建築様式，住まい方の変化が室内温熱環境に及ぼす影響

ー八重山郡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）ー

EFFECTS OF THE CHANGE IN ARCHITECTURAL STYLES
AND LIFESTYLE ON INDOOR THERMAL ENVIRONMENT

Passive environmental control methods on Taketomi Island, Yaeyama (Part 2)

井上大嗣*, 白石靖幸**, 中野淳太***

Daishi INOUE, Yasuyuki SHIRAISHI and Junta NAKANO

The purpose of this study is to clarify the effects of change of architectural style and open time of the openings on indoor thermal environment in the traditional vernacular house of Taketomi Island. The comparison measurement of indoor thermal environment and CFD analysis of cross ventilation performance in traditional vernacular are conducted. The following results were obtained: 1) When the traditional opening pattern (opening during the day, closing during the night) were reproduced in old Yonaguni house which leaves a traditional architectural style, SET* in the daytime became low about 2°C as compared with the other repaired traditional vernacular. Indoor wind velocity contributed to the fall of the effective temperature most. 2) When openings are closed in old Yonaguni house at night, since the airtight performance of the sashes are low and there is also almost no internal load, SET* also becomes low about 1-2°C at night comparing with other vernaculars. 3) According to CFD analysis, in existing traditional vernaculars, since opening area is halved with the installation of aluminium sashes or podium, PFR/Vp and kinetic energy KE are falling to about 25% and 50% respectively through all wind directions, comparing with the old Yonaguni houses. Especially, the influence by installation of aluminium sashes is larger than that of podium.

Keywords: Taketomi Island, Traditional Vernacular House, Thermal Environment, Natural and Cross Ventilation, CFD Analysis

竹富島，伝統的民家，温熱環境，自然換気・通風，CFD解析

1. 序

近年、地球温暖化の顕在化に伴い、パッシブ手法と言ったエネルギー消費を伴わない環境制御技術が注目を集めている。日本にはそれらパッシブ技術を有する伝統的な建物が数多く存在する。本研究では、高温多湿地域におけるパッシブ環境制御手法に関する研究の一環として、琉球地方における伝統的集落・民家形態を残す八重山郡竹富集落を対象とし、集落スケール、民家スケールでの暑熱環境緩和・防風効果を解明することを目的として、既報(その1)¹⁾では、竹富集落における夏季の屋内外の温熱環境等の測定結果について報告した。集落の景観要素である石垣や白砂の路地による屋外の暑熱環境緩和効果等の幾つかの優位性は確認できたものの、対象民家内の温熱環境に関しては、改修により本来の伝統的民家とは形態・仕様が異なっており、また開口部の開閉等に代表される住まい方が変化することによって¹⁾、室内の自然換気・通風量が低下し、それに伴い室内温熱環境も変化(悪化)しているものと推測された。従って、本報では伝統的民家本来の室内温熱・空気環境の検証を目的として、追加実測として、原型を残す伝統的民家(図1 旧与那国家民家)と改修が施された現状の伝統的民家(図1 民家A及びB)を対象とした室内温熱環境の測定を行ったため、その比較・検討結果について示す^{注1)}。特に、民家内の風環境や自然換気量に関しては、今回の実測では詳細を把握することができなかったため、数値シミュレーションによるアプローチとして、

CFD(Computational Fluid Dynamics)解析によりアルミサッシや腰壁の設置等による開口面積の縮小といった改修・民家形態の変化が室内の自然換気・通風性状にどのような影響を与えるかを詳細に検討する。伝統的民家やヴァナキュラー建築を対象とした環境性能評価は多数試みられており²⁻⁴⁾、室内温熱環境や換気量評価にはCFD解析が活用されるに至っている。しかし竹富島の民家のように琉球地方の伝統的民家を対象とした研究・解析事例はなく、また近代化に伴った建築形態や住まい方の変化による室内温熱環境の変化を検証しようとする研究は見られない。

2. 実測対象

2-1 竹富島における伝統的民家

竹富島の伝統的な民家は貫屋と呼ばれる架工法によって成り、敷地中央に母屋(フーヤ)と台所棟(トーラ)の2棟を南向きに配する構成が一般的である(図1)。母屋正面には低く深い軒によりアマハジ空間がつくられており、屋根は赤瓦葺きの寄棟屋根で敷地は石垣で囲まれている。屋敷内には母屋より丈の高いフクギが数本から数十本植えられており、これらは防風、日射遮蔽の役割を果たす⁵⁾。

2-2 現状の民家における建築様式の変化

本来の伝統的民家では、母屋においてはガラス戸を用いず、昼間は開放されたままで、夜間や破天の時には雨戸を立てていたが、現在で

本論文は既に発表した文献¹²⁾, 13)を加筆・修正したものである。

* (株)日建設計 工修

** 北九州市立大学国際環境工学部 准教授・博士(工学)

*** 東海大学工学部建築学科 講師・博士(工学)

Nikken Sekkei Co., Ltd., M. Eng.

