

亜熱帯地域における機能性屋根材に関する研究開発

— 機能性屋根材試作に関する研究 —

中村英二郎、与座範弘、奥原崇吉¹、名幸葆哲¹、具志直¹、嘉手苺崇¹

従来より沖縄にて屋根材として用いられている赤瓦の機能性（断熱性）の向上、易施工性を目的として赤瓦の素地及び構造について検討を行い、コンクリート系住宅に対応する屋根材開発を行った。昨年度からの継続研究テーマとして今年度は、機能性屋根材試作を主たる研究として行った。実験計画法を利用して条件の絞り込みを行った結果、従来の赤瓦の良さを生かしたデザインで、曲げ破壊荷重 1500N 以上、寸法精度 ± 4mm 以内、石炭灰を配合した良好な試作品を作製することが出来た。

1 はじめに

沖縄県は亜熱帯地域に属し、古くより本土地域とは異なった気候風土に適した独特の建築様式で家屋が建てられていた。ところが、台風対策等のため現在沖縄では、コンクリート系の住宅が90%以上のシェアを占めるに至っている。¹⁾このコンクリート系住宅は風に強く台風に対して以前のような倒壊被害等の心配は無くなったが、その反面、コンクリート特有の蓄熱性により、夏季夜間の室内温度が下がらないための温熱に関する住環境の低下を招いている。²⁾また、コンクリート住宅の直線的構造により景観性が良くないとの問題が大きく指摘され始めて久しい。

そこで、昨年度から従来より沖縄にて屋根材として用いられている赤瓦の機能性（断熱性）の向上、施工のより簡便さを目的として、赤瓦の素地及び構造について工夫を行い、コンクリート系住宅にもマッチする屋根材開発を沖縄県赤瓦事業協同組合と共同で行っている。

昨年度は赤瓦の主原料である泥岩（クチャ）と、乾粉状態の副原料を混ぜる条件について検討を行い、素地配合についての知見を得ているので³⁾、本年度は成形を中心に一連の製造工程において条件の検討を行い、機能性屋根材の試作を主たる研究として行った。その結果、良好な試作品を作製することが出来たので、この条件と試作品の諸特性について報告する。

2 実験方法

2-1 実験計画法を利用した試作条件の検討

瓦の製造工程は工場により違いがあるが、通常図1

のような多くの工程で生産が行われており、検討すべき因子が多い。そこで、実験計画法⁴⁾を利用し、混合、成形、乾燥、焼成工程における有意な因子を求めた。この実験の因子と水準を表1に示す。水準は、水準1に現在の生産条件に近い条件、水準2に改良を考えた条件を設定した。

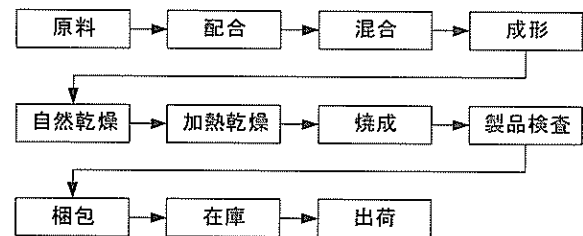


図1 県内における標準的な瓦製造工程

表1 実験計画法（L8）での因子と水準

因子	水準1	水準2
A 押出成形時水分量(%)	28.6	26.3
B 押出成形速度(sec/切)	22	40
C 混合時水分量(%)	27.9	30.0
D 押出成形時口金加熱(100°C)	無し	有り
E 自然乾燥工程	有り	無し
F 焼成温度(°C)	1000	1020

これ以外の実験条件は、昨年度の実験で求めた、泥岩（クチャ）に石炭灰の配合外割 20%、赤土外割 10%、炭酸バリウム外割 1% 配合した。また、原料の配合は、混水混合機、ロールクラッシャー（間隙 20mm）、スクリーンフィーダ（目開き 30mm）、ロールクラッシャー（間隙 2mm）のラインを2回通し、さらにロールクラッシャー（間隙 20mm）、ロールクラッシャー（間隙 1mm）、スクリーンフィーダ（目開き 25mm）を通した後、改良型押出成形機で成形を行った。成形後は、通常生産している製品と同様

