

赤瓦の断熱特性の測定に関する研究

中村英二郎

本研究では、県産赤瓦の断熱特性を測定するために約2坪の小屋を4棟設置して、気温、降水量、日射量、小屋内部及び表面の温度測定を行った。また、ハロゲンランプを用いた室内実験での温度測定、およびCAEを用いた温度計算により赤瓦の温熱特性評価を併せて行った。

その結果、コンクリート屋根では断熱瓦を設置することで、小屋天井温度がコンクリートのみと比較して最高温度で約10℃の温度差が認められた。また、室内実験における断熱効果測定では、恒温状態の熱流束値の比較が可能であった。また、CAEにより室内実験の結果を基にシミュレーションで熱流束を求めることは可能であった。

1 緒言

沖縄県内において、木造住宅を前提とした赤瓦またはコンクリート瓦を漆喰で固めた工法が戦後から行われていたが、台風と白蟻による被害から近年コンクリート住宅が急速に普及している。また、最近では景観に対する関心の高さから、コンクリート屋根に赤瓦を葺く建造物が見受けられるようになった。赤瓦は沖縄の文化に根ざしており、潜在的に大きな需要があると思われるが、赤瓦の生産額は近年漸減傾向である。

鉄筋コンクリートの住宅を建てる際に赤瓦を載せたい施主は多いが、コンクリート屋根のみで風雨を防げることから赤瓦施工を断念している場合が多い。そこで、景観性の他、断熱性を付与できる屋根材を供給する事が可能になれば普及促進につながるものと考え。地球温暖化防止の観点からも、できるだけエネルギーを消費する冷房設備を使用しない住環境にすることが求められている。そこで、実際の赤瓦の断熱効果を定量的に評価するための測定を行った。これにより、赤瓦促進をはかり、今後更に断熱効果の高い赤瓦製品開発を目指す。今回は沖縄県赤瓦事業協同組合と産官連携して研究を行った。

2 実験方法

2-1 小屋を用いた温度測定

赤瓦の断熱特性測定のため、平成14年度に沖縄職業能力開発大学校（以下、ポリテクカレッジ）において作られた小屋を、平成17年に工業技術センターに移設して温度測定を行った。切妻屋根2棟、陸屋根2棟の合計4棟用意し、屋根には在来瓦、新瓦（波瓦）、断熱瓦、温度比較のための何も葺かないコンクリート陸屋根を準備し、熱電対(T)を設置して屋根材表面温度、屋根材裏面温度、室内天井温度、室内温度の測定を行った。

ポリテクカレッジにおいて作られた小屋は、ブロック

を土台とした木造構造であり、壁面よりの熱の流入を小さくするため、30mm厚の発泡ウレタンと、壁の外側のベニヤ板をうかせた形で施工し断熱とした。それぞれの小屋の特徴をまとめたものを表1に示す。また、小屋の配置図を図1に、小屋図面を図2に、小屋外観を図3にそれぞれ示す。

表1 測定小屋条件一覧

	A	B	C	D
小屋の構造	木造	木造	木造	木造
土台	ブロック	ブロック	ブロック	ブロック
屋根の構造	木造 切妻屋根 在来瓦	木造 切妻屋根 新瓦(波瓦)	木造 PC 陸屋根 瓦なし	木造 PC 陸屋根 断熱瓦
壁面	断熱構造	断熱構造	断熱構造	断熱構造
床面	ベニヤ板	ベニヤ板	ベニヤ板	ベニヤ板
窓	なし	なし	なし	なし
戸	北側1カ所	北側1カ所	北側1カ所	北側1カ所

