

首里城瓦に関する研究

—原料調査及び配合・焼成試験—

花城可英、赤嶺公一

2019年10月首里城正殿を含む建物8棟が焼損した。首里城復元に向けて、材料調達の状況変化を反映した資材確保等の研究が急務となっており、首里城正殿瓦を製造するための原料調査及び配合・焼成試験を行った。

今回公共工事現場において、首里城正殿瓦の主原料であるクチャ(沖縄島南部に賦存する泥岩)の調査を行った。その中で焼成体の吸水率が低いクチャを確認し、確保することができた。このクチャと現在赤瓦原料として使用されているクチャ及び赤土の配合・焼成試験を行い、首里城正殿瓦の原料配合割合及び焼成条件を絞り込むとともに、正殿破損瓦を粉砕したシャモットの配合・焼成試験を行った。

1 はじめに

2019年10月31日未明に発生した火災により、首里城正殿を含む建物8棟が焼損した。

沖縄県は首里城を再び甦らせるため、「首里城復元に向けた基本的な方針」を策定し、国や那覇市等の関係機関との連携のもと、積極的な取組を進めるとしている。これを受け、沖縄県工業技術センターは首里城復元に向け、材料調達の状況変化等を反映した首里城瓦の研究を行った。

沖縄県内で生産されている赤瓦は沖縄島南部に賦存するクチャ(泥岩)を主原料としている。平成の首里城再建時の正殿瓦は高品質の瓦を目指し、沖縄島北部の古我知粘土を原料として使用していた¹⁾が、瓦製造技術の向上があり、その後の周辺建屋の赤瓦はクチャを主原料として製造されている。

国は「首里城復元に向けた技術検討委員会」を設置し、その下に複数のワーキンググループ会議を置いており、このうち「木材・瓦類ワーキンググループ会議」で、正殿瓦の仕様等が検討されている。このワーキンググループ会議において今回の首里城再建に使用される正殿瓦は主原料をクチャとし、回収された正殿破損瓦を粉砕し、シャモットとして使用することが決定された。

首里城正殿には約5.5万枚の瓦が使用され、約230トンの原料が必要と試算されている。このため、原料となるクチャの確保を目的として、令和2年度は、比較的量の見込める沖縄島南部の公共工事現場のクチャを調査し、配合・焼成試験を行った。

2 実験方法

2-1 クチャと赤土の配合・焼成試験

沖縄県内で生産されている赤瓦は通常クチャ8に対し、

赤土2程度配合されている。赤瓦製造業者からの聞き取りにより、赤土配合量を増やすと赤瓦製品の吸水率が下がるとの情報があり、その確認のため赤土配合量を増やして配合・焼成試験を行った。また正殿破損瓦を粉砕し、シャモットとして配合することも検討した。

配合・焼成試験はクチャ、赤土とも赤瓦製造業者が使用している原料を用い、クチャ8:赤土2(通常の赤瓦配合)、クチャ7:赤土3、クチャ6:赤土4とした。

正殿破損瓦は付着した漆喰をヘラ、ワイヤーブラシで剥がした後、たわしを用いて表面を水洗浄し、風乾した。その後ジョークラッシャー、ロールクラッシャーで粉砕し、ポットミルで6時間あるいは24時間乾式粉砕した。これを0.5mmでふるい分けを行い、シャモット(6時間粉砕:シャモットA、24時間粉砕:シャモットB)とした。シャモットの配合割合は外割で0%、5%、10%、15%とした。

なお赤瓦製品表面に白く発生する白華現象を抑えるため、すべての配合に炭酸バリウムを0.5%添加した。

各原料をポリ容器に計りとり、玉石を入れ、ポットミル機で1時間混合した。これに水を加え、混練し、吸水率測定用試験体を成形した。

試験体は電気炉を使用し、沖縄県内で製造されている赤瓦製品の焼成温度1,000℃より高い、1,030℃、1,060℃、1,090℃で焼成を行った。なお練らし時間は1時間または2時間とし、焼き絞まりの目安となる試験体の吸水率を測定した。