1 沖縄県赤瓦事業協同組合

に、乾燥、焼成（強制対流式ガス炉、12m³）を行った。焼成後のテストピースは、図2のように曲げ破壊荷重、吸水率、反り、寸法（長さ、幅、高さ）、外観の測定を行った。この測定した特性値は、曲げ破壊荷重、吸水率、反りはそのままの値を、寸法は望目特性としてSN比換算したものを分散分析し、それぞれの特性値における有意な因子を求め、適切な条件の推定を行った。

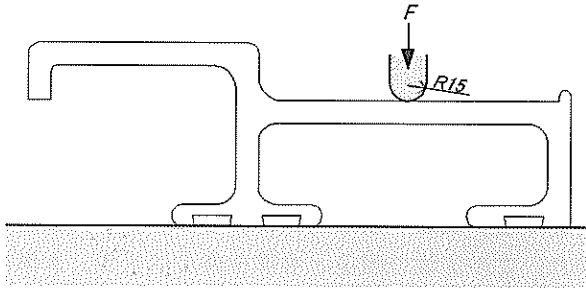


図2 テストピース曲げ試験

2-2 最適試作条件による試作品の諸性状

実験計画法により求めた、適当であると推定した条件を用いて試作を行った。この条件で試作を行ったサンプルをJIS A 5208「粘土がわり」⁵⁾と比較して、評価をした。ただし、今回研究開発を行っている屋根材は、JISで規格されている形状（J型、S型、F型）に属しないと考えられるため、基準にはとられないものとした。曲げ破壊荷重、吸水率、寸法（長さ、幅、高さ）、外観（割れ、欠け、色むら）の項目を規格に準じて測定した。また、石炭灰を配合していることから重金属の溶出が心配されるので、昭和48年環境庁告示第13号「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法」に準じて、重金属の溶出試験を行った。

また、亜熱帯地域における機能性屋根材の断熱特性に関する評価を図3に示す方法で行った。測定方法は、空調で23℃に調整した部屋で、測定する試験体を発泡スチロール上にならべ、500Wのハロゲンランプ4基で発泡スチロール面より50cmの高さから投光し、そのときの瓦表面、瓦裏面等の温度変化

をK熱伝対を用いて収集した。

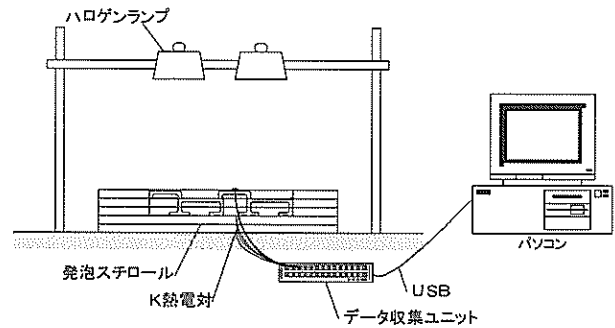


図3 断熱特性測定方法

3 実験結果および考察

3-1 実験計画法を利用した試作条件の検討

今回、副原料として使用した沖縄電力具志川火力発電所より排出される石炭灰およびクチャの化学成分値を、蛍光X線分析装置を用いて測定した結果を、表2に示す。2年の間でサンプリングした石炭灰は、マッセルブルグ（オーストラリア）、ハンターバレー（オーストラリア）、ボンタン（インドネシア）、ナントン（中国）、ニューランズ（オーストラリア）の石炭を燃やした灰で、3カ国5種類になる。石炭灰の化学組成は、品質管理のためにも使用する際、測定を行うことが求められるが、瓦のような窯業製品は精密な工業製品ではないので、おおよその成分が粘土原料と類似していればよい。問題となるのは、きれいな赤色を発色するための鉄分と耐火度を左右するアルカリ成分(Ca,Mg,Na,K)の量である。今回実験に使用したナントン炭、ニューランズ炭の灰では、外観上ひどい白華現象や黒色化等の大きな問題は発生しなかった。

L8 実験計画では、ナントン炭の石炭灰を利用し実験を行った。この焼成後試験体の曲げ破壊荷重の測定結果を分散分析した結果を表3に示す。表中におけるfは自由度、Sは変動、Vは分散、F₀はF値、S'はプーリング後の変動、ρは寄与率を示す。また、分散分析より1%の危険率で有意となったA押出成形時水分量、および危険率5%で有意に近かったD