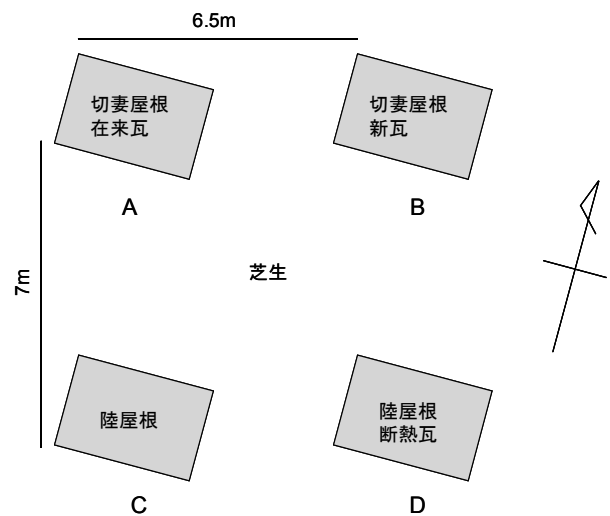


図1 測定小屋配置図

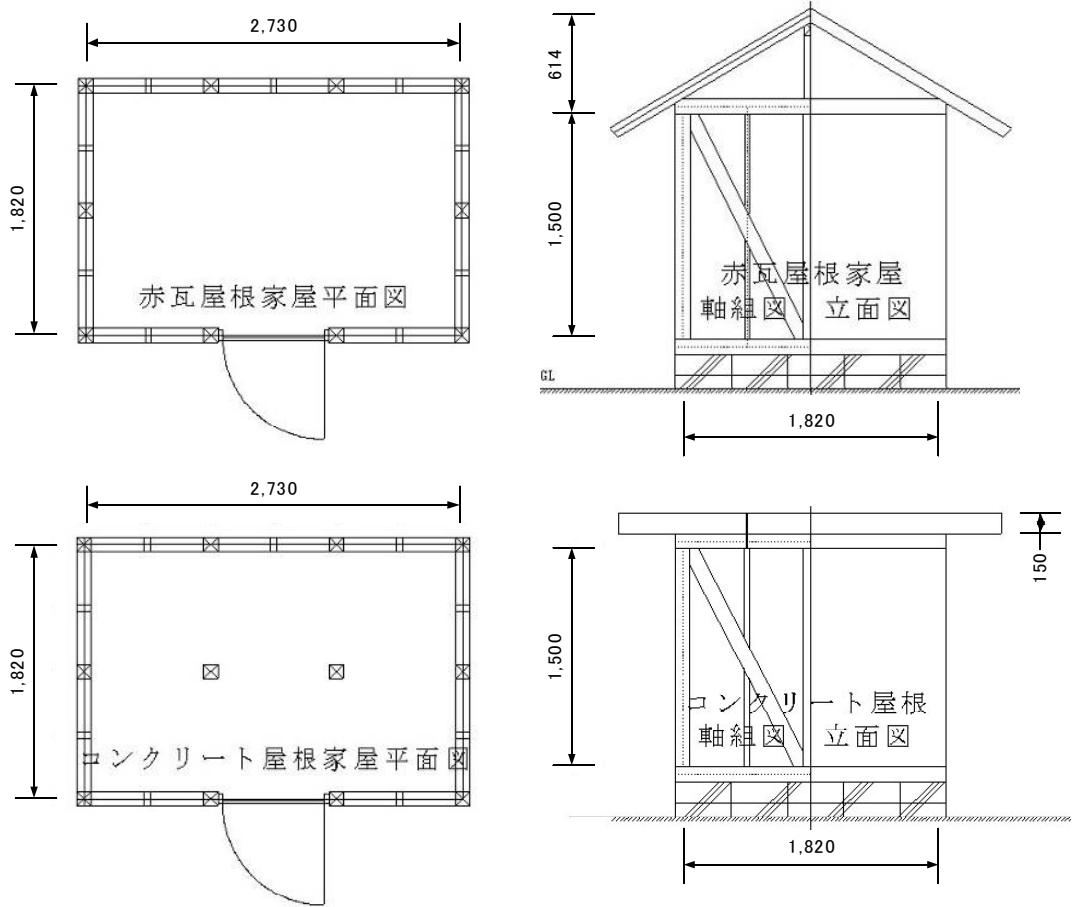


図2 測定小屋配置図



A (北面)



B (南面)



C (北面)



D (南面)

図3 測定小屋外観 (A:在来瓦、B:新瓦(波瓦)、C:瓦なし、D:断熱瓦)

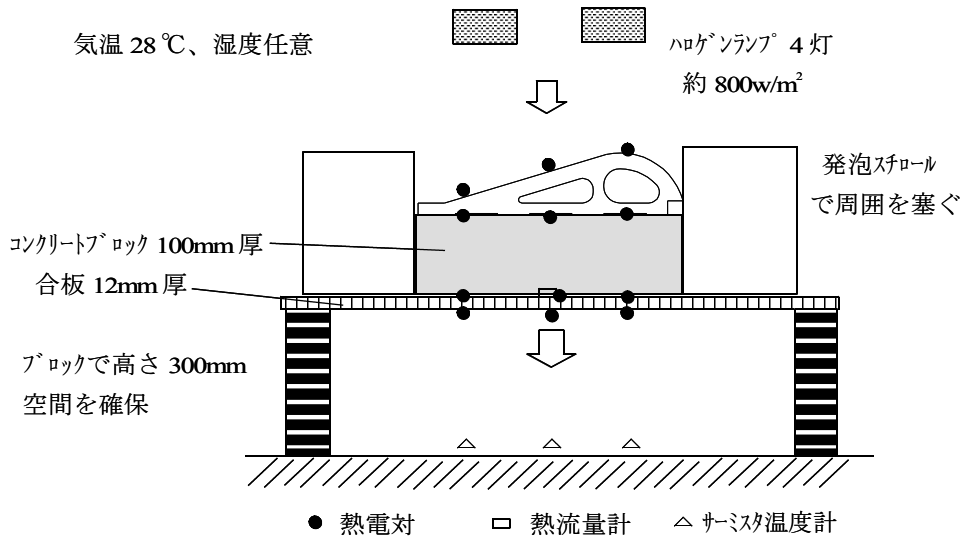


図4 実験室での温度測定装置

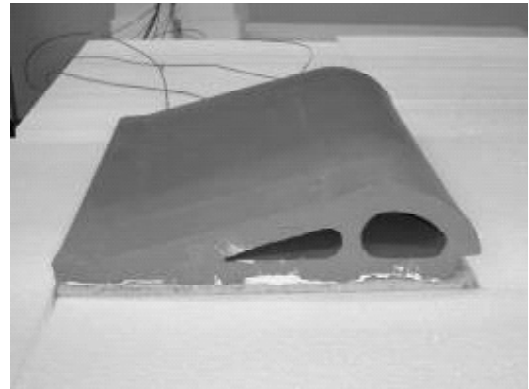
温度測定は、温度範囲が 10～70℃程度になると予想されたため、ビニール被覆のT熱電対を適切な長さに切断し、スポットウェルダを用いて先端をスポット溶接した。熱電対先端よりデータロガー（日置電機製、8421-50 メモリハイログャー）までは、10～30mの距離があるため、ビニール被覆の補償導線（1.25mm²）を用いて接続した。