2-2 公共工事現場クチャの調査

原料となるクチャが量的に確保できる可能性がある沖縄島南部の公共工事現場を調査し、クチャを採取した。

採取したクチャは乾燥後、乳鉢で粉砕し、試料とした。
試料について、化学組成、強熱減量を測定した。

また、試料に水を加え、混練し、吸水率測定用試験体を成形した。試験体は電気炉を使用して1,030℃で焼成し、その吸水率を測定した。

2-3 石嶺クチャの配合・焼成試験

原料調査において、1,030℃焼成時の吸水率が低い那覇市雨水貯留施設現場クチャ(以下石嶺クチャ)が確認された。しかしながら、石嶺クチャ単独では収縮率が大きく、また成形しにくいいため、石嶺クチャと他のクチャ(赤瓦製造業者使用)、赤土との配合・焼成試験を行った。クチャ7:赤土3の配合を主とし、クチャ全体量の内、石嶺クチャの割合を3割、5割、7割とした。シャモットは6時間粉碎物を使用し、配合原料に対し、0%、5%、10%添加し、クチャと赤土の配合・焼成試験同様に原料を混合して吸水率測定用、収縮率測定用試験体を作成した。試験体は電気炉を使用し、1,030℃、1,060℃、1,090℃、練らし時間1時間の条件で焼成し、その吸水率、収縮率を測定した。

2-4 測定方法

①化学組成と強熱減量

エネルギー分散型蛍光X線分析装置(PANalytical社製、Epsilon 3 XL)を用いて、粉末法により化学組成を測定した。なお、強熱減量は小型電気炉を用いて1,050℃で強熱した時の試料の重量変化から算出した。

②粒度分布

レーザ回折式粒度分布測定装置(マイクロトラック・ベル社製MT3300EXII)を使用し、湿式で粒度分布を測定した。

③試験体の成形

ステンレス製ボールに試料を入れ、水を加え、混練し、練土とした。なお、練土は、山中式土壤硬度計を使用し、一定の硬さ(8~10mm程度)になるよう水分量を調整した。

吸水率測定用として石膏型を用いて押し型成形し、吸水率測定用として40mm×40mm×7mm、収縮率測定用として120mm×15mm×15mmの形状の試験体を得た。

④焼成試験

焼成温度は電気炉(YAMAZAKI、TSY-18)を用いて100℃/hrの昇温速度で、所定の温度で焼成した。

⑤吸水率

焼成した試験体を窯出し後重量測定し、乾燥重量とした。その後試験体を水中で1日放置し、重量を測定し、飽水重量とした。そして乾燥重量と飽水重量から吸水率を求めた。

⑥収縮率

収縮率測定用試験体を石膏型から取り出した直後にノギスを用いて100mm間隔の印を付け、焼成後の印の間隔をノギスにより測定し、全収縮率を求めた。

3 実験結果および考察

3-1 クチャと赤土の配合・焼成試験

①化学組成

配合・焼成試験に使用した試料の化学組成を表1に示す。

正殿破損瓦粉碎物(シャモット)は古我知粘土を原料として使用していたため、クチャに比較して、アルミナ分が多くなっていると考えられる。正殿瓦の原料である古我知粘土のカルシウムは検出下限以下であったが、漆喰の影響が残り、シャモットではカルシウム4.4%となっている。一方、クチャはカルシウム、鉄が多い原料となっている。赤土はクチャに比較して鉄分がやや少なくなっている。

②正殿破損瓦粉碎物の粒度分布

正殿破損瓦粉碎物の粒度分布を図1に示す。

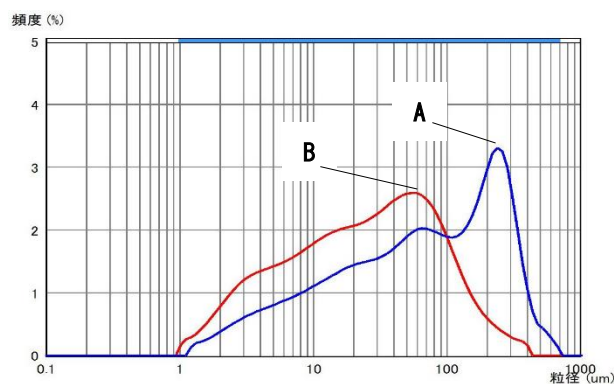


図1 シャモットの粒度分布

表1 配合原料の化学組成(%)

試料名 \ 元素名	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	SO ₃	強熱減量
クチャ(製造業者)	52.8	17.5	7.53	0.92	5.39	2.44	3.52	0.83	0.10	0.27	8.5
赤土(製造業者)	69.3	17.3	4.82	0.76	0.06	0.39	2.56	0.02	0.00	0.09	4.7
正殿破損瓦粉碎物	61.0	19.0	6.67	0.85	4.44	2.55	3.44	1.09	0.06	0.11	0.5

6時間粉砕物(シャモット A)は 250 μ m 付近にモード径のピークが見られる。これに対し、24 時間粉砕物(シャモット B)は粉砕が進み、250 μ m のピークがなくなり、60 μ m にピークが見られる。