表2 原料の化学組成

(単位: %)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO ₂	Ig. Loss
クチャ(大里村島袋)	58.4	16.2	6.27	0.83	3.09	2.38	3.00	0.77	0.079	7.93
クチャ(与那原町大見武)	52.9	15.9	6.39	0.74	5.93	2.70	3.14	0.99	0.109	10.64
石炭灰(マッセルブルグ炭)	49.4	23.2	6.75	1.53	9.51	1.74	0.39	0.58	0.050	5.76
石炭灰(ハンターバレー炭)	62.5	23.3	3.42	1.43	0.79	0.52	0.65	0.07	0.022	4.93
石炭灰(ボンタン炭)	44.5	24.9	12.77	1.03	4.99	2.10	1.91	0.92	0.026	3.06
石炭灰(ナントン炭)	42.5	32.7	4.33	1.55	6.78	2.56	0.52	0.36	0.067	4.80
石炭灰(ニューランズ炭)	40.8	34.3	3.82	1.66	5.27	1.08	0.61	0.19	0.031	7.34

押出成形時口金加熱の要因効果図を図4に示す。焼成後曲げ破壊荷重に一番寄与率が高い因子は、A 押出成形時水分量であった。次にA×B 交互作用の寄与率が高く、次にはD 押出成形時加熱であった。このように、焼成後曲げ破壊荷重には、成形時の因子が大きく影響していることが分かった。では、どの水準が好ましいかであるが、要因効果図より水分量が少ない水準2と口金加熱のない条件が好ましい結果となった。これは、押出成形時に試験体がひねったり曲がったりすると、焼成後の曲げ試験時に局所的に応力がかかるため、曲げ破壊荷重が小さくなる傾向が見られた。それに対し、行儀の良いテストピースは大きな荷重に耐えることが出来た。次の反りの結果よりも、押出成形時水分量が大きいと、形状が変形することが推測できる。

表3 焼成後曲げ破壊荷重分散分析表

Source	f	S	V	F ₀	S'	ρ (%)
A	1	1.11	1.11	21.11**	1.05	28.0
B	1	0.18	0.18			
A×B	1	0.57	0.57	10.88**	0.52	13.7
C	1	0.03	0.03			
D	1	0.20	0.20	3.90	0.15	4.0
E	1	0.00	0.00			
F	1	0.14	0.14			
e	32	1.53	0.05			
Total	39	3.77			3.77	100
(e)	(36)	(1.89)	(0.05)		(2.04)	(54.3)

(**:1%有意)

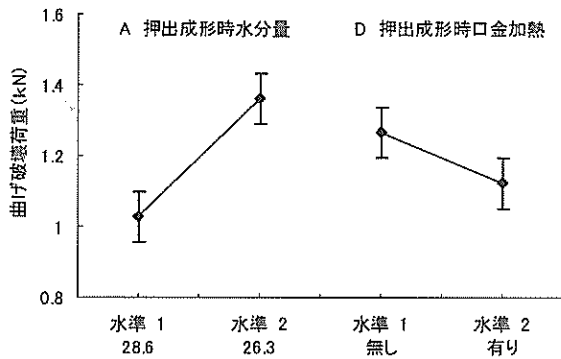


図4 焼成後曲げ破壊荷重要因効果図

焼成後反りの分散分析表を表4、要因効果図を図5に示す。反りでは、A 押出成形時水分量、F 焼成温度が危険率1%で有意となり、B 押出成形速度が危険率5%で有意であった。反りをなるべく小さくするためには、成形時の水分量を少なく、早く押し出し、焼成温度が低い方がよい。焼成温度が上がると、焼成時の変形が大きくなることが考えられる。

表4 焼成後反り分散分析表

Source	f	S	V	F ₀	S'	ρ (%)
A	1	2.76	2.76	9.86**	2.48	8.8
B	1	1.61	1.61	5.74*	1.33	4.7
A×B	1	0.08	0.08			
C	1	0.17	0.17			
D	1	0.10	0.10			
E	1	0.87	0.87			
F	1	2.68	2.68	9.57**	2.40	8.5
e	72	20.10	0.28			
Total	79	28.37			28.37	100.0
(e)	(76)	(21.31)	(0.28)		(22.15)	(78.1)