温度測定のためT熱電対は、屋根材表面、屋根材裏面、室内天井、室内中心部（床から1mの高さ）にそれぞれ設置した。屋根材表面は、在来瓦では南面屋根中央部の雄瓦山部の中心に、波瓦でも南面屋根中央部瓦の山部の中心に、コンクリート屋根は中央部に、断熱瓦は屋根面中央部の瓦の丸部中央に、エポキシ接着剤とシリコンコーキング剤を用いて固定した。屋根材裏面は表面部の反対側にエポキシ接着剤、シリコンコーキング剤を用いて設置した。また、室内天井部は屋根材の熱電対が設置されている天井部にビニールテープを用いて天井に貼り付けを行った。

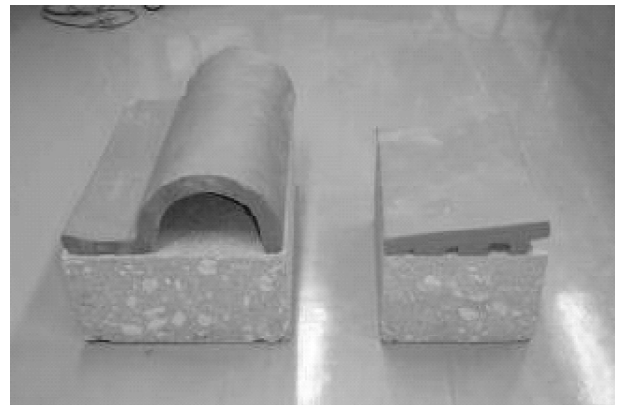
2-2 室内実験での温度測定

測定小屋の温度測定を継続して行ったが、気象条件が一定にならないため、再現性をみるために室内実験による再現性のある温度測定が必要である。また、室内実験での温度測定から、CAE解析を計算するためのパラメータ取得を行った。今後の断熱効果改善および効率的な新製品設計のために、CAEを用いて簡便に断熱特性を評価することは必要不可欠な技術であると考えられる。

室内実験は、ハロゲンランプでの熱源を用いて基礎的な温度データの測定を行った。実験室内を電気ストーブおよびエアコンにより室内温度を約28℃に保ち、500W



a) 新瓦（波瓦）



b) 断熱瓦（左）と重ね瓦（右）

図5 室内実験での温度測定に使用された瓦

ハロゲンランプ4灯を瓦表面で約800W/m²になるように照射することで瓦表面温度を上昇させ、熱電対により温度を、また熱流計により熱流束を測定した。熱電対はカプトンテープにより、熱流計は熱伝導性のシリコングリッドを用いて貼り付けを行った。また、瓦、コンクリートブロックの裏足構造による隙間が生じた場合には、熱伝導性シリコングリッドを用いて接合した。コンクリート

ブロックと合板において隙間が生じた場合にも同様にシリコングリスを用いた。サンプルは横方向に熱が流れていかないように発泡スチロールで周囲を囲い、瓦の空洞部についても出口は発泡スチロールでふたをした状態で、空気の出入りが少なくなるよう設置した。測定装置は、図4に示す。また、瓦面積に切断したコンクリートと実際に温度測定に使用した瓦を図5に示す。

実験室で測定した値は、CAEのシミュレーションで利用した。

3 実験結果と考察

3-1 小屋による温度測定結果

小屋を用いた温度測定は、平成17年10月～平成19年2月まで継続して行った。測定した中で特徴的なデータを示す。

- ① 平成17年10月19日～20日
- ② 平成18年1月6日～7日
- ③ 平成18年6月27日～28日

①測定日 平成17年10月19日～20日

気温は10月19,20日共に29℃まで上昇し、10月中旬であるにも関わらず、夏日であった。太陽光の放射量は午後2時頃最大となり、約900W/m²を記録した。19日に関しては、時間により放射量の落ち込みがあるので、晴れたり曇ったりしていると考ええる。20日は一日中晴天であった。風向風速に関しては、19,20日共に日中は約2.5～3m、夜間は1.5mの北寄りの風が吹いていた。雨は観測されていない。

・切妻屋根（在来瓦、新瓦（波瓦））

在来瓦と新瓦を施工した小屋温度の測定結果を図6に示す。在来瓦と新瓦では、屋根材（瓦）表面温度において同じような温度挙動を示した。これは、材質が赤瓦素地と同じであるため、太陽光エネルギーの吸収も同程度であることが影響していると考ええる。表面温度は、約45℃まで上昇していることが認められた。

小屋天井温度は、新瓦（波瓦）が在来瓦より最高温度で約2℃高い値を示しており、断熱効果では在来瓦のほうが優れているという結果となった。また、温度ピーク時刻は在来瓦のほうが約40分遅れる傾向があった。これは、在来瓦ではイシグ等の材料が多く用いられているために、暖まりにくいことによるものと考ええる。天井温度は、約35℃となっており、瓦を施工することで一定の断熱効果はあると考ええる。