Assoc. Prof., Faculty of Environmental Engineering, The Univ. of Kitakyushu, Dr. Eng.
Lecturer, Department of Architecture and Building Engineering, Tokai University, Dr. Eng.

表 1 竹富集落における生活様式及び建築様式の変化と原因¹⁾

生活様式・建築様式の変化		原因
①	気密性の向上 (アルミサッシ設置等)	冷房の使用 観光客の増加による防犯意識の向上 台風への防御
②	トーラの機能消失	茅葺から瓦葺への屋根の変化 (火事の危険性低減) 家電製品等の調理器具の使用 (利便性・排煙等の問題)
③	日中開口部の閉鎖	冷房の使用 人や車の往来に伴った室内への白砂の埃の侵入を防ぐ 観光客増加に対するプライバシー保護
④	フクギの下枝を 剪定しない ^{注2)}	上記③の原因に対応

表 2 各民家の開口部の開閉パターン

民家	日付	日中	夜間
1) 旧与那国家民家	9/3	半開	閉鎖
	9/4	開放	閉鎖
	9/5	閉鎖	開放
	9/6～9/7	開放	開放
2) 民家A	9/2～9/7	開放	閉鎖
3) 民家B	9/2～9/7	閉鎖	閉鎖

はほとんどの家屋において、台風への防御、防犯性、冷房の使用等の面から開口部にはガラス戸が設置されている。加えて、伝統的建築様式の木造民家においても比較的新しいものには腰壁やアルミサッシの設置等による開口面積の縮小も見られる。本来の伝統的民家は、戸を全て戸袋に収納することにより、開口部全面を開放可能な形態となっている。その他にも表 1 に示すように生活様式や建築様式にも変化が見られる。特に開口部の開閉に関しては日中開口部を閉じている民家も少なからずあり、本来の開放的な造りである伝統的民家が持つ通風性能を発揮しているとは言い難い^{注2)}。

2-3 測定対象民家

測定対象民家を図 1 に示す。測定対象の民家は既報(その 1)¹⁾において測定を行った民家 A、民家 B に加え、伝統的民家の原型を留めている民家として旧与那国家を対象に室内温熱環境測定を行った。既報(その 1)¹⁾において測定を行った民家 C に関しては、今回は測定を行っていない。旧与那国家は重要文化財に指定されており、現在、居住者はおらず^{注3)}、島内の定期的な集会等に活用されている。民家 A の居住者は高齢の夫婦であり、日中南面と西面の開口部を開放し、夜間は閉鎖している。アルミサッシ等の設置により、開口時の開口面積は旧与那国家より小さく、台所はフーヤ内にあり、トーラは現在倉庫として使用されている。民家 B の居住者は高齢の女性 1 人であり、開口部は日中・夜間共に閉じたままの状態が多い。民家 A と同様に台所はフーヤ内にあり、トーラは倉庫として使用されている。民家 A、B 共に冷房が設置されており、測定期間中は民家 A で就寝前に使用している。

3. 実測概要

民家内の温熱環境測定のためアメニティメータ(AM-101 京都電子工業)により気温、湿度、MRT、風速の測定を行い、これにより SET* を算出した。なお、前回の測定¹⁾の際に、民家 A 及び B では居間と他の部屋との平均温度の差があまり見られなかったため、今回の測定で

図 1 測定対象民家図面

は居間以外の部屋の測定を行っていない。SET*算出時の着衣量及び代謝量はそれぞれ 0.5clo、1.0met とした。図 1 に示すポイントの床上高さ 0.6m(座位体中心)に設置し、30 分間隔で測定を行っている。その他、旧与那国家民家の敷地内には、百葉箱に入れた温湿度計を一カ所設置し、屋外温湿度の測定も行っている。測定期間は 2008 年 9/2 18:00～9/8 12:00 で、期間中の天候は 9/2～3 まだが曇り、9/4 以降は晴れであった。測定期間中の外気温、平均風速、日射量を図 2 に示す。前回の測定¹⁾にて、竹富島に屋外気象観測装置を設置して測定した気象データと石垣島の地方気象台のデータ(気象庁)がほぼ一致したため、今回は石垣島地方気象台のデータを用いた。

