

# 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

2007064004 井上大嗣

白石研究室

Recently, passive environmental control method is revalued on account of the consideration to saving energy. In particular, many kinds of passive environmental control methods can be found in hot humid region, and these methods also have many possibilities of being applicable to modern Architecture. The purpose of this study is to clarify the effect of the passive environmental control methods in the traditional vernacular of Taketomi Island, a small village in Japan. It was found from the result that the performance of windbreaks is excellent and village characteristics, such as white sand alley and coral stone walls have thermal environmental relaxation. In addition, the installation and use frequency, etc of air-conditioning in residential houses became clear.

パッシブ環境制御, 温熱環境, 防風, 竹富島, 実測調査, CFD 解析

## 1. はじめに

近年、省エネに対する意識の高まりから、パッシブ的な環境制御手法が見直されつつある。特に蒸暑地域では夏季の蒸し暑さを凌ぐための工夫が数多く見られ、現代建築における要素技術の開発において学ぶべきところは多い。日本国内においてとりわけ、年間を通じて長期間蒸暑な気候を呈する地域として、沖縄本島を含む南西諸島が考えられる。これらの地域では、アマハジなどの蒸暑地域に適した伝統的な環境制御技術が数多く見受けられるが、集落や民家レベルで伝統的な建築形態を残しているものは稀である。南西諸島の伝統的な街並み、民家を残している例としては、八重山郡の竹富集落が知られている(図 1)。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、更には住まい手側の工夫等による暑熱環境の緩和と防風効果を解明することを目的とする。集落の景観要素である珊瑚の石垣、白砂の路地の暑熱環境緩和効果、集落を囲む防風林の防風効果、並びに伝統的民家における室内温熱環境については夏季の実測調査により評価を行う。民家内の通風性状及び屋敷林(フクギ)の防風効果については CFD 解析により検討する。加えて、集落内の居住者を対象としてヒアリング調査を行い、冷房普及・利用状況及び住民の環境適応行動等の実態についても明らかにする。

## 2. 対象地域概要

竹富島の中央に位置する集落域は南北 900m、東西 600m、面積 38.3ha で、その全域がそのまま伝統的建造物群保存地区に指定されている。集落内の民家は石垣で敷地を囲い、路面はほぼ全域でサンゴの白砂が敷かれており、アスファルトやコンクリート舗装の路地は少ない。集落周囲には幅 20~200m の防風林が途切れることなく植えられている。竹富島の伝統的な民家は、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り、

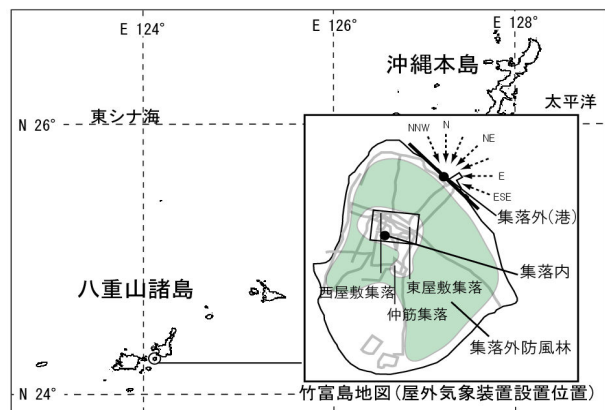


図 1 竹富島位置

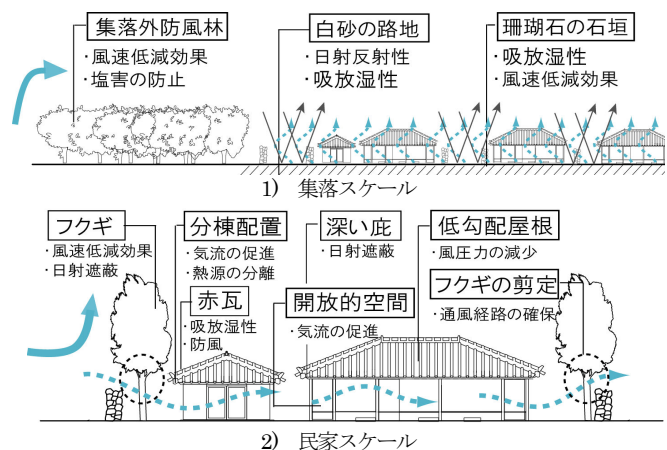


図 2 竹富集落におけるパッシブ環境制御技術とその効果

母屋正面には深く低いアマハジ空間がつくられている。屋敷内には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。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、台風への防衛、防犯性、冷房の使用等の面から現在ではほぼ全民家においてガラス戸が設置されている。さらに開口部の縮小等もみられ、本来開放的な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。竹富集落にみ