・コンクリート屋根（瓦なし、断熱瓦）

コンクリート屋根を施工した小屋の測定結果を図7に

示す。屋根材表面温度は、断熱瓦のほうが日中早く熱くなり、そして夜になると早く放冷する結果となった。これは、材質が瓦素地とコンクリートと異なるため、熱の吸収率、放射率に違いがあるためと考える。また、断熱瓦は形状的に風を通しやすいことも、放冷に影響を与えたと考える。風向きが北側で、断熱瓦の山部方向と一致したことが、温度を下げた原因の一つであると考ええる。

小屋天井温度は、断熱瓦を設置した方が約5℃低く、瓦を設置することで断熱効果があるものと考ええる。しかし、朝方ではコンクリートのみの方が、温度の低くなることが観測されたので、断熱瓦は断熱材としてはたつき、1日の温度差が小さくなる効果があると考ええる。

②測定日 平成18年1月6日～7日

この測定日は、気温が低いときであり、1月6日に最低気温12.3℃、1月7日に11.6℃を記録した。測定期間をすべて通した中での最低気温は平成17年12月22日の9.1℃であったので、比較的寒い時期であるといえる。1月6日は日射量がほとんどないことから、一日中曇っていたと考えられ、降雨も数回認められた。1月7日は、日射量は多くはなかったが、晴れたり曇ったりで、午後3時にまとまった雨が降った。6,7日ともに日射が少ないので、気温は上がらず、昼でも約14℃までしか上がらなかった。風向風速に関しては、6日の午後から風が強くなり、平均風速で4m/sの風が7日朝方まで吹いた。この後は1～4m/sで変動した。最大瞬間風速は、6日で9.8m/s、7日で11.2m/sを記録しているため、風が強かった日であると考ええる。風向は西北西から北の間で大きな変化はなかった。

・切妻屋根（在来瓦、新瓦（波瓦））

在来瓦と新瓦を施工した小屋温度の測定結果を図8に示す。少し晴れ間のあった1月7日では、新瓦（波瓦）と在来瓦では屋根材表面温度において似たような挙動を示したが、ほとんど晴れ間のなかった1月6日では、新瓦（波瓦）のほうが低い値を示した。これは、在来瓦に存在するイシグの蓄熱が影響しているものと考ええる。小屋天井温度についても、1月6日では屋根材表面温度とほとんど同じで推移している。気温とほぼ同じであり、室内天井最高温度も約14℃であり寒い一日であったといえる。在来瓦と新瓦（波瓦）では、一日の天井温度差が新瓦のほうが大きく、在来瓦の方が小さい結果となった。

・コンクリート屋根（瓦なし、断熱瓦）

コンクリート屋根に施工した小屋温度の測定結果を図

9に示す。1月6日は日射がほとんどなかったため、屋根材表面温度と室内天井温度ともに大きな変化はなかった。断熱瓦とコンクリート屋根でもほとんど温度の差は認められなかった。

1月7日は晴れ間があったため、屋根材表面温度も室内天井温度も上昇した。天井温度の上昇はコンクリート屋根のみのほうが大きく、コンクリート屋根のみと断熱瓦とでは約2℃の差が生じた。ただし、冷めるのも早く19時にはコンクリート屋根のほうが、天井温度が低くなった。夜中になり、強い北風が吹いたりやんだりしており、それに伴い屋根材表面温度が下がったり上がったりする現象が見られた。断熱瓦を施工することにより、冬季でも一日の温度差が小さくなることから、住環境の改善に有効であると考ええる。

③測定日 平成18年6月27日～28日

気温は約32℃まで上昇し、年間を通じて暑い時期である。太陽光の放射量は午後2時頃最大となり、約1000W/m²を記録した。28日は放射量の落ち込みが時間によりあるので、一時的に曇ったと考える。また、27日は、一日中晴天であったと考える。風向風速に関しては、日中は南東の風が約3～4m/s、夜間は無風であった。雨は観測されていない。

・切妻屋根（在来瓦、新瓦（波瓦））

在来瓦と新瓦（波瓦）を施工した小屋温度の測定結果を図10に示す。在来瓦と新瓦（波瓦）では、冬同様、屋根材表面温度において同様の温度挙動を示した。表面温度は、約55℃まで上昇していることが認められた。

小屋天井温度は、新瓦（波瓦）が在来瓦より約2℃高い値を示しており、断熱効果では在来瓦のほうが優れている結果となった。

・コンクリート屋根（瓦なし、断熱瓦）

コンクリート屋根に施工した小屋温度の測定結果を図11に示す。屋根材表面温度については、断熱瓦のほうが早く熱くなり、そして早く冷却する結果となった。これは、材質が瓦素地とコンクリートと異なるため、生じているものと考えられる。

小屋天井温度は、27日には断熱瓦を設置した方が約10℃低く、コンクリートのみの屋根より瓦を設置することで断熱効果があるものと考えられる。しかし、朝方ではコンクリートのみのほうが、温度の低くなることが観測された。従って、断熱瓦を施工することで、他の季節同様、1日の温度差を小さくする効果が望める。

・室内温度比較

今回の測定では、熱電対を屋根材表面、屋根材裏面、室内天井温度、室内中心部に設置したが、室内中心部温度測定結果を表2に示す。測定期間中の暑い時期の室内中心部最高温度である。

小屋内中心部温度に関しては、屋根材以外の部材から熱の流入があるため単純に比較をすることはできないが、このような条件で測定した場合の参考として示す。なお、切妻屋根と陸屋根の小屋では、小屋内部容積が異なるため比較はできない。