③焼成試験体の吸水率

クチャ、赤土、シャモットの配合を表2に示す。

表2 配合表

配合	クチャ	赤土	シャモットA (外割%)	シャモットB (外割%)
K8-0	8	2	0	0
K7-0	7	3	0	0
K6-0	6	4	0	0
K8-A5	8	2	5	0
K7-A5	7	3	5	0
K6-A5	6	4	5	0
K8-A10	8	2	10	0
K7-A10	7	3	10	0
K6-A10	6	4	10	0
K8-A15	8	2	15	0
K7-A15	7	3	15	0
K6-A15	6	4	15	0
K8-B5	8	2	0	5
K7-B5	7	3	0	5
K6-B5	6	4	0	5
K8-B10	8	2	0	10
K7-B10	7	3	0	10
K6-B10	6	4	0	10
K8-B15	8	2	0	15
K7-B15	7	3	0	15
K6-B15	6	4	0	15

シャモットを配合していない焼成試験体の吸水率を表3に示す。

表3 焼成試験体の吸水率(%)

ねらし時間	1Hr			2Hr		
	1,030 $^{\circ}$ C	1,060 $^{\circ}$ C	1,090 $^{\circ}$ C	1,030 $^{\circ}$ C	1,060 $^{\circ}$ C	1,090 $^{\circ}$ C
K8-0	17.8	16.1	11.2	16.9	14.9	9.3
K7-0	17.2	15.6	11.2	16.5	14.6	9.4
K6-0	16.7	15.3	11.2	16.2	14.2	9.6

すべての配合について焼成温度が高くなると吸水率は低くなり、ねらし時間が長くなると、吸水率は低くなっ

表5 採取試料の化学組成(%)、1,030 $^{\circ}$ C焼成試験体の吸水率(%)

試料名 \ 元素名	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	SO ₃	強熱減量	吸水率
クチャ(製造業者)	52.8	17.5	7.53	0.92	5.39	2.44	3.52	0.83	0.10	0.27	8.5	17.8
クチャ(津嘉山北)	49.1	16.0	7.54	0.83	9.08	2.27	3.30	0.91	0.09	0.24	10.5	19.2
クチャ(玉城奥武)	50.7	16.5	6.23	0.84	8.30	2.71	3.35	0.54	0.06	0.62	10.0	20.7
クチャ(首里石嶺)	55.1	19.9	8.07	0.93	1.08	1.92	3.61	0.41	0.05	0.10	8.6	2.1
クチャ(大里南)	47.9	16.5	8.34	0.93	9.00	2.26	3.38	0.64	0.07	0.64	10.2	27.0

ている。

吸水率は1,030 $^{\circ}$ C、1,060 $^{\circ}$ C焼成試験体ではクチャ8配合(K8-0)より、赤土の配合量が多いクチャ7配合(K7-0)、クチャ6配合(K6-0)の方が低くなっている。しかし1,090 $^{\circ}$ C焼成試験体の吸水率は配合による違いはほとんど見られない。

シャモットを配合した場合、クチャの配合割合が変わっても同様な傾向を示した。代表例としてクチャ8：赤土2のシャモット配合焼成試験体の吸水率を表4に示す。配合は表2に示したものである。

表4 シャモット配合焼成試験体の吸水率(%)

ねらし時間	1Hr			2Hr		
	1,030 $^{\circ}$ C	1,060 $^{\circ}$ C	1,090 $^{\circ}$ C	1,030 $^{\circ}$ C	1,060 $^{\circ}$ C	1,090 $^{\circ}$ C
K8-0	17.8	16.1	11.2	16.9	14.9	9.3
K8-A5	18.0	16.2	11.6	17.2	15.0	9.4
K8-A10	18.5	16.7	11.5	17.6	15.5	9.0
K8-A15	18.3	16.5	11.1	17.8	15.1	8.7
K8-B5	18.0	16.3	11.5	17.3	15.0	9.3
K8-B10	18.4	16.5	11.4	17.7	15.4	9.0
K8-B15	18.6	16.5	10.9	18.0	15.4	8.5

シャモットを添加すると1,090 $^{\circ}$ C焼成以外は添加していない配合に比較して、吸水率が高くなっている。またシャモットの粒径の差による吸水率の違いはほとんど見られない。このため、今後試験に使用するシャモットの粉砕時間は6時間とすることにした。