られるパッシブ環境制御技術を集落・民家スケールに分けて図2に示す。これらは集落景観要素や民家の特徴であると同時に、防風・暑熱環境緩和に効果を発揮していると推察される。

### 3. 屋外温熱・風環境実測及び室内温熱環境実測

#### 3.1 実測概要

表1に示す計測器を用いて、屋外環境(温湿度、日射量、風向風速、短波長及び長波長放射量、熱画像)及び民家内の温熱環境(温湿度、グローブ温度、風速)の測定を行った。集落周囲の防風林の防風効果については、図1に示す通り集落内外の2地点に屋外気象装置を設置して風向風速測定を行い評価する。集落内の屋外温熱環境については熱画像撮影、短波長及び長波長放射量の測定及びMRTの算出により白砂の路地、珊瑚の石垣の暑熱環境緩和効果について評価する。比較のため、アスファルト、コンクリート舗装の路地、緑地及びコンクリート壁の測定を行う。民家内温熱環境については、集落内の3軒を対象とし(図3)、各部屋における温湿度測定及びSET\*の算出により評価を行う。民家A,Bはアルミサッシ等の改修がなされており、民家Cは本来の伝統的様式をそのまま残す民家である。民家Aは日中のみ開口部の開放を行い、民家Bは終日開口部を閉じた状態である。民家Cにおいては図7中に示す開閉スケジュールで測定を行った。開放度の異なる3軒を対象とすることで、通風性能が室内温熱環境に及ぼす影響を検討する。

#### 3.2 実測結果

集落内外の2地点での風向・風速の測定結果を図4-1)に示す。時間帯によって集落内外の風速差にばらつきがみられるが、これは図1に示す通り、集落外の屋外気象装置設置位置の南西側に防風林があるため、南西よりの風の場合、この防風林の影響を強く受けているものと考えられる。従って集落外の風速測定において防風林の影響を受けないと思われるNWW~ESEの風向(図1)のみ測定結果を抽出し図4-2)に度数分布として示す。これによると集落外風速は2~6m/sで分布しているのに対し、集落内風速は2m/s以下で分布しており、集落を囲む防風林の風速低減効果が確認できる。竹富集落では集落全体が防風林に囲まれているため(図1)、他の風向に対しても同様の防風効果が期待できるものと推察される。

図5に3時間毎に撮影した熱画像データより算出した路面温度及び壁面温度の相関図をそれぞれ示す。石垣の壁面温度はコンクリート壁と比較して3~13℃程度、白砂の路面温度はアスファルト、コンクリート舗装より2~8℃程度低い傾向にある。石垣、白砂路面の表面温度が低い理由としては、材料である珊瑚石、白砂が保水性・透水性を有し放熱性が高いためと考えられる。白砂の路地においては、これに加えて日射反射性が高いことも理由として考えられる。図6に6方向の短波長及び長波長放射量の測定結果より算出したMRTの相関図を日中・夜間に分けてそれぞれ示す。日中・夜間問わず、白砂に対してアスファルト、コンクリート舗装のMRTは高く、緑地は若干低い傾向にあ

表1 測定項目及び使用計測器

測定項目		計測器
屋外環境	屋外気象測定 (温湿度、日射量、風向風速、雨量、気圧)	屋外気象観測装置 Weather station Vantage Pro Davis
	短波長及び長波長放射量測定	4成分放射計支計 CNR1 Kipp&Zonen
	熱画像撮影	携帯用小型熱画像カメラ サーマビジョン CP-2500 チノー
室内環境	温湿度	温度データロガー TR-52, RTR-52 T and D
	温熱環境4要素 (温度、湿度、風速、グローブ温度)	アメニティメータ AM-101 京都電子工業