切妻屋根では、小屋天井温度同様に在来瓦が若干低い値を示したが、ほぼ同じ断熱効果であると考えられる。

陸屋根同士では、断熱瓦をのせることで約4℃の室内中心部温度差を観測したことから、瓦を施工することで一定の断熱効果があるものと考えられる。しかしながら、約4℃の差というのは、閉め切った温度測定小屋中の差なので、これを実際の住宅に当てはめた場合、必ず温度差が生じることを証明するデータではない。

表2 小屋中心部最高温度(平成18年6月27日)

屋根形状	屋根構造	屋根材の種類	小屋中心部最高温度(℃)
切妻	木造	在来瓦	33.8
		新瓦(波瓦)	34.7
陸屋根	コンクリート	なし	38.1
		断熱瓦	33.8

3-2 室内実験による温度測定結果

温度測定結果の一例を図12に示す。ハロゲンランプを点灯させた後、徐々に温度が上がり約48時間後にほぼ一定の温度となる。恒温状態5時間の温度を平均してそれぞれのポイントの温度としたものを表3に示す。また、恒常状態の温度と熱電対が設置されている部材の熱伝導率から、熱流束が計算可能であり、実際の室内への熱の流入は、実験室での合板の熱流束によって評価できると考えた。また、今回の実験ではコンクリート下面と合板の間に熱流計を設置して直接熱流束の測定を行った。恒常状態の温度からの計算値と熱流計による測定結果を表4に示す。

実験では瓦に対し左、中、右と3カ所に熱電対を設置し、それぞれの箇所での熱流束を求めたが、異なる値となった。これは、ハロゲンランプによる照射が測定面に対して均一にできていないことと、瓦の形状が左右異なることで生じていると考えられる。また、熱流計はコンクリートと合板の間に設置されたため、コンクリートと合板の熱流束の値の間となるのが理想であり、この値に近い熱流束を示した瓦もあったが、合板の熱流束に近い値を示したものが多かった。誤差の生じた原因としては、センサの密着が良好でないための測定誤差と、横方向の周囲へ熱が逃げていることがあげられる。

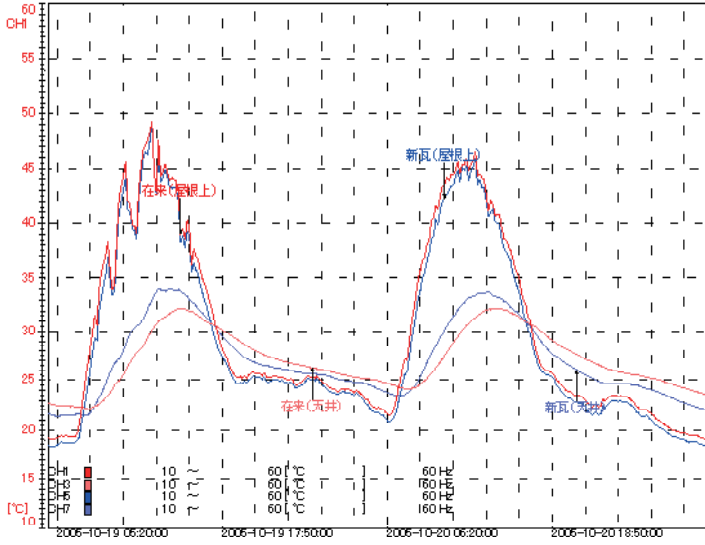


図6 切妻屋根温度測定結果(平成17年6月27日~28日)

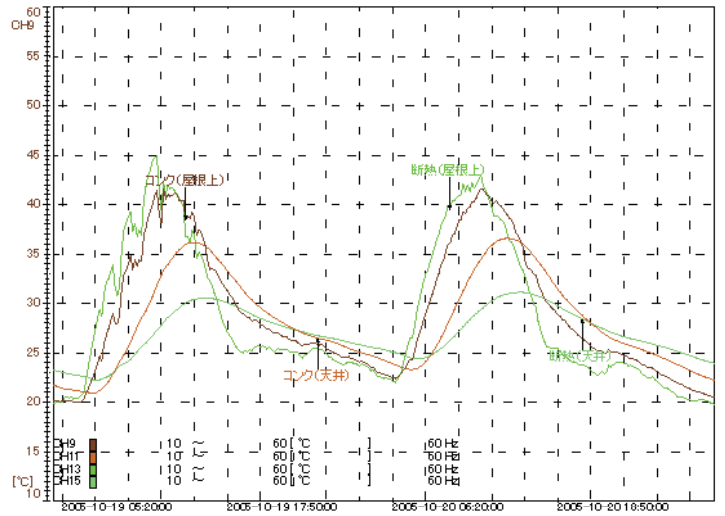


図7 コンクリート屋根温度測定結果(平成17年6月27日~28日)

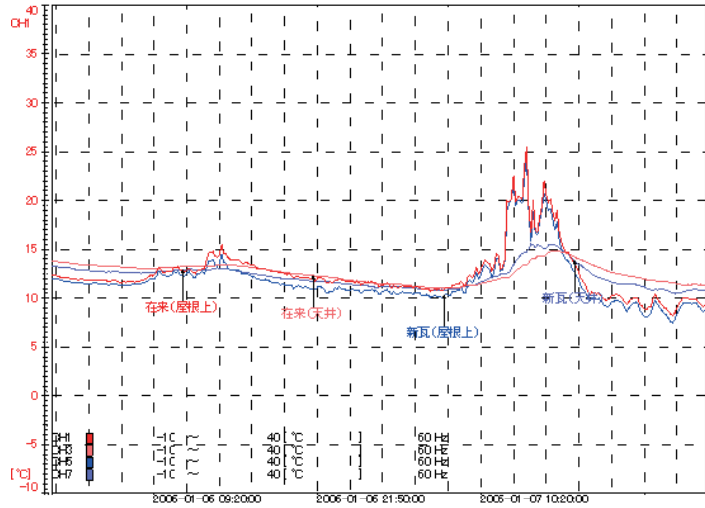


図8 切妻屋根温度測定結果(平成18年1月6日~7日)