実測期間中の各民家の開口部の開閉パターンを表 2 に示す。旧与那国家民家に関しては管理者の許可の下、表 2 に示すように日中夜間の開口部の開閉パターンを変化させて測定を行った。9/3 は昼夜ほぼ閉

鎖状態^{注4)}、9/4～9/5は昼夜のどちらかを開放、9/6～9/7は昼夜開放した状態で測定を行った。伝統的民家の本来の運用方法としては、9/4の日中開放、夜間閉鎖のパターンが対応する。民家A及びBの開口部の開閉は、居住者任せではあるが、概ね表2に示すような運用を行っていることを確認している。

4. 実測結果

4-1 SET*

図3に各民家におけるSET*の時系列変化を示す。実測期間を通じた傾向として、各民家とも昼間の時間帯は30～34℃程度、夜間の時間帯は26～32℃程度で推移している。昼間の時間帯においては開口部を常に閉じている民家Bが比較的高い値を示しており、民家Aと旧与那国家はそれより低い値で推移している。特に夜間の時間帯においては各民家間での差異が昼間よりも大きくなっている。また民家Aにおいて21:00～24:00の時間帯に室温が著しく低下しているが、これは就寝前に冷房を使用しているためである。

次に一日単位の傾向として、9/4の旧与那国家では、伝統的な住まい方（日中開放、夜間閉鎖）を再現しており、他の民家と比較して日中のSET*が2℃ほど低い。民家Aにおいても同様の住まい方をしているが、本来の民家形態と比較すると開口面積が半減している等の理由により十分な室内風速が得られておらず（図5参照）、開口部を閉鎖している民家Bと日中のSET*に殆ど差がない。夜間になり全ての民家で開口部を閉鎖しているが、旧与那国家では他の民家と比較して、建具の気密性能が低く夜間の換気量も多いものと推察され、また内部発熱量^{注6)}も殆どないため、SET*は夜間においても1～2℃程度低くなる。

9/5の旧与那国家では、前日夕方から当日の夕方にかけて開口部を閉鎖して、夕方以降開放しているが、日中は各民家共に室内風速はほぼ0.1m/s以下となり、SET*は3つの民家ではほぼ一致する結果となった。また、旧与那国家では夕方の開口部の開放と共にSET*が4℃程度低下している。9/4と9/5のSET*の結果を比較することにより、室内風速が体感温度の低下に大きく寄与していることが分かる。その他の要因として自然換気・通風による日射熱や内部発熱の排出効果も考えられるが、各民家の日中の室温にあまり差がない点（図6）や民家内の平均放射温度が室温と同程度に推移するといった結果^{1), 注7)}から判断すると、体感温度の低下には室内風速の寄与が最も大きいものと推察され、これは蒸暑地域における一般的な知見と一致する。

9/6～7にかけて旧与那国家では、常時開口部を開放しており、昼夜を問わず他の民家と比較して、SET*が最大で4℃程度低くなる。夜間から朝方にかけては、冷房を行っている民家Aほどではないが、これに近い値までSET*が低下している。

図4に各民家内温度、SET*の平均値及び変動幅を示す。旧与那国家の開口部の開閉パターンの異なる9/3, 4, 5, 6の4日間の結果をそれぞれ室内温度を左側にSET*を右側に示す。9/3は曇りで日射量が少なかったため、各民家共に変動が小さい。9/4以降は旧与那国家において開口部を開放していたため他の民家と比較すると平均温度、SET*共に低い傾向にあることが確認できる。旧与那国家において伝統的民家本来の開口部の開閉パターンを再現した9/4で比較すると、現状の民家は開口面積の減少に伴った通風性能の低下（民家A）や開口部を常時閉鎖するといった住まい方の変化（民家B）等の理由により、夏季室内の体感温度が約1～2℃程度（平均値）高くなることが本実測により確

図2 外気温・平均風速・日射量（石垣島地方気象台観測地）

図3 各民家のSET*の時系列変化^{注5)}

図4 各民家内温度、SET*の平均値及び変動幅^{注8)}

図5 室内風速の時系列変化

図6 室内外温度差（室内温度－外気温度）注9)

