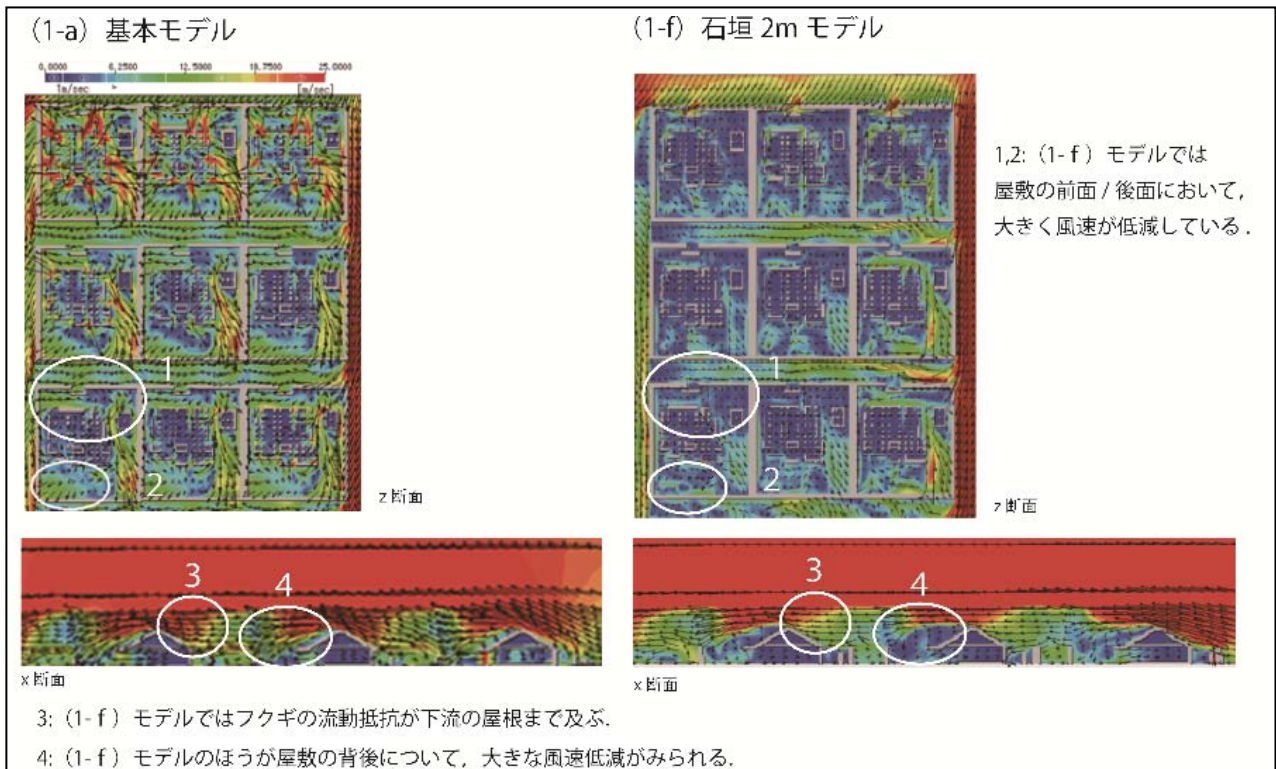


図-4 (1-a)基本モデルと(1-f)石垣 2m モデルの比較

(2) 定常風：南南西・6.5m/

a) 全解析の結果と考察

次に日常的に多く観測される定常風の状態での解析

を行った。解析結果からは石垣の高さについては近年見られる低いものが増えていくと家屋単体だけでなく、集落の防風・利風性能が落ちていく可能性が

考えられる。また、(2-d) 屋敷方角の解析結果について集团的効果が明確に現れたため、(2-a) 基本モデルと比較しながら解析結果と考察について以下で詳しく記載する。

表-7 定常風時の解析結果と考察

	結果・考察
(2-a) 基本モデル	家屋内の通風性能は低い。
(2-b) 石垣 50 cm	乱れが大きくな風向が地面にむかっているためフーヤ内まで届いていないことがわかる。石垣 1.5m のほうが優れている。
(2-c) 石垣 2m	内部は無風だが、南か北の縁側にいればそよ風を感じることができる。通風性能は基本モデルと大差ない。
(2-d) 屋敷方角	南南西向きの家屋では石垣 1.5m の場合に通風性能が向上する。

a) 基本モデル（南向き）と屋敷方角南南西向の場合の比較（図-5）

屋敷が真南向きの基本モデルでは全体として、家屋外では風速 3.25m/s 程度を保ち通風がよいが、家屋の内部はほぼ無風状態で通風性は良くない。

一方、南南西向きの家屋では基本モデルと他の方向の結果と比較して大きな差異がみられる。z 平面において各屋敷内部に基本モデルではみられなかった 1.625m/s 程度の風の道ができ縁側にも多少ではあるが通風がみられる。x 断面においても違いが顕著となっている。フクギの流動抵抗が原因となり、風