(**:1%有意、*:5%有意)

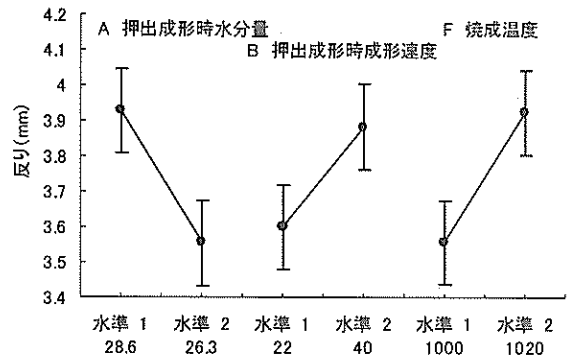


図5 焼成後反り要因効果図

次に焼成後吸水率の分散分析結果を表5、要因効果図を図6に示す。吸水率では、A 押出成形時水分量、F 焼成温度が危険率1%で有意となった。このように、焼成後の吸水率をコントロールするためには焼成時の温度管理と成形時の水分量の管理が重要であることが分かる。

表5 吸水率分散分析表

Source	f	S	V	F ₀	S'	ρ (%)
A	1	9.34	9.34	24.85**	8.97	16.0
B	1	0.76	0.76			
A×B	1	0.57	0.57			
C	1	1.21	1.21			
D	1	1.00	1.00			
E	1	0.61	0.61			
F	1	32.92	32.92	87.6**	32.55	57.9
e	32	9.76	0.30			
Total	39	56.17			56.17	100.0
(e)	(37)	(13.91)	(0.38)		(14.66)	(26.1)

(**:1%有意)

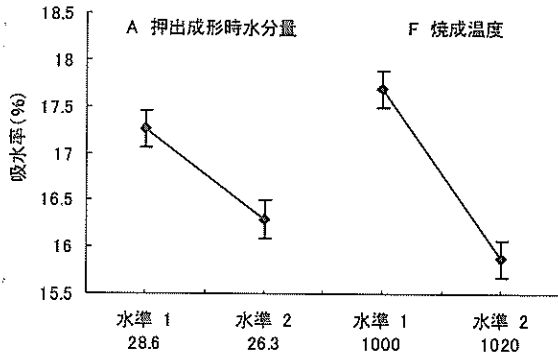


図6 吸水率要因効果図

次に、寸法（長さ）の分散分析表を表6に、要因効果図を図7にそれぞれ示す。寸法は望目特性でSN比換算をしているので、単位はdBとなっている。この単位の特性は、シグナルとノイズの比を示すものなので、大きければ大きい程良いという値である。長さでは、危険率5%でA 押出成形時水分量、B 押出成形速度、C 混合時水分量が有意であった。好ましい条件は、混合時に水分量が多く、押出時には水分量が少なくゆっくり押し出されることである。ただし、ゆっくりの押出は反りと相反する結果となっており、生産性の問題からもある程度の速度が必要であると考える。

表6 長さ（SN比望目特性）分散分析表

Source	f	S	V	F ₀	S'	ρ (%)
A	1	47.42	47.42	37.55*	46.16	22.6
B	1	48.09	48.09	38.08*	46.83	23.0
A×B	1	18.31	18.31	14.5	17.05	8.4
C	1	65.22	65.22	51.64*	63.96	31.4
D	1	22.42	22.42	17.75	21.15	10.4
E	1	1.96	1.96			
F	1	0.57	0.57			
e	0					
Total	7	203.99			56.17	100.0
(e)	(2)	(2.53)	(1.26)		(8.84)	(4.3)

(*:5%有意)

