

シラス、抗火石の添加による瓦用 配合粘土の乾燥性の改善

榊原 満 福永 均 松下 福三 中村 雅光

Improvement of Drying Properties of Mixed Roofing-tile
Clay, Using Shirasu or Kōkaseki

by

Mitsuru SAKAKIBARA, Hitoshi FUKUNAGA,
Fukuzo MATSUSHITA and Masamitsu NAKAMURA

瓦用配合粘土にシラス及び抗火石をそれぞれ 10, 20 及び 30% 調合し、乾燥及び焼成性状の改善について検討した。瓦用配合粘土にシラス及び抗火石を配合した場合、シラス、抗火石の配合割合が増えるほど乾燥時間が短くなるが、曲げ強度等を考慮すると、シラス、抗火石の配合割合はそれぞれ 20% 調合が適当であった。この結果にもとづいてシラス 20% 調合の坏土を調製し、瓦工場の製造工程で実用化試験を行ったところ、乾燥及び焼成曲げ強度は従来のものと比較して遜色なく、また乾燥時の変形も少なく良好な結果が得られた。なお、乾燥切れの発生しない範囲で乾燥条件を設定し乾燥時間を推定した結果、通常の配合粘土を使用した生地を含水率（乾量基準）3% にするの

に 16.9 時間かかるのが、シラス 20% 調合の生地では 13.6 時間であった。

1. まえがき

三河地区の粘土瓦工場では、乾燥は炉上乾燥方式が主体で乾燥に 2~4 日要していた¹⁾。しかし、最近では強制乾燥方式が多くなり乾燥時間も大幅に短縮されている。最新の乾燥炉では、水分（湿量基準）19~20% の生地を水分 1~3% にするの

2. 実験方法

2.1 物性試験

鹿児島県古江産のシラス及び伊豆新島産の抗火石をそれぞれ 2,000, 600 及び 300 μ m 全通の粗、中及び細粒の 3 種類に調整し、市販の瓦用配合粘土とそれぞれ 10, 20 及び 30% の割合で調合し（内割り）、真空土練機で押し出し、幅 3.0cm、厚さ 1.5 cm、長さ 13 cm の試験体を作成した。この試験体の水分、乾燥収縮率、乾燥曲げ強度、温度 60 $^{\circ}$ C・相対湿度 40% における乾燥速度を測定した。次

に、試験体を 1,050, 1,100 及び 1,150 $^{\circ}$ C の 3 段階で焼成し、焼成収縮率、焼成曲げ強度、吸水率等を測定した。

また、シラスが粗粒のマグネタイトを含んでいるので、釉薬への影響を調べるため黄金色釉を施釉・焼成し釉面の状態を観察した。

2.2 乾燥試験

物性試験で結果の良かった調合について乾燥試験を温度 30, 40, 50 及び 60 $^{\circ}$ C、相対湿度 40, 50 及び 60% の 12 の条件下で、吸湿試験を温度及び相対湿度がそれぞれ 60 $^{\circ}$ C、40% 及び 60 $^{\circ}$ C、80% の 2 条件下で測定した。

2.3 シラスの実用化試験

実用化のため、300 μ m 全通のシラスを 20% 配合粘土に調合した坏土を調製し、瓦工場の製造ラインに流し、その経過を観察した。

3. 試験結果と考察

3.1 物性試験

3.1.1 シラス、抗火石の基礎性状

実験に使用したシラス及び抗火石の化学分析値

を表1に、また、2,000, 600及び300 μ m全通のシラス及び耐火石の粒径分布をそれぞれ図1及び2に示す。図1及び2からシラスの方が粒径が小さ

表1 シラス・耐火石の化学組成

(単位 %)

化 学 分 成	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Ig.loss
シラス	71.8	13.8	2.32	3.23	0.50	3.28	2.91	1.93
耐火石	76.9	12.1	1.32	1.01	0.12	4.30	2.96	0.59