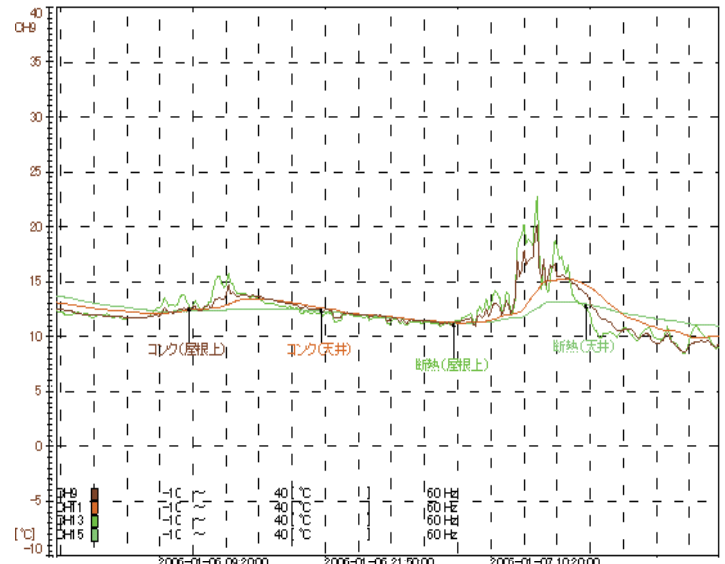


図9 コンクリート屋根温度測定結果(平成18年1月6日~7日)

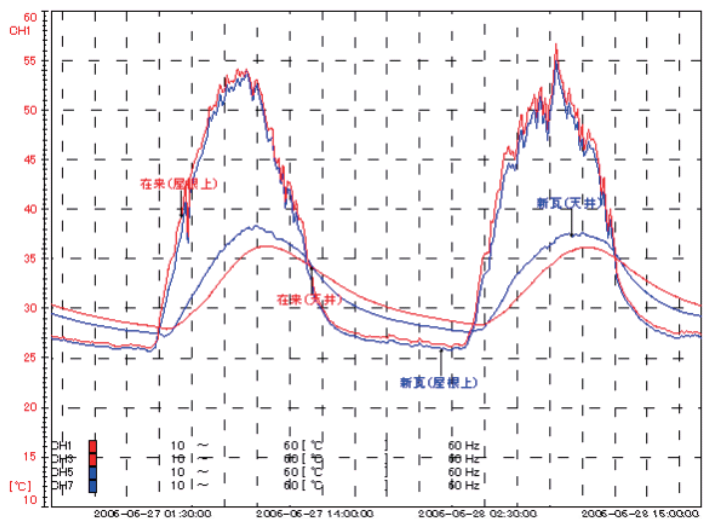


図10 切妻屋根温度測定結果(平成18年6月27日~28日)

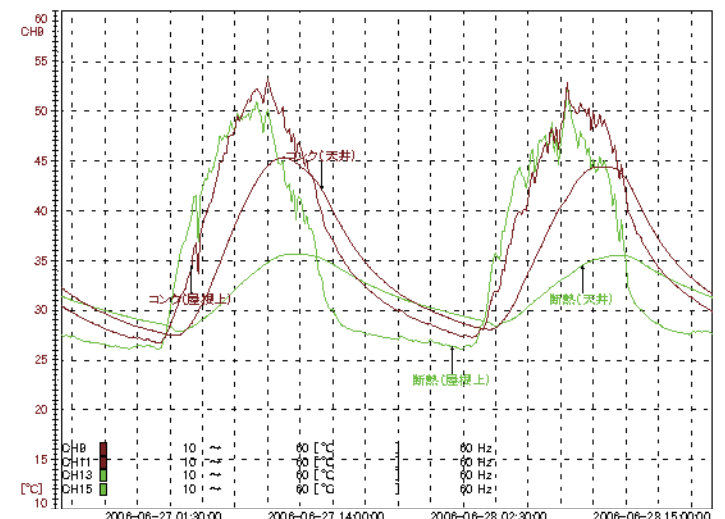


図11 コンクリート屋根温度測定結果(平成18年6月27日~28日)