認できた。また、夜間の風通しを意図した9/6や9/7のデータと比較すると、約2～3℃程度（平均値）高くなることが示唆された。

4-2 室内風速

図5に室内風速の時系列変化を示す。民家Aでは日中開口部を開放していたため、0.1～0.3m/s程度の風速が確認できる。また夜間においては開口部を閉鎖していたが、冷房、扇風機を使用しているため0.1m/s程度の風速が確認できる。民家Bではほぼ全時間帯において開口部を閉じていたため、室内風速は0m/sに近い値となっている。旧与那国家では、9/4の9:00～18:00、9/5の18:00～9/7の18:00の期間で開口部を全て開放して測定を行っているため、0.1～0.5m/s程度の風速となっている。図3のSET*の結果とも概ね対応する。図2の屋外の平均風速データから分かれるとおり、外部風は夜間低くなる傾向にあるが、これに伴い室内風速も0.1m/s程度に低下する。

4-3 内外温度差

図6に各民家の室内外温度差を示す。まず、9/3は旧与那国家において昼間開口部を半開、夜間に全閉の状態であった。各民家共に日中は外気温に近い値を示し、夜間において1.0～2.5℃程度高い値となっている。各民家間では図3のSET*の傾向と対応し、民家B、民家A、旧与那国家の順で外気温との温度差が大きい傾向にある。9/4は旧与那国家において昼間開口部を全開、夜間に全閉の状態であったが、ほぼ9/3と同様な傾向となっている。9/5は旧与那国家では開口部を昼間閉鎖、夜間開放していたが、日中外気温が30℃を超え、室内外温度差は、日中マイナスとなる時間帯もある。開口部を開放していた夜間においても外気温に近い値、若しくは低い値となっており、他の民家に比べて3～4℃程度低い。9/6は旧与那国家では終日開口部を開放しており、全時間帯で外気温との差はほぼ0℃で推移している。夜間の時間帯においても9/5と同様他の民家に比べて2～3℃程度低い値となっている。以上より、夜間の外気導入により更なる室内温度の低下が期待できることが示唆された。

5. CFD解析の概要

上記実測調査では、伝統的建築様式を残す民家と改修が施された民家に対して室内温熱環境の比較・検証を行い、民家の自然換気・通風性能の低下が、室内温熱環境を悪化させている一つの要因である可能性が示唆された（例えば、開口部の開閉パターンの同じ9/4の日中の旧与那国家と民家Aの比較）。しかし、今回の実測では、民家内の風速測定は居間の1点のみで行ってならず、民家の自然換気・通風性能を評価するにあたっては不十分である。また扇風機の使用等、人為的な要因による影響も否めない。換気量評価に関しては、トレーサーガス法や圧力差法等の現地実測による測定も考えられるが、対象民

図7 解析モデル平面図

写真1 建築様式の変化

家の開放度が高く、外気の流入流出経路も複雑であるため、正確な換気量の測定は困難である。このため、本研究ではCFD解析を採用する。CFD解析では、アルミサッシや腰壁の設置に伴った“民家の形状変化”に関するケーススタディを実施し、改修や建築様式の変化による民家の通風性能の低減効果の検証を行う。

5-1 解析対象とモデル化

竹富島にみられる伝統的民家のモデル化は、伝統的建築形態を残す旧与那国家(重要文化財指定)の図面を基に再現している。図7に解析モデルの平面図を示す。室内は間仕切りを全て開けた状態を想定し、三番座を部屋1とし、一番座、二番座を合わせて部屋2とし、裏座を部屋3としてそれぞれの部屋の通風性能を検討する。

5-2 解析ケース

既報(その1)¹⁾で示した通り、現状における伝統的民家では、アルミサッシの設置や開口部の縮小等の建築様式の変化が見られる(写真1)。これらは開口面積の減少に繋がるものと考えられ、本来開放的造りである建築様式の通風性能を低下させる要因となっていると推察される。よって本解析では、現状の改修が施されている民家に見られるアルミサッシと腰壁の設置による開口部の縮小を再現し、これらの室内換気、通風性能への影響を検討する。解析ケースを図8に示す。