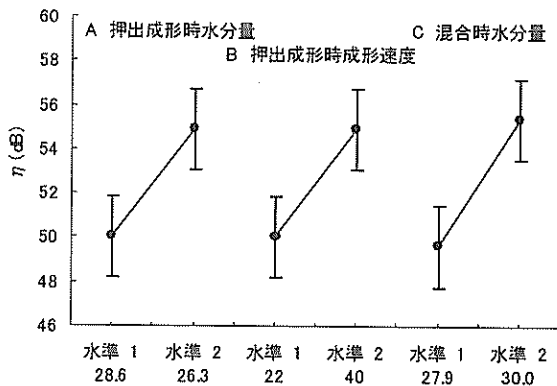


図7 長さ（SN比望目特性）要因効果図

寸法（幅）の分散分析結果を表7に示す。有意となった因子は一つもなかった。

表7 幅（SN比望目特性）分散分析表

Source	f	S	V	F ₀	S'	ρ (%)
A	1	34.46	34.46			
B	1	132.63	132.63	3.7	96.802	27.9
A×B	1	21.78	21.78			
C	1	55.35	55.35			
D	1	42.58	42.58			
E	1	14.01	14.01			
F	1	46.78	46.78			
e	0					
Total	7	347.58			347.58	100.0
(e)	(6)	(214.95)	(35.83)		(250.78)	(72.2)

寸法（高さ）の分散分析表および要因効果図を表8、図8に示す。D 成形時口金加熱のみが危険率5%で有意となり、要因効果図より水準1の口金加熱の無いほうが好ましい結果となった。

表8 高さ（SN比望目特性）分散分析表

Source	f	S	V	F ₀	S'	ρ (%)
A	1	2.44	2.44			
B	1	2.34	2.34			
A×B	1	0.24	0.24			
C	1	12.60	12.60			
D	1	31.73	31.73	7.75*	27.63	49.1
E	1	1.25	1.25			
F	1	5.70	5.70			
e	0					
Total	7	56.29			56.29	100.0
(e)	(6)	(24.56)	(4.09)		(28.66)	(50.9)

(*:5%有意)

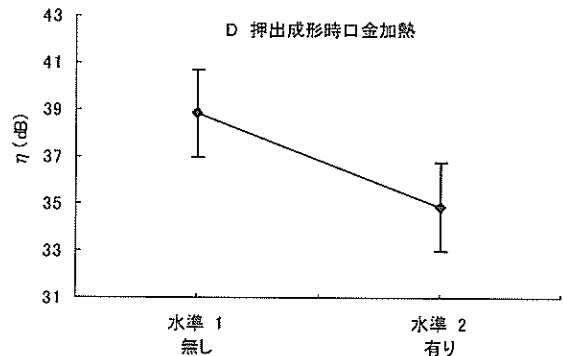


図8 高さ（SN比望目特性）要因効果図

この様に、各特性値より、それぞれの有意な因子および好ましい水準が求まった。これらを整理し、より適当な生産条件を求めるものとする。

A成形時水分量は、多くの特性値において有意となったため重要な因子であると考え、これを適切にコントロールすべきであると判断した。現在の瓦工場における成形時水分量の調整は、職人の経験によ

る勘で決められている。また、設備面においても井戸水の配管に蛇口をつけて使用しているだけであり、水圧の変化により水の供給量に変化してしまう。従って、今回の実験において A 成形時水分量が多くの特性値で有意となったが、より水分を調整管理できる設備で実験を行い、更なる正確なデータをとる必要性がある。

A 成形時水分以外の因子についても、表のように様々な特性値で有意と判断された。これらの因子では、水準 1 と水準 2 どちらが好ましいか求め、次の試作実験の条件として考慮した。例えば、D 口金加熱では、寸法（高さ）で有意となった。このときの好ましい水準は、水準 1 の加熱無しの方が好ましい結果であった。従って、試作の条件も口金加熱無しに設定した。このように、その他の因子も同様に適当であろう条件を判断し、試作条件に反映させた。

3-2 最適試作条件による試作品の諸性状

3-2-1 試作品の基本特性

実験計画法の結果を受け設定した試作の条件を表 9 に示す。2,000 枚の試作のため、ある程度まとまった石炭灰を確保する必要があり、原料の石炭灰は、ナントン炭からニューランズ炭に代わった。また、石炭灰の配合量も 15% に変更し、これは、実験計画法の時に原料の粘りが無く、成形直後にひび割れを多く発生したことを受けて、配合量を減らしたものである。このことにより、成形時の適切水分量も変化し、実験計画で行われたものより少ない水分量で混合、成形が行われた。