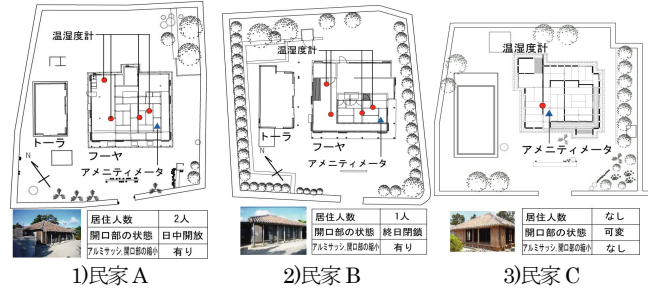


図3 測定対象民家

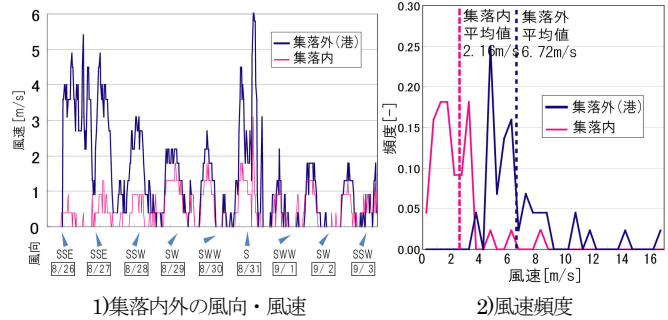


図4 風速測定結果

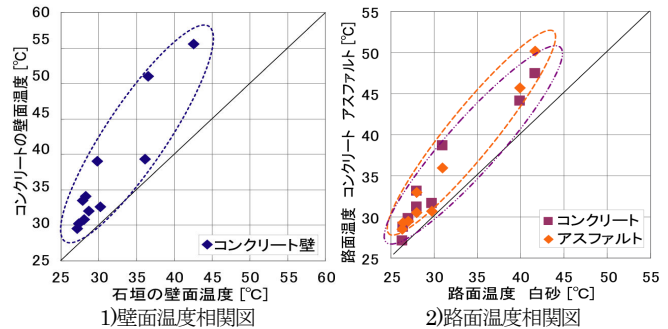


図5 熱画像測定結果

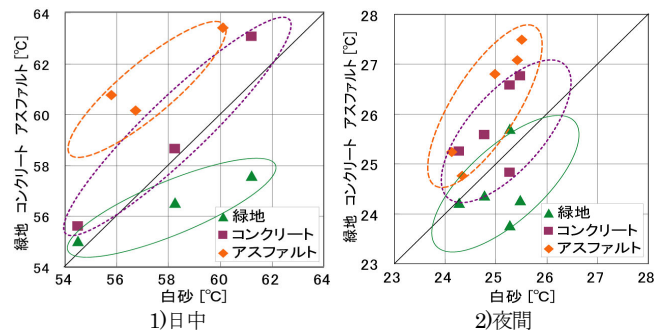


図6 路地空間MRT相関図

る。アスファルトは白砂と比較して日中最大で約5℃、夜間最大で2℃高く、コンクリートの場合は日中最大で約2℃、夜間で1℃高い結果となった。白砂の路面はコンクリート、アスファルト舗装の路面に比べて反射率が高く短波長放射

量は若干大きいですが、路面温度が低いと長波長放射量が小さく、結果として MRT ではアスファルト、コンクリートより低くなる傾向にあると言える。熱画像、短波長及び長波長放射測定結果より、竹富集落に見られる白砂の路地や珊瑚の石垣が景観的に調和しているだけでなく、屋外温熱環境の面でも一般的な舗装と比較して歩行者の熱的ストレスを低減させる効果が期待できるものと推察される。

図7に各民家内温度、SET\*の平均値及び変動幅を示す。終日開口部を閉じている民家Bは他の民家と比較して温度、SET\*共に高い傾向にある。特にSET\*が高い値を示しており、これは室内風速が小さいためと考えられる。日中開口部を開放している民家AではSET\*平均値において民家Bより1.5°C程度低い値であるが、曇天時においても27~31°Cの変動となっており、良好な室内環境とは言い難い。民家Cは9/4において民家Aと同様日中開放であったが、室内温度、SET\*共に民家Aより低い値となっている。特に終日開放であった9/6では他の民家より温度、SET\*共に2~3°C程度低い値を示しており、室内における風通しが室内温熱環境に大きく寄与していることが確認できる。