Case1 を本来の伝統的民家の建築様式を想定し、Case2 では腰壁による開口部の縮小を考慮、Case3 ではアルミサッシの設置を考慮、Case4 では Case2、Case3 の両条件を考慮して解析を行う。また各風向における室内通風性状を把握するため、各ケースにおいて計 16 風向で解析を行う。

5-3 解析条件

水平方向 100m(X)×100m(Y)、鉛直方向 30m(Z)の解析領域の中央に民家を配置し、民家内外を一体的な解析空間として、流れ場及び濃度場の解析を行う。解析条件を表 3 に示す。流入境界は敷地内風速測定結果より得られた平均風速(高さ 2.0m にて風速 0.59[m/s])¹⁾を使用し、鉛直風速分布は 1/4 べき乗則と仮定した。換気・通風性能の評価のため汚染物質を室内空間から一様に 1.0kg/s・m³発生させ、濃度分布を算出する。乱流モデルは改良 k-ε モデル⁶⁾を使用する。

5-4 CFD 解析の予測精度の検証

本解析を行うに当たって、CFD 解析を民家内の換気量評価に適用した際の予測精度の検証のため、風洞実験を対象とした事前解析を行った。解析対象は文献(7)の独立住宅を模擬したモデルであり、風洞実験と同様に風向を流入側開口法線方向に対して 0°～75°の計 6 ケースで行った。CFD 解析の境界条件、乱流モデル等は Case 1 と同様とした。汚染物質の発生、濃度分布の測定は風洞実験と同条件で行い、換気回数の算出を行った。風洞実験と CFD 解析の結果を図 9 に示す。CFD 解析の結果は風洞実験の結果とほぼ一致しており、実際の民家モデルとは建物形状が異なるものの、CFD 解析により実用上、十分な予測精度で室内の換気量を評価できることを確認した。

5-5 民家内の換気・通風性状の評価手法

民家内の換気・通風性状の評価に際しては、民家内へ貫流もしくは民家内で発生する熱エネルギーの排出効率、及び気流による体感温度の低減効果に着目し、以下の 2 つの指標を用いる。

① 局所排出換気回数 PFR/V_p⁸⁾

PFR(Purging Flow Rate)は通風性状を評価する指標であり、空間内で一様に発生させた汚染物質発生量 q_p [kg/s]を局所領域内の汚染物質空間平均濃度 C_p [kg/m³]で除したものの (PFR= q_p/C_p [m³/s])として定義される実質的な換気量である。局所排出換気回数 PFR/V_p は実質的な換気量を空間の体積 V_p で除して算出される実質的な換気回数である。

② 運動エネルギー KE⁸⁾

室内の平均運動エネルギーは暑熱時における体感温度の低下能力を表す物理量と考えられる。平均流の速度 (u, v, w) [m/s]、乱流エネルギー (k) [m²/s²]より、室内空間の平均運動エネルギー (KE) [m²/s²]を次式で計算する。

$$KE = \frac{1}{V_p} \iiint_{Indoor} \left[\frac{1}{2} \times (u^2 + v^2 + w^2) + k \right] dV \quad (1)$$

6. 解析結果

6-1 夏季卓越風向時(南風向)の結果

図 10 に高さ 1.1m(体中心)での風速分布、並びに各室での PFR/V_p 及び運動エネルギーを各ケース毎にそれぞれ示す。ここでは竹富島の夏季の卓越風向である南風向時の結果を示している。

Case1 の風速分布では、前面に位置する部屋 1、部屋 2 において全体的に流速が速く、PFR/V_p、運動エネルギー双方においても高い値となっている。開口部を開放する日中においては居住者は三番座である

表 3 解析条件

解析領域	100m(X)×100m(Y)×30m(Z)
流入境界	$U = U_d (Z/Z_0)^{1/4}$ $\varepsilon = C_\mu k_{in}^{1.5} U_d / 4 (C_\mu k_{in}^{0.5}) Z_0^{0.25} Z^{0.75}$ k は風洞実験値 ⁹⁾
流出境界	圧力境界条件
上空境界	フリースリップ
地表面境界	一般化対数則
乱流モデル	改良 k-ε モデル ⁶⁾
メッシュ分割	151(X)×115(Y)×63(Z)
その他	民家内領域において汚染物質を 1.0kg/m ³ s で一様発生させ定常濃度分布を算出する。

(U:流入風速[m/s] Z:鉛直方向座標[m] k:乱流エネルギー[m²/s²]
ε: k の散逸率[m²/s³] C_μ:モデル定数(=0.09[-])