次に、テストピースの形状も高さ 80mm のものから 55mm へ変更がなされた。これは、実験とは別にデザインについての検討がなされ、生産性、コストの面から高さ 55mm に決定したためである。従って、試作についても高さ 55mm の形状で行った。試作したテストピースの外観を図 9 に示す。また、試作品の特性値を表 10 に示す。

表 9 試作条件まとめ

	ニューランズ
石炭灰炭種	ニューランズ
石炭灰配合量(外割%)	15
混合時水分量(%)	24.0
成形時水分量(%)	24.9
押出成形速度(cm/min)	243
口金加熱	無し
自然乾燥工程	有り
焼成温度(°C)	1020

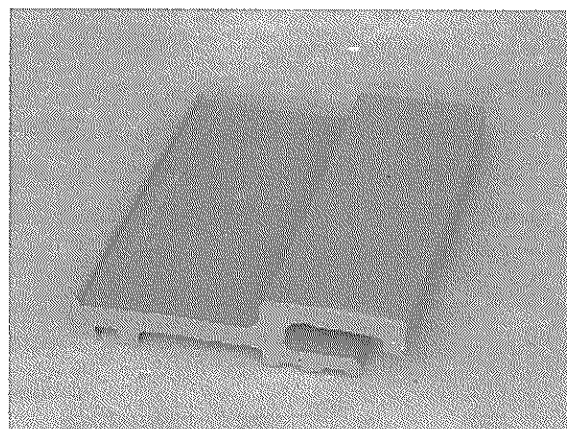


図 9 試作品外観

表 10 試作品特性値

	試作品	目標値
曲げ破壊荷重	2006N	1500N以上
寸法精度(長さ)	(56.91)±0.71mm	±4mm
寸法精度(幅)	(284.67)±0.76mm	±4mm
寸法精度(高さ)	(244.37)±0.81mm	±4mm
外観(割れ、欠け、色むら)	大きな欠点なし	ないこと

寸法精度は、t分布における99.9%の信頼区間を示す。

このように、試作では、おおむね良好な特性を取得することができた。曲げ破壊荷重も JIS 規格の 1500N 以上をクリアしており、寸法精度も ± 4mm の範囲内であった。しかしながら、今回の試作はすべて同じ焼成窯で焼成したものであるので大きなばらつきが出なかった可能性も考えられる。今後は更なるデータの蓄積を行い、事業化へ備える必要がある。

3-2-2 試作品の重金属溶出結果

機能性屋根材試作品を粉砕し、重金属の溶出試験を行った結果を表 11 に示す。この様にすべての重金属で、産業廃棄物の埋立処分に適用される基準を満たすことが出来た。機能性屋根材の使用にあたっては、廃棄する時に適正に処理されれば問題がないものとする。ただし、石炭灰の炭種が変わったときは、溶出の可能性があるので、確認する必要がある。

表 11 試作品溶出試験結果

試験項目	試験結果	基準値
Cd (mg/l)	0.001	0.3
Pb (mg/l)	<0.005	0.3
Cr(VI) (mg/l)	<0.01	1.5
T-Hg (mg/l)	<0.00005	0.005
As (mg/l)	0.058	0.3
Se (mg/l)	<0.002	0.3

3-3-3 試作品の断熱効果

今回、測定した屋根材は、高さ55mmの試作品、L8実験計画法で使用した高さ80mmの試験体、県産断熱瓦、他県産釉薬S型瓦の合計4種類である。瓦の測定箇所は、図10のように屋根材の最も高いところと最も低いところの表面、裏面、発泡スチロール面とした。他の瓦についても同様に測定を行った。