3-2 公共工事現場クチャの調査

クチャが賦存する沖縄島南部の公共工事現場を調査し、クチャを採取した。

採取試料の化学組成と1,030 $^{\circ}$ C焼成体の吸水率を表5に示す。

石嶺クチャ以外は現在使用されているクチャに比較してカルシウムが多くなっている。また吸水率は石嶺クチャ以外高くなっている。

以下に調査地概要を示す。

南風原町津嘉山北土地区画事業

採取地の写真を図2に示す。

写真に見られるクチャ中のスジは砂層であり、クチャ部分のみを採掘するのが難しいと思われる。1,030℃焼成時の吸水率は19.2%と高めている。また1,030℃焼成時の試験体の色味は現在瓦製造業者が使用しているクチャと比較して赤みが弱くなっている。



図2 南風原町津嘉山北採取地

美らグリーン南城(一般廃棄物最終処分場、南城市玉城奥武)

採取地の写真を図3に示す。

廃棄物処分場工事現場で、クチャを含む部分をかなり深く掘り込んでいる。また石灰岩を多く含む層が確認できる。1,030℃焼成時の吸水率は20.9%と高めている。



図3 南城市玉城奥武採取地

那覇市雨水貯留施設(石嶺)

採取地の写真を図4に示す。

クチャ層は柔らかい部分と硬い部分が見られる。調査に同行していた赤瓦製造業者によると軟質部分が使用可能とのことであった。

石嶺クチャ軟質部分の1,030℃焼成時の吸水率は2.1%とかなり低くなっている。しかしながら、石嶺クチャ単独では軟らかすぎて、押出成形ができないとのことが予

想された。収縮率が大きく、寸法精度が悪くなることが想定されるため、他のクチャと配合する必要があると考える。



図4 那覇市首里石嶺採取地

南部東道路(南城市大里)

採取地の写真を図5に示す。

次年度以降の工事予定地区を切削し、試料を採取した。1,030℃焼成時の吸水率は27%と高く、白華現象も見られ、今回採取した表層部分は瓦原料としては使いづらいと思われる。



図5 南城市大里採取地

3-3 石嶺クチャの配合・焼成試験

石嶺クチャ配合1,030℃焼成試験の吸水率を表6に、全収縮率結果を表7に示す。

表6 石嶺クチャ配合1,030℃焼成試験体の吸水率(%)

クチャ:赤土	クチャ中の石嶺クチャ割合	シャモットの配合量		
		0%	5%	10%
8:2	3	14.1		
	5	11.3	12.6	12.8
	7	8.7		
7:3	3	14.9	15.2	15.8
	5	12.1	13.2	13.4
	7	9.1	10.8	11.3
6:4	3	14.6		
	5	12.8	13.5	13.9
	7	10.7		

表7 石嶺クチャ配合1,030℃焼成試験体の全収縮率(%)

クチャ:赤土	クチャ中の石嶺クチャ割合	シヤモットの配合量		
		0%	5%	10%
8:2	3	9.0		
	5	11.2	10.5	10.4
	7	12.6		
7:3	3	7.9	8.8	8.7
	5	10.4	10.1	10.2
	7	13.3	12.2	12.0
6:4	3	9.0		
	5	10.6	10.0	10.2
	7	11.7		

1,030℃焼成の場合、吸水率はクチャ8:赤土2で小さくなり、収縮率はクチャ7:赤土3で小さくなっている。石嶺クチャの配合量が増えると、吸水率が下がり、収縮率が大きくなり、色味が茶になっている。シヤモットを配合すると、吸水率が0.2~2.2ポイント大きくなり、全収縮率は小さくなっている。

石嶺クチャ配合1,060℃焼成試験の吸水率を表8、全収縮率結果を表9に示す。

表8 石嶺クチャ配合1,060℃焼成試験体の吸水率(%)

クチャ:赤土	クチャ中の石嶺クチャ割合	シヤモットの配合量		
		0%	5%	10%
8:2	3	12.1		
	5	8.2	9.0	9.1
	7	4.9		
7:3	3	12.4	12.8	13.0
	5	8.9	9.5	10.2
	7	6.3	7.2	7.7
6:4	3	12.5		
	5	9.6	10.9	11.2
	7	7.4		

表9 石嶺クチャ配合1,060℃焼成試験体の全収縮率(%)

クチャ:赤土	クチャ中の石嶺クチャ割合	シヤモットの配合量		
		0%	5%	10%
8:2	3	9.3		
	5	12.2	12.7	12.7
	7	15.3		
7:3	3	10.0	10.5	10.0
	5	11.3	11.9	12.7
	7	15.1	13.5	14.4
6:4	3	9.6		
	5	11.1	11.6	12.1
	7	13.5		