#### 4. CFD解析による伝統的民家の室内通風性状の把握及び防風効果の検討

##### 4.1 開口部の開放度が室内通風性状に与える影響(解析1)

1)概要 現状の民家では、ガラスサッシの設置や開口部の縮小により室内通風性状は、本来の建築様式の民家より劣っているものと考えられる。ここでは、CFD解析により本来の伝統的民家(ケース1)及び現状の改修(ガラスサッシ、開口部の縮小)が施されている民家(ケース2)の通風性状を再現し、比較・検討を行う。解析モデルを図8に示す。室内通風性状の評価に際しては、PFR/Vp(局所排出換気回数)及び運動エネルギーのそれぞれの算出を行う。解析条件を表2に示す。解析は各ケース16方位にて行う。

2)解析結果 図9に室内通風性状の解析結果を示す。両ケースにてPFR/Vp、運動エネルギー共に南~東よりの風向に対して大きくなることを確認でき、特にケース1においてこの傾向が大きい。竹富島では夏季、中間期においては東~南の風向が多く、冬季では北よりの風となる頻度が高い。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通風性能が高く、冬季においては北風を低減する様な造りとなっていると推察される。しかし、現状においてはアルミサッシの設置や腰壁による開口部の縮小等に変化がみられ、ケース2の結果が示す様に室内通風性能も大きく低下しているものと考えられる。

##### 4.2 敷地内のフクギ、石垣の防風効果(解析2)

1)概要 実測においては、集落周囲の防風林の効果を示したが、集落内のフクギ、石垣の防風効果については明らかではない。従ってCFD解析によりフクギ、石垣の防風効果について検討を行う。図10に示す通り解析対象民家の周囲の再現を行い、石垣、フクギを考慮したケース1とフクギのみを考慮したケース2、石垣のみを考慮したケース3、石垣、フクギを考慮しないケース4において、それぞ

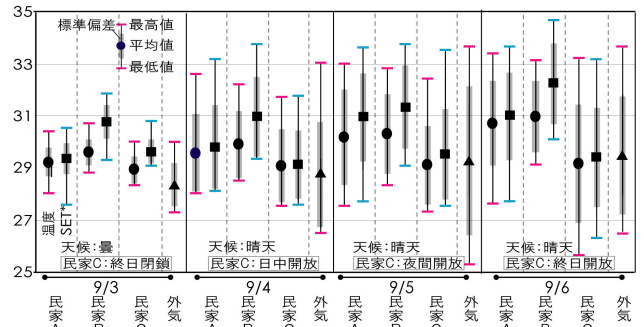


図7 室内温熱環境測定結果

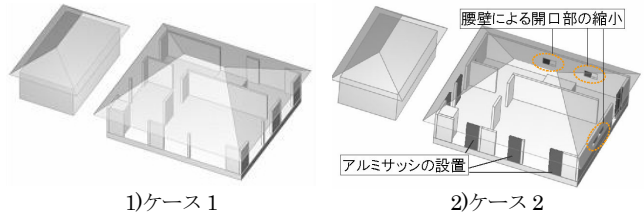


図8 解析モデル(解析1 室内通風性状評価)