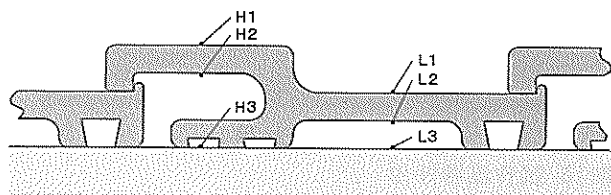


図10 試作品温度測定箇所

ハロゲンランプを点灯すると図11のような温度カーブを示し、ある温度で恒常状態になる。この恒常状態の温度をまとめたものを表12に示す。

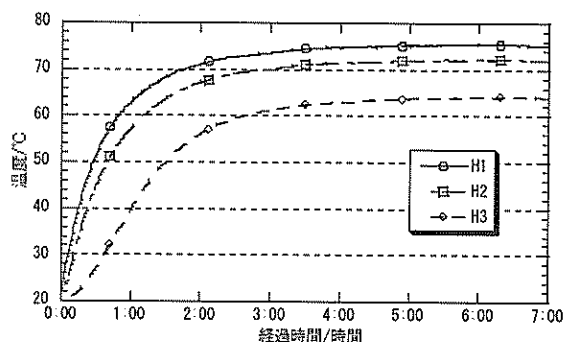


図11 試作品（高さ55mm）の温度測定

表12 恒常状態の温度 (単位:℃)

	H1	H2	H3	L1	L2	L3
試作品(高さ55mm)	75.3	72.1	64.1	73.3	70.8	67.1
試験体(高さ80mm)	76.0	72.0	60.2	75.8	72.9	62.8
県産断熱瓦	77.0	75.2	65.8	79.5	78.6	77.0
他県産釉薬S型瓦	109.4	105.1	84.3	101.4	94.0	93.7

この測定結果より、試験体(高さ80mm)がH3、L3共に一番低いことが分かる。次に試作品(高さ55mm)、県産断熱瓦、他県産釉薬瓦の順となった。屋根躯体の温度は、発泡スチロール上面の温度であるH3、L3に相当するので、これらの温度が実際の施工を行った場合の屋根躯体温度であろうと示唆される。この様に、今回開発を行った屋根材は、従来製品(県産断熱瓦)、他県産釉薬S型瓦と比較して、断熱効果が優れている結果となった。

ただし、今回は実験室内の測定であったので、こ

の結果がそのまま実際の家屋で効果があるか明確でない。そこで、屋外の小屋を利用した、より実際に即したデータの蓄積を図る必要がある。この測定は、沖縄職業能力開発大学校(沖縄ポリテクカレッジ)の協力を得て、実施する計画である。

4 まとめ

亜熱帯地域における機能性屋根材の研究開発を目標として行った結果、表13に示す特性値をもつ屋根材の試作品ができた。

表13 試作品および素地特性値まとめ

	試作品	目標値
曲げ破壊荷重	2006N	1500N以上
寸法精度(長さ)	(56.91)±0.71mm	±4mm
寸法精度(幅)	(284.67)±0.76mm	±4mm
寸法精度(高さ)	(244.37)±0.81mm	±4mm
外観(割れ、欠け、色むら)	大きな欠点なし	ないこと
断熱性	0.33kcal/mh°C	0.4kcal/mh°C以下
素地の曲げ強さ	17.8MPa	15MPa以上
廃棄物の利用	石炭灰15%	利用する

寸法精度は、t分布における99.9%の信頼区間を示す。

この試作品は、廃棄物である石炭灰を有効利用し、なおかつ、県産断熱瓦よりも断熱効果の高いと予想される製品となっている。これらの特性値は、概ね当初の目標をクリアすることが出来た。

今後、さらに製品化へ向けての取り組みを継続して行い、事業化へ向けて備えるものとする。

なお、この研究は中小企業総合事業団における課題対応新技術革新促進事業の一環で行われた研究である。

謝辞 この研究を遂行するにあたり琉球大学工学部 福本功教授にご指導頂きました。この場をかりて感謝いたします。

参考文献

- 1) 沖縄県土木建築部住宅課編集発行 沖縄県住宅産業近代化計画 (1997)
- 2) 浦野良美編著 住宅のパッシブクーリング 森北出版株式会社 (1991)
- 3) 中村英二郎、与座範弘、奥原崇吉、名幸葆哲、仲泊栄作 「亜熱帯地域における機能性屋根材に関する研究開発 -機能性屋根材素地の混合に関する研究-」 沖縄県工業技術センター研究報告 (2002)
- 4) 田口玄一著 第3版実験計画法(上・下) 丸善株式会社 (1977)
- 5) 日本工業規格 JIS A 5208 「粘土がわら」

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。