向が通風に適するよう変化した結果、屋根を這うものよりも屋敷内に流入する風量が大きくなっていることがわかる。この場合、南南西の屋敷の向きという要素に加えフクギが集团的効果を担う要素である。

現状の石垣 1.5m において屋敷が南南西向きという景観要素が存在する時、フクギが集团的効果を担い、通風性能がよく発揮されるといえる。

この結果を踏まえて、現状の集落をみると、真南より南南西を向く区画が多数である。風水や日当たりの要因を満たす以外にも、夏の通風環境に順応したづくりであることがいえる。

4. 結論

(1) 結論

解析の結果比較により卓越した風環境の夏の竹富島について各景観構成要素が風環境調整機能の発揮に適するように配置、組み合わせられていると解釈可能であるとわかった。また、台風・強風下において各景観要素が個々に効果を発揮するだけでなく、異なる景観要素同士が互いの効果をひきだしあっている可能性を提示できたことも成果だといえるであろう。これは過去の石垣の高さ 2m や南南西の屋敷向きの場合の解析で特に顕著にあらわれてた。この場合、風環境と適応した景観を実現させるためには石

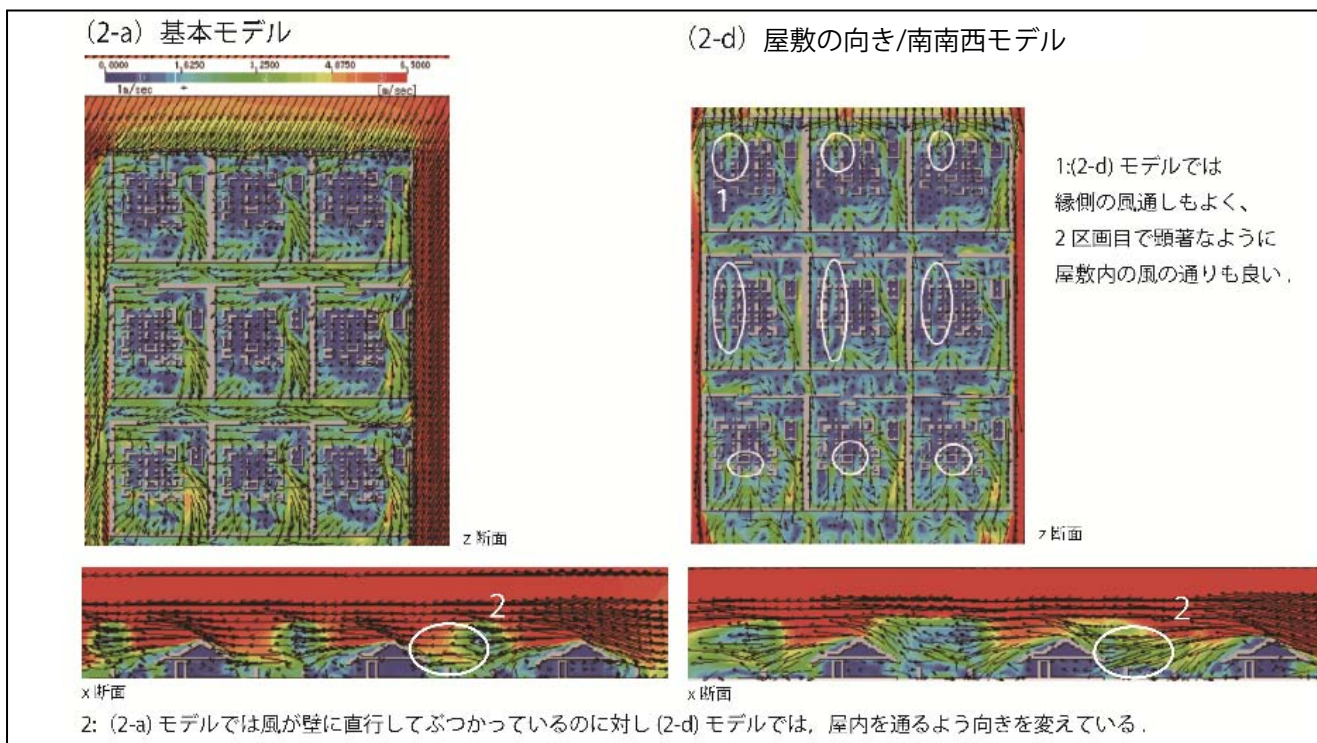


図-5 (2-a) 基本モデルと(2-d)南南西モデルの比較

垣だけ、フクギだけというように個々の景観要素ごとにアプローチするのではなく、異なる景観要素どうしが風に対する機能でつながりを有していると判断することができる。

(2) 考察

厳しい風環境と調整する機能が石垣やフクギの屋敷林など集落を構成する景観要素に深く見受けられた。竹富島の景観が風環境にうまく対応していると今回の結果は、自然環境への対応の合理性が景観となっている可能性を提示している。

(3) 今後の課題

まず、CFD 解析についてであるが、集落全体規模のスケールスケールの大きい解析結果を反映し解析をスケールダウンして詳細までみていくデータの整理と利用方法を確立する必要がある。さらに風の相似則をうまく使った効率的なシミュレーションを行うことが、データの量的改善をもたらすであろう。最後に、今回は冬の季節風と集落の関係性についての解析が不十分に終わったため竹富島の冬期の風環境について再度研究の必要があると考える。

謝辞：本研究の資料調査において竹富島・貴宝院菟集館館長上勢戸芳徳氏、東京大学生産研樋山恭助助教には多大なご協力を頂いた。厚く謝意を表す。

参考文献