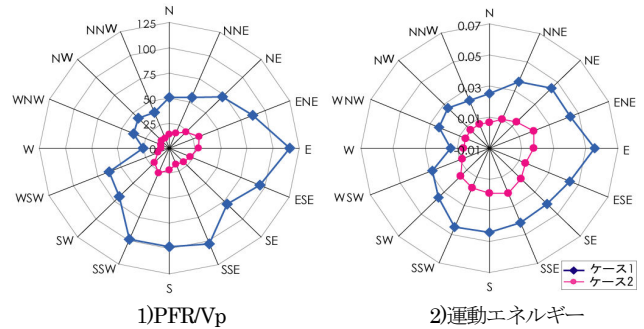


図9 室内通風性状の解析結果

表2 解析条件

	解析1	解析2
解析領域	100m×100m×30m	300m×300m×50m
流入境界	$U = U_d (Z/Z_0)^{1/4}$ $\epsilon = C_{\mu} k_{in}^{1.5} U_d / 4 (C_{\mu} k_{in}^{0.5}) Z_0^{0.25} Z^{0.75}$ $U_d = 0.45, Z_0 = 2.5$ (実測値の平均値) kは風洞実験値	
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	
メッシュ分割	151(x)×115(y)×63(z)	155(x)×163(y)×33(z)
その他	民家内領域において汚染物質を1.0kg/m³sで一様発生させ定常濃度分布を算出	敷地内における屋敷林(フクギ)を樹木モデルによって再現

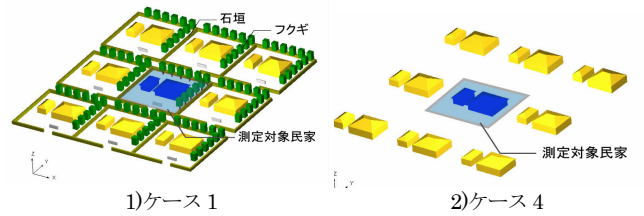


図10 解析モデル(解析2 防風性能評価)

れ屋根面の風圧係数分布を算出し比較を行う。解析条件を表2に示す。解析は各ケース16方位にて行う。2)解析結果 図11に風圧係数分布の解析結果を示す。1)では屋根面における負圧の最大値を各ケース16方位にて比較している。これより、フクギを考慮しているケース1、2がフクギを考慮しないケース3、4と比較して、屋根面における風圧係数(負圧)の最大値が1/2以下となっており、フクギの防風効果が高いことが確認できる。ケース1、2



間及びケース 3、4 間での差は小さく、石垣の防風効果は小さいと言える。N,E,S,W の方位に対しては、全ケースにて風圧係数(負圧)が小さい傾向にあるが、これは、周辺民家の影響である。2)には風向 NW の場合の表面風圧係数分布を示す。風下側の屋根面頂上部から隅棟部にかけて風圧係数が負の大きな値となり、台風による屋根部位の損傷部分と一致している(図 11-3)。他の方位においても風圧係数分布は類似した傾向となった。

## 5. ヒアリング調査による冷房設置状況、利用状況調査

### 5.1 調査概要

集落内の居住者を対象としてヒアリング調査を行い、冷房普及・利用状況及び環境適応行動等の実態について検討を行う。ヒアリング調査は観光業を営んでいない世帯を対象とした。ヒアリング調査が実施できない民家に対しては目視によりエアコンの有無のみの確認を行った。ヒアリング調査を実施した民家に対しては、冷房利用状況(使用頻度、利用期間・時間帯等)の冷房に関する詳細な質問を行った。これとは別に夏季における環境適応行動(防暑行動)の調査、冷房に対する意識調査及び住居に対する満足度の調査も平行して行っている。調査対象民家 94 軒に対し、43 軒のヒアリング調査を実施した。

### 5.2 調査結果

図 12 に冷房利用状況の調査結果を示す。1)冷房設置状況では 94 軒中 67 軒において冷房の設置が確認できた(目視による確認)。今回の結果では冷房普及率は 7 割程度である。ヒアリング調査を実施した民家においては、2)冷房使用時間帯に示す通り夜間の使用がかなり多いことが確認できる。冷房使用頻度では夏季において「ほぼ毎日」利用している世帯は 26%であるのに対し、「ほとんど使用しない」、「来客時のみ」等使用頻度の低い世帯も 26%程度見られた。住まいにおける温熱環境面の満足度調査においては満足側の意見が多い結果となった。防風面の満足度においては「非常に満足」、「非常に不満足」、「どちらでもない」の3つの割合が高い。「非常に満足」の意見の民家は RC 造である割合が高く、「非常に不満足」の意見は木造である割合が高い傾向にあった。その他の集計結果については本論中に示す。図 13 には屋内、屋外における環境適応行動(防暑行動)の調査結果について示す。屋外では、長袖、帽子等による日射遮蔽、水分の補給を行っている割合が高く、屋内においては、開口部の開放、扇風機の使用、水分の補給を行っている割合が高い。屋外、屋内双方において水分の補給が高い割合を示しており、積極的に水分を取り潜熱放散を促進させることで暑さを凌いでいると考えられる。