1,060℃焼成では1,030℃焼成に比べ、試験体の色味が茶に近くなった。吸水率はクチャ8:赤土2、収縮率はクチャ6:赤土4で小さくなっている。1,030℃焼成と同様に、石嶺クチャの配合量が増えると、吸水率が小さく、収縮率が大きくなり、色味が茶になる。シヤモットを配合すると、吸水率が0.3~1.6ポイント大きくなり、全収縮率に関連は見られない。

石嶺クチャ配合1,090℃焼成試験の吸水率を表10、全収縮率結果を表11に示す。

表10 石嶺クチャ配合1,090℃焼成試験体の吸水率(%)

クチャ:赤土	クチャ中の石嶺クチャ割合	シヤモットの配合量		
		0%	5%	10%
8:2	3	7.2		
	5	4.0	4.4	4.3
	7	1.1		
7:3	3	7.2	8.0	8.0
	5	4.8	4.9	5.4
	7	2.5	3.3	3.5
6:4	3	8.2		
	5	5.6	6.4	6.7
	7	3.7		

表11 石嶺クチャ配合1,090℃焼成試験の全収縮率(%)

クチャ:赤土	クチャ中の石嶺クチャ割合	シヤモットの配合量		
		0%	5%	10%
8:2	3	11.9		
	5	15.9	13.8	14.8
	7	18.3		
7:3	3	10.9	11.8	11.3
	5	14.5	13.8	14.1
	7	16.3	15.1	16.6
6:4	3	11.2		
	5	14.7	13.6	13.2
	7	16.6		

1,090℃焼成ではさらに全体的に色味が茶色になった。いずれの配合も吸水率が一桁代と小さくなっているが、収縮率は10%を越えており、赤瓦製品に使用した場合、寸法精度を満たすことは困難であると考えられる。吸水率はクチャ8:赤土2で小さく、収縮率はクチャ7:赤土3とクチャ6:赤土4で小さくなる傾向を示している。

石嶺クチャの配合量が増えると、吸水率が小さくなり、収縮率が大きくなっている。シヤモットを配合すると、吸水率が0.1~1.1ポイント大きくなり、全収縮率は小さくなっている。

4 まとめ

沖縄県内で生産されている赤瓦は通常クチャ8に対し、赤土2が配合されているが、赤土の配合割合を高くすると焼成試験体の吸水率が小さくなることが確認できた。また、シャモットを添加すると吸水率が大きくなることがわかった。

公共工事現場においてクチャの調査を行い、1,030℃焼成試験体の吸水率が小さい、石嶺クチャを確認することができた。

石嶺クチャの配合・焼成試験を行い、クチャ中の石嶺クチャの配合割合が多くなると、吸水率が小さくなり、全収縮率が大きくなることがわかった。

これらの結果から下記の配合、焼成温度であれば、吸水率12%、収縮率10%程度になり、粘土瓦のJIS規格を満たす首里城正殿瓦が製造できると思われる。

- クチャ8 (内石嶺クチャ5割):赤土2、1,030℃焼成
- クチャ7 (内石嶺クチャ5割):赤土3、1,030℃焼成
- クチャ8 (内石嶺クチャ3割):赤土2、1,060℃焼成

本研究は、「首里城瓦に関する研究、2020技008」で実施した。

謝辞

クチャ調査を実施するにあたりご協力いただきました、沖縄県土木建築部、那覇市、南風原町及び南部広域行政組合の皆様へ感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 照屋善義、宜野座俊夫、与座範弘、花城可英 沖縄県工業試験場業務報告 第16号 P89-105 (1988)

The roof tiles of Shuri Castle

- Raw materials and compounding/firing tests -

Kaei HANASHIRO, Koichi AKAMINE

Okinawa Industrial Technology Center

In October 2019, eight historic structures, including Shuri Castle, were burnt down. To restore Shuri Castle, research should be urgently conducted for material procurement in consideration of situational changes. Thus, we examined raw materials and conducted compounding/firing tests to manufacture roof tiles on the Seiden (main palace) of Shuri Castle.

In the present study, we investigated Kucha (mudstone distributed in the southern part of Okinawa Island), the main raw material for the roof tiles of Shuri Castle, at public works sites. As a result, we successfully procured Kucha with low water absorption when fired. Furthermore, we conducted compounding/firing tests with this Kucha and Kucha and red clay that are currently used as raw materials for red roof tiles to determine the compounding ratios of raw materials and the conditions of firing for the roof tiles of Shuri Castle, and also with chamotte obtained by crushing the damaged roof tiles of the Seiden.

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。