- 1) 竹富町教育委員会：竹富島の集落と民家・竹富島伝統的建造物群保存地区保存計画見直し調査報告書，2000
- 2) 井上 大嗣，白石 靖幸，郷田 桃代：八重山・竹富島におけるパッシブ環境制御手法に関する研究（その 1）集落スケールの温熱環境緩和，防風効果（環境工学），日本建築学会研究報告 九州支部 2，環境系（46），pp. 309-312
- 3) 飯田 玲香，井上 大嗣，白石 靖幸，郷田 桃代：八重山・竹富島におけるパッシブ環境制御手法に関する研究（その 2）民家内の温熱環境測定結果と CFD 解析による防風効果の検討（環境工学），日本建築学会研究報告 九州支部 2，環境系（46），pp. 313-316
- 4) 井上 大嗣，白石 靖幸，中野 淳太：八重山・竹富島におけるパッシブ環境制御手法に関する研究：（その 3）建築様式，住まい方の変化が室内温熱環境に及ぼす影響，日本建築学会研究報告 九州支部 2，環境系（48），pp. 125-128
- 5) 中山 翔太，井上 大嗣，白石 靖幸：八重山・竹富島におけるパッシブ環境制御手法に関する研究（その 7）CFD 解析による伝統的民家の室内通風性状の評価，日本建築学会研究報告 九州支部 2，環境系（48），pp. 129-132，
- 6) 和宇慶朝太郎，宮本雅明：近代における竹富島の集落構成－竹富島の民家と集落の歴史研究（1）～（3）－，日本建築学会研究報告 九州支部 3，計画系（41），pp. 397-400，2002-03-01
- 7) 金城正紀 片山和俊 光井渉：竹富島における祭祀の機能と集落の空間構成に関する研究，日本建築学会計画系論文集（604），61-68，2006-06-30
- 8) 窪徳忠：沖縄の風水，平河出版社，1990
- 9) 坂本淳二 上北恭史：琉球諸島における風土・風水を基調とした文化景観のデザイン－八重山・竹富島伝統的民家の門，ひんぶん，主屋の位置関係，日本建築学会大会学術講演 概集（関東），pp. 175 - 176，2001
- 10) 安部剛，布引英夫，半貫敏夫：単体樹木の防風効果に関する基礎的研究 その 1 風洞実験と数値流体解析概要，日本建築学会大会学術講演概集，pp. 801-802，2008
- 11) 村上周三：CFD による建築・都市の環境設計工学 東京大学出版会，2000
- 12) 神山健二 大橋征幹 成田健一：葉面積密度を代表面積とした樹木の抵抗係数に関する風洞実験，日本建築学会環境系論文集 第 578 号，pp. 71-77，2004