## 6. まとめ

竹富島におけるパッシブ環境制御手法について夏季実測、CFD 解析及びヒアリング調査より評価・検討を行い、以下の知見が得られた。

1)竹富集落は集落外防風林、屋敷林による 2 重構造により高い防風性能を持つ。特に屋敷林は屋根面での風圧低減に大きく寄与している。

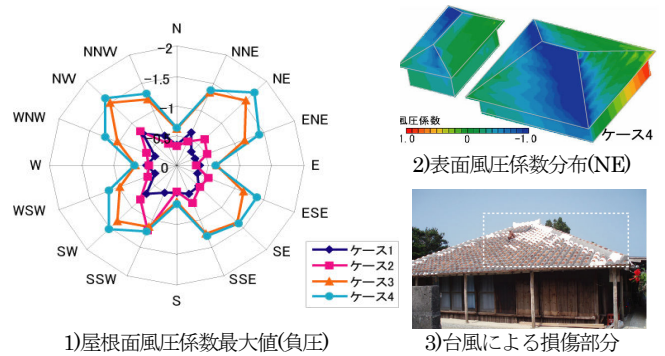


図 11 屋根面風圧係数の解析結果

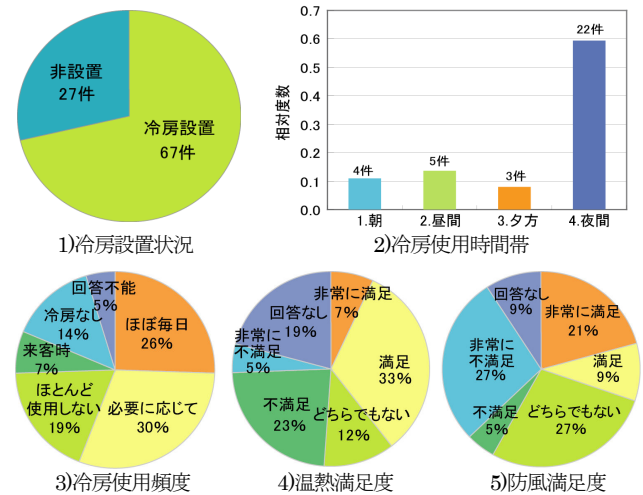
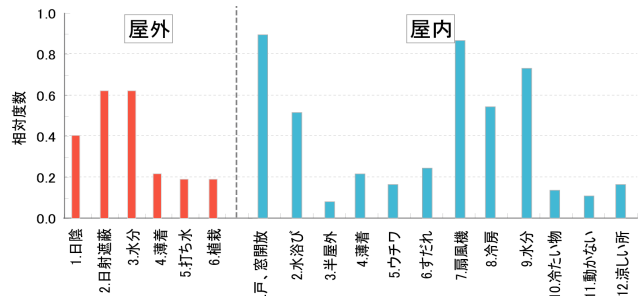


図 12 冷房利用状況調査結果



2)白砂の路地や珊瑚の石垣は景観的に調和しているだけでなく、屋外温熱環境の面でも歩行者の熱的ストレスを低減させる効果が期待できる。

3)本来の伝統的民家は夏季、中間期の卓越風向である南～東よりの風に対して通風性能が高くなる造りである。しかし、現在では改修や生活様式の変化に伴い通風性能が低下し、結果として室内温熱環境の悪化に影響している。

4)竹富集落においては、冷房普及度は 7 割程度であるが利用頻度は低く、利用者においては夜間の使用が多い。防暑行動としては屋外、屋内共に水分の補給の割合が高く、積極的に水分を取り潜熱放散を促進させることで暑さを凌いでいると考えられる。

5)竹富集落・民家においては防風、通風及び日射の制御、素材による潜熱コントロール等多様なパッシブ環境制御技術が見られ、これらは蒸暑地域の近代建築への様々な適応の可能性を有するものと考えられる。