図 8 解析モデル(各ケース)

図 9 CFD 解析の予測精度の検証

部屋1で過ごすことが多く、効果的な通風により涼感を得られるものと考えられる。戦前は、部屋2の東側に対応する一番座も日中よく利用されていたが¹⁰⁾、こちらも部屋1同様に効果的に通風が得られていたものと推察される。一方、裏座に位置する部屋3では気流、 PFR/V_p 、運動エネルギー共に小さい値となっており、特に裏座が風下側に位置するため濃度場解析の際に一度解析領域から排出された汚染物質が再帰する（再度領域内に戻ってくる）可能性が高いため、 PFR/V_p は著しく低い値となっている^{注10)}。Case2では腰壁設置の影響で風速値がCase1と比較して全体的に低くなっており、これに伴い PFR/V_p 、運動エネルギーも低下している。特に民家西側の開口面積の縮小により部屋2の運動エネルギーの低下が顕著となる。Case3ではアルミサッシの設置により全開口部の面積がCase1の1/2程度となっており、民家内における外部風の影響範囲が狭くなる傾向となっている。 PFR/V_p 、運動エネルギーの値は、各部屋ともCase1より低下しており、通風性能の著しい低下が確認できる。Case4はCase2、Case3の両条件を考慮したものであり、竹富島に現存する伝統的民家において多く見られる様式である。室内風速分布はCase3と同様に外部風の影響範囲が狭くなる傾向にあり、風速値も小さくなる。風速分布パターンから判断すると、腰壁よりもアルミサッシの設置による影響が大きいものと推察される。各室の PFR/V_p に関してはCase1と比較すると平均的に25%程度、運動エネルギーに関しては50%程度にまで大きく低下している。

6-2 16方位の風向下での結果(各部屋別)

図11、12に16方位の風向下での各ケースの PFR/V_p 、運動エネルギーの結果を部屋別にそれぞれ示す。いずれの部屋においても直接外部風が流入する方位において PFR/V_p 、運動エネルギー共に高い傾向にある。各部屋、全風向においてCase4はCase1より PFR/V_p 、運動エネルギー共にかなり小さい値であり、本来の伝統的民家(旧与那国家に対応)と比較すると改修が施された現状の民家(民家A及びBに対応)における通風性能の低さが確認できる。日中における主な居住空間である部屋1においては、Case1の場合、夏季の卓越風向である南風向時に PFR/V_p 、運動エネルギー共に大きくなる。特に体感温度の低下能力を表す運動エネルギーに関しては、E~WSWの広範囲の風向に対して大きな値を取る。

6-3 16方位の風向下での結果(民家全体)

図13に民家全体における PFR/V_p 、運動エネルギーの算出結果を示す。全ケースにおいて PFR/V_p 、運動エネルギー共に南~東よりの風向に対して大きな値となっていることが確認でき、特にCase1においてこの傾向が顕著となる。南~東よりの風向に対して通風性能が高くなる理由としては、開口部の設置位置や台所棟であるトーラを西側に配している点等が考えられる。竹富島では年間を通して東よりの風が多く、特に夏季、中間期においては東~南の風向が多くなる¹¹⁾。従って、竹富島における伝統的民家は、夏季、中間期においてより室内に風を導き入れるような造りとなっているものと推察される。しかし、現状ではアルミサッシの設置や腰壁による開口部の縮小等、建築様式にも変化がみられ、これに伴い室内通風性能も大きく低下しているものと思われる。Case1とCase4で比較すると、全風向を通じて PFR/V_p は25%程度、運動エネルギーに関しては50%程度にまで大きく低下している(南風向時と同様)。また室内の SET^* に換算すると、Case4では室内通風性能の低下に伴い、Case1と比較して SET^* が1℃程度高くなる^{注11)}。4-1の民家内の SET^* の実測結果(旧与那国家と民家Aの SET^*

図10 解析結果(夏季卓越風向の南風向時)

の差異)と比較すると、民家Aでは窓開放時の開口面積はCase4よりも小さく、家具等の設置による圧力損失も大きいため、室内風速はより小さいものと推察される。図5に示す通り、旧与那国家に対する民

家 A の室内風速は 2 割程度であり、CFD 解析結果 (Case1 と Case4 の比較) よりも差が顕著となっている。このため、CFD 解析より推定した通風性能の低下による SET* の上昇率は、実測結果と比較して若干低くなる傾向にあるが、概ね対応するものである。