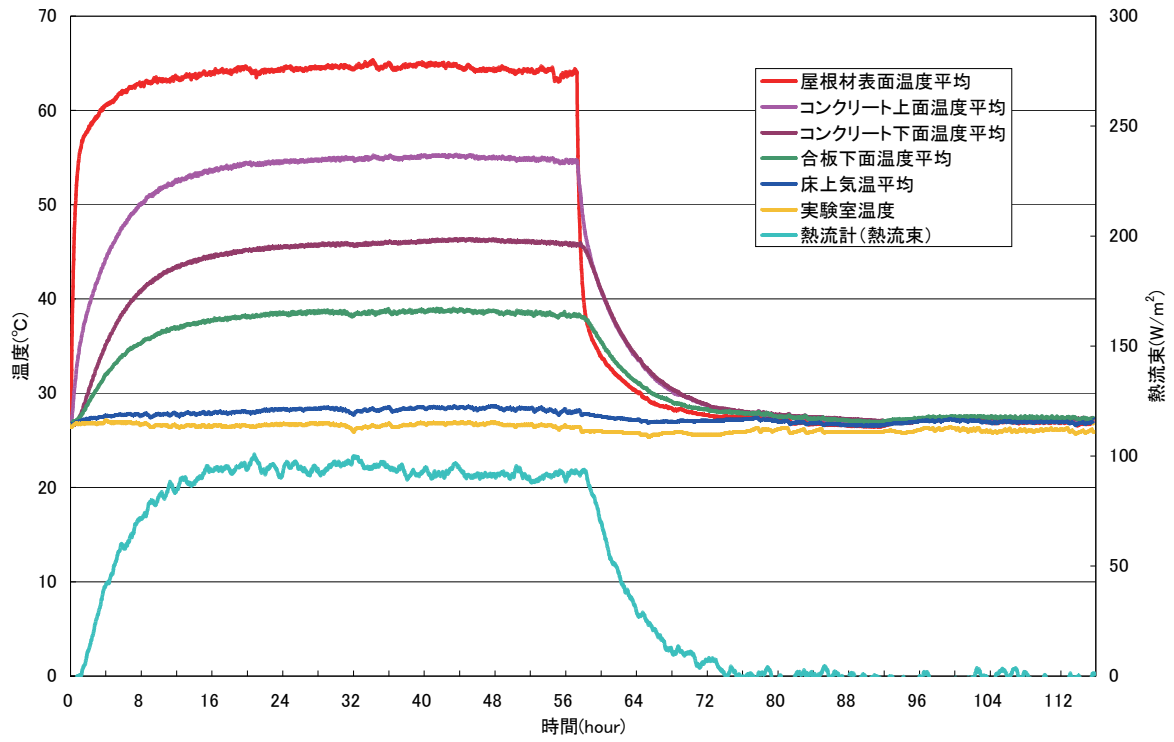


図12 断熱瓦の実験室での温度測定結果

E:\data\local\ka_nami 20.nf 1
 RESULTS: 1- B. C. 1, TEMPERATURE_1, LOAD SET 1
 TEMPERATURE - MAG MIN: 3.10E+02 MAX: 3.55E+02

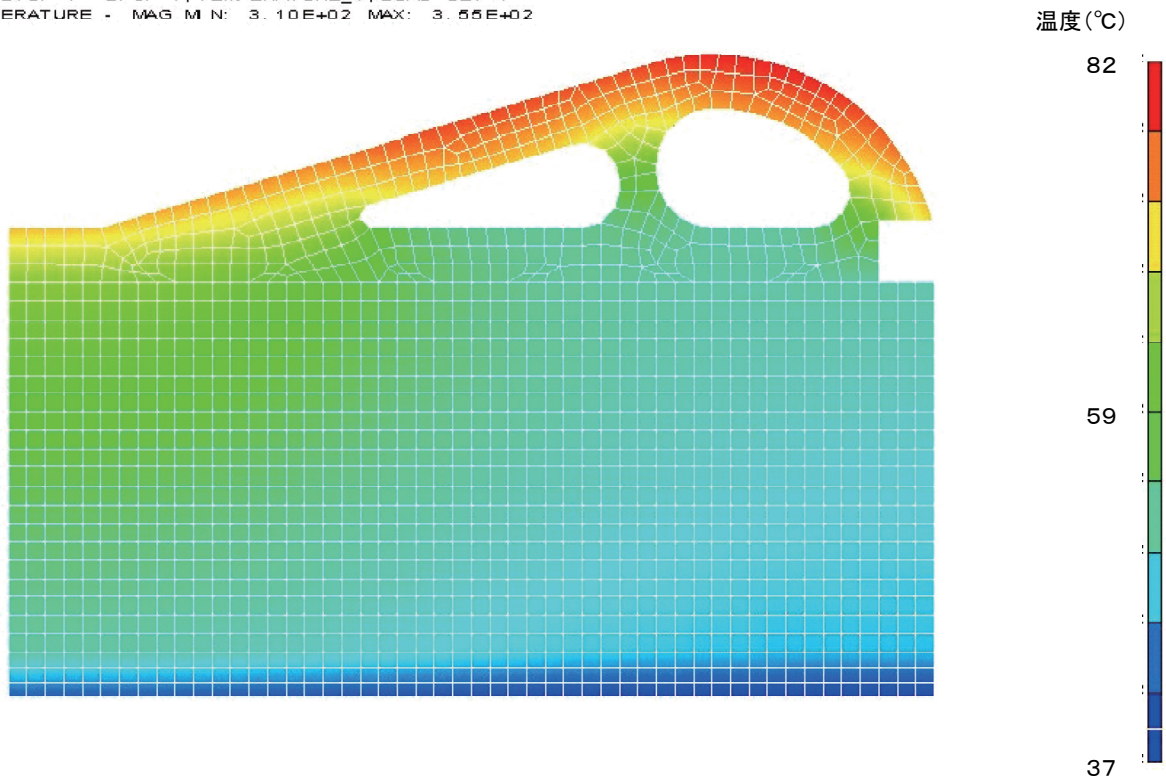


図13 CAEを用いた温度計算結果 (新瓦(波瓦))

表3 室内実験での温度まとめ

No.	瓦の種類	コンクリートブロック形状	室温	(単位:°C)											
				瓦上面温度				コンクリート上面温度				コンクリート下面温度			
				平均	左	中	右	平均	左	中	右	平均	左	中	右
1	波瓦	250*250*100	27.8	67.8	63.7	69.1	70.5	54.2	55.1	53.5	53.9	46.6	46.5	46.3	47.1
2	重ね瓦	200*150*100	27.1	64.4	64.9	63.5	64.9	56.7	56.8	56.2	57.2	46.4	46.2	46.8	46.4
3	断熱瓦	300*200*100	26.7	64.3	63.8	64.8	64.4	55.0	57.8	53.1	54.0	46.2	46.5	46.1	46.0
4	なし	300*200*100	26.4					71.5	71.3	72.1	71.1	57.2	56.7	57.5	57.3

No.	瓦の種類	コンクリートブロック形状	室温	合板下面温度								床面上約5cm温度							
				平均				左				平均				左			
				平均	左	中	右	平均	左	中	右	平均	左	中	右				
1	波瓦	250*250*100	27.8	39.5	39.2	40.3	39.1	28.8	28.7	28.7	29.0								
2	重ね瓦	200*150*100	27.1	39.9	39.5	40.7	39.4	28.7	28.9	28.6	28.6								
3	断熱瓦	300*200*100	26.7	38.6	38.8	39.2	37.9	28.4	28.5	28.3	28.4								
4	なし	300*200*100	26.4	44.9	44.6	45.9	44.2	28.4	28.5	28.3	28.3								

表4 室内実験での熱流束結果

瓦の種類	コンクリートブロック形状	熱流計での熱流束	(単位:W/m ²)								CAE計算値 条件1
			コンクリートの熱流束(測定値)				合板の熱流束(測定値)				
			平均	左	中	右	平均	左	中	右	
波瓦	250*250*100	111.0	120.4	136.4	114.9	109.8	94.9	98.2	80.7	105.8	131.9
重ね瓦	200*150*100	99.2	164.8	169.6	150.9	173.8	87.6	89.2	80.5	93.1	182.5
断熱瓦	300*200*100	96.5	146.8	191.3	114.1	135.1	97.4	97.5	89.9	104.8	125.0
なし	300*200*100	162.8	232.2	233.8	239.8	223.0	164.7	163.5	155.1	175.4	304.5

表5 CAE計算の拘束条件

- ① 太陽からの放射熱は750W/m²瓦上面、またはコンクリート上面(瓦なしの場合)に受ける。
- ② 瓦上面、またはコンクリート上面(瓦なしの場合)の空気への熱伝達率は10とし、外気温を303Kとする。
- ③ 瓦内部の空洞の空気への熱伝達率は10とし、空洞内部の温度を323Kとする。
- ④ 合板下面の空気への熱伝達率は10とし、空気の温度を298Kとする。
- ⑤ 輻射に関しては考慮しない。

また、より簡易的に熱流束を求めるために、CAE (Computer Aided Engineering) ソフト I-deas を利用して、熱伝導計算を行った。計算を行う上で必要な条件は、室内実験での温度測定を参考にして拘束条件を決定した。拘束条件を表5に、温度分布を図13にそれぞれ示す。CAE解析により求めた熱流束は、表4に示す。

計算結果は、ほとんどの値で実験値よりも大きくなった。これは、CAEより求めた値は、周囲に熱は逃げていかない条件になっていることが影響していると考えられる。測定値であるコンクリートの熱流束とCAE計算値では、断熱効果の順序が波形瓦と断熱瓦で入れ替わっているが、似たような値をとっているため、最終的に今回測定した4種類の断熱効果の順序は、概ね次のように判断する。

断熱効果の順序

断熱瓦、波瓦 > 重ね瓦 >> 瓦を葺かない場合

4 まとめ

平成17年10月より平成19年2月まで小屋を用いての温度測定、および実験室における温度測定を行ったところ、以下の知見が得られた。

1) 在来瓦と新瓦(波瓦)では、材質が同等であるため屋根材表面温度は似たような挙動を示した。小屋天井温

度に関しては、最高温度は在来瓦のほうが低く、最低温度は高くなる結果となった。これは、イシグ等の施工に使用されている材料の熱容量が影響しているものと考えられる。

2) 断熱瓦とコンクリート屋根では、断熱瓦を設置することで小屋天井温度がコンクリートのみと比較して最高温度で約10°Cの差が測定された。(平成18年6月27日)最低温度も低くなりすぎないことから、一日の温度差が小さくなる効果があるものと考えられる。断熱瓦は風を通すことにより高い断熱効果を達成しているものと考えられる。

3) 実験室内における断熱効果測定では、恒温状態の熱流束においての比較が可能であった。実験室内を同条件で行うことで、瓦の種類による比較ができた。

4) CAE計算により断熱効果をおおよそ求めることは可能であった。今後はより簡便に断熱効果の評価が可能となった。拘束条件により値が違ってくるので、今後実験室のデータを参考にして拘束条件を修正していく予定である。

謝辞

温度測定小屋を沖縄職業能力開発大学校住居環境課 諸石先生に提供して頂き、誠に有難うございました。

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターに

ご連絡ください。