図 11 各室における PFR/V_p [回/h]

図 12 各室における運動エネルギー KE [m²/s²]

1) PFR/V_p [回/h] 2) 運動エネルギー [m²/s²]

図 13 室内空間全体における PFR/V_p [回/h]、
運動エネルギー KE [m²/s²]

7. 結論

本研究では、八重山群竹富集落における伝統的民家の室内温熱環境の比較実測及び民家内の室内通風性状に関する CFD 解析により以下の知見が得られた。

- 1) 伝統的な民家形態を残す旧与那国家において伝統的な住まい方（日中開放、夜間閉鎖）を再現した場合、改修等の施された現状の民家と比較して日中の SET* が 2℃ほど低くなった。現状の民家 A において、同様な住まい方を再現しても、改修により開口面積が半減している等の理由により十分な室内風速が得られておらず、開口部を閉鎖している民家 B と日中の SET* に殆ど差がない。また体感温度の低下には室内風速の寄与が最も大きい。
- 2) 全ての民家において夜間開口部を閉鎖した状況では、旧与那国家の場合、他の民家と比較して建具の気密性能が低く夜間の換気量も多いものと推察され、また内部発熱量も殆どないため、SET* は夜間においても 1~2℃程度低くなる。夜間の開口部の開放による積極的な外気導入によって更なる室内温度の低下が期待できる。
- 3) CFD 解析によると現状の民家は、アルミサッシや腰壁の設置に伴い開口面積が半減し、結果的に本来の形状を有する伝統的民家と比較して、全風向を通じて PFR/V_p は 25%程度、運動エネルギー KE に関しては 50%程度にまで大きく低下している可能性が示唆された。室内の SET* に換算すると、この KE の低下は SET* 1℃程度の上昇に相当し、4-1 の民家内の SET* の実測結果 (旧与那国家と民家 A の SET* の差異) と比較するとその上昇率は若干小さいが、概ね対応するものである。KE の低下には、特に腰壁よりもアルミサッシの設置による影響が大きいものと推察された。
- 4) 竹富島における伝統的民家は、夏季、中間期における卓越風向である東～南の風向に対して室内へより風を取り入れる建築形態であることが確認できた。
- 5) 実測及び CFD 解析より、本来開放的であった伝統的民家の殆どは、改修や生活様式の変化に伴い通風性能が低下し、結果として居住者の温冷感に大きく影響していると考えられる^{注 12)}。

なお、今回の CFD 解析では民家単体のみを対象としており、石垣、ヒンブン、フクギ、周辺建物等の影響を考慮していない。今後の検討課題として位置づけている。

謝辞

本研究において実測調査に快く了承して頂いた各民家の皆様及び竹富町教育委員会の関係者の方々に深く感謝する。本研究の一部は、住友財団 2008 年度環境研究助成を受けて行ったものである。

注

注 1) 前回の測定¹⁾では、複数の民家内の温熱環境 4 要素の測定を行い SET* の算出を試みたが、全ての民家で同時測定を行っていないため、屋外環境の差異の影響が懸念された。今回の実測では全ての民家で同時測定を行い、同一屋外環境下での各民家の室内温熱環境の比較を行っている。

注 2) 今回の実測で別途、民家の居住者に対して住まい方に関するヒアリング調査を行っており、竹富集落では日中は砂埃の侵入を避けて開口部を閉じる民家が多いことを確認している。砂埃による被害は、観光地化の進展に伴い、人通りが増加したことや車等の使用により引き起こされているものと考えられる。また本来の伝統的な民家では、室内への通風に配慮して、フクギの下枝を払っていたが、近年はそういった民家は殆ど見られない。

注 3) 本来の伝統的民家は、トーラが別棟で設けられていたため、人以外の内部発熱は殆ど無かったものと推察される。発熱源としての居住者の有無が室

内温熱環境へ与える影響は小さいものと考えられるため、居住者のいない旧与那国家では本来の伝統的民家に近い室内温熱環境を再現できているものと推察される。

注 4) 9/3 の日中も閉鎖した状態で測定を行う予定であったが、管理の都合上、一部開放せざるを得なかった。

注 5) 温熱環境評価指標 SET*は、暑暖域において湿度の影響を過大評価する傾向にあり、特に高湿度環境下では SET*が実際の温冷感よりも高く算出される可能性がある。

注 6) 民家 A、B 共に一般家庭と比較して家電製品も少なく、その利用頻度も低い。特に民家 B に関しては、内部発熱として考えられる家電製品としては冷蔵庫と照明機器程度であるが、換気・通風を殆ど行わないため、室温と SET*は他の民家と比較して高くなる傾向にある。

注 7) 平均放射温度に関しては、前報 (その 1) ¹⁾ 同様の傾向が確認できたため、本報では省略する。

注 8) 平均値、変動幅の算出に当たっては、民家 A にて冷房を行っていた 20:00～24:00 のデータを除いている。民家 A では、冷房の使用時間も短く (入眠時のみ)、また建物の熱容量も小さく、気密性能も低いため、冷房による室内 SET*への影響は概ね冷房使用時のみに限定されるものと推察される。

注 9) 外気温度には旧与那国家民家の敷地内で測定した温度データを用いた。

注 10) 戦前から現在に至るまで裏座は就寝のための空間として利用されているが、竹富集落では夜間開口部を閉鎖する住まい方が一般的であるため、裏座への通風性能はあまり重視されていないものと思われる。

注 11) 4-1 にて示した実測と同条件の着衣量 (0.5clo) 及び代謝量 (1.0met) 並びに 9/6 の日中 (6:00～18:00) の旧与那国家の平均的な室内の温度 (30.3℃)、湿度 (67.8%)、平均放射温度 (31.1℃)、風速 (0.27m/s) を用いて算出した SET*が Case1 に対応するものと仮定し、Case4 では室内風速のみ Case1 の 0.7 倍 (運動エネルギー KE の低減割合に対応) として算出した。

注 12) 居住環境の水準が向上した現在、防犯性能が低い等の問題を有する伝統的民家をそのまま普及させることは難しく、現状の民家の改修や生活様式の変化は否定されるべきものではない。この点は、問題点を克服しうる新しい民家のあり方 (すまい方も含む) を模索する、もしくは伝統的民家を要素技術に還元し、現代建築に活用する方法等を模索する必要がある。

参考文献

- 1) 井上大嗣, 白石靖幸, 郷田桃代: 集落・民家スケールの暑熱環境緩和・防風効果, 一八重山郡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) ー, 日本建築学会環境系論文集, NO. 638, pp. 465-472, 2009. 4
- 2) 辻幸伸, 小玉祐一郎, 武政孝治: 伝統的民家にみられる室内熱環境調整機能の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 445-446, 1995.
- 3) 細江いずみ他: ヴァナキュラー建築の環境工学的研究 (その 1), 連成数値解析によるイグルーの屋内温熱環境評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 565-566, 2005.
- 4) 山中剛他: 現地実測と CFD 解析によるインドネシアの高床式住居の屋内温熱環境評価, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, 材料・施工・構造・防火・環境工学 (79), pp. 753-756, 2009.
- 5) 観光資源保護財団: 竹富島の民家と集落 観光保全と観光活動に関する報告, 日本ナショナルトラスト, 1976.
- 6) Kato M. and Launder B.E.: “The modeling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders”, Ninth symposium on turbulent shear flows, 10-4, 1993.
- 7) 村上周三他: トレーサーガス法を利用した住宅の自然通風に関する風洞実験 ガイドペーン, パルコニー, 室内外障害物等が通風に及ぼす影響に関する検討, 日本風工学会誌, NO. 33, pp. 1-8, 1987.
- 8) ト震他: 通風換気性能に関する超過確率に基づく風環境評価法の提案とその空堀モデルへの適用, 市街地の風環境に関する研究 (その 1), 日本建築学会環境系論文集, NO. 629, pp. 903-910, 2008. 7
- 9) 村上周三他: k-ε モデルにおける建物風上の k の過大評価モデルの改良, 第 10 回風工学シンポジウム論文報告集, pp. 199-204, 1988.
- 10) 斎藤輝二, 横田望: 住宅・居住様式の研究 8-2, (2) 竹富島・トウラ分棟型住宅の居住様式, 日本建築学会大会学術講演梗概集 E, pp. 1227-1228, 1993.

11) 日本建築学会: 拡張アメダス気象データ, 2000.

12) 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, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 48 号 環境系, pp. 125-128, 2009.

13) 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 4) CFD 解析による伝統的民家の室内通風性状の評価, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 48 号 環境系, pp. 129-132, 2009.

(2010年2月3日原稿受理, 2010年10月29日採用決定)