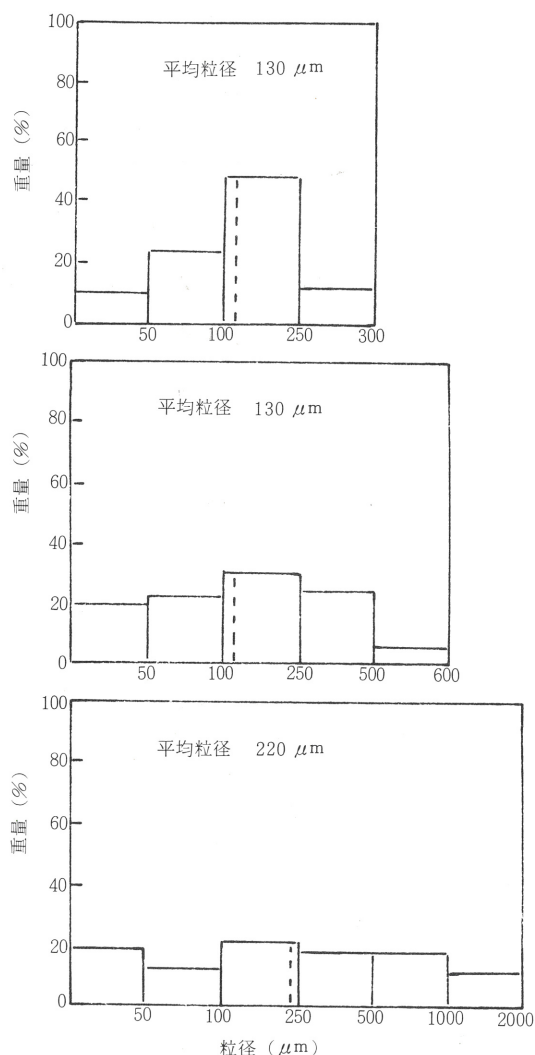


図1 シラス (古江産) の粒径ヒストグラム

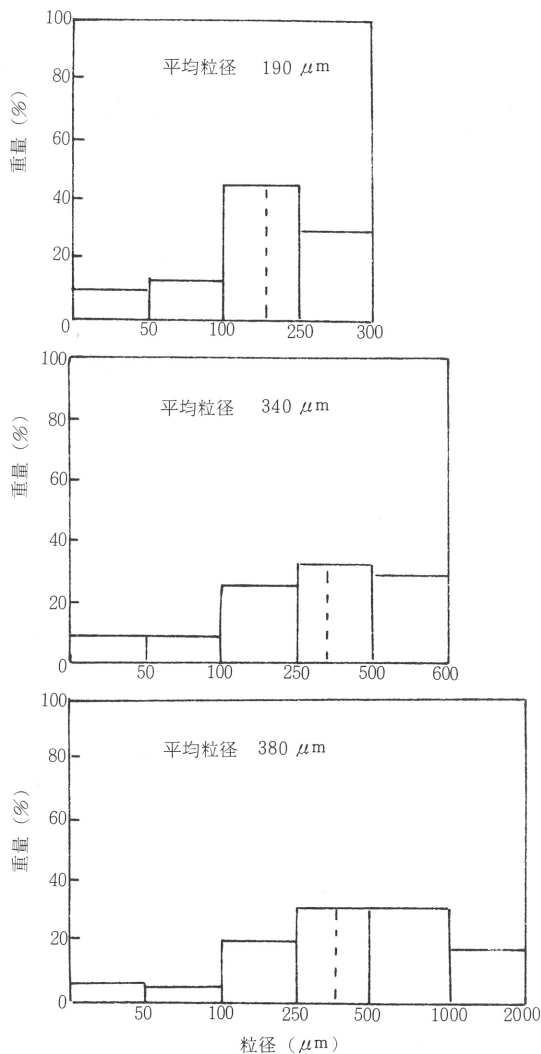


図2 耐火石 (新島産) の粒径ヒストグラム

いことが分かる。

3.1.2 水分・乾燥収縮率

表2に試験体の水分、乾燥時の諸物性を表わす。

水分はシラス、耐火石の調合量の増加に従って減少し、平均値は10%調合で18.3%, 20%調合で17.2%, 30%調合で16.4%となった。シラス、耐火石の材質、粒径による水分の差は認められなかった。

乾燥収縮率も水分と同様にシラス、耐火石の調合量の増加に従って減少した。20%調合では両者とも配合粘土に比較して2%小さくなっている。

一方粒径による差は認められなかった。

3.1.3 乾燥曲げ強度

配合粘土の乾燥曲げ強度は43.3 kgf/cm²であ

表2 試験体の水分及び乾燥諸物性

試料		水分 (%)	乾燥収縮率 (%)	乾燥曲げ強度 (kgf/cm ²)	恒率乾燥速度 (g/g・h)
配合粘土		20.0	7.0	43.3	0.0653
シ 10%	細粒	18.3	5.9	34.2	0.0649
	中粒	18.5	6.0	35.0	0.0677
	粗粒	18.1	5.8	35.1	0.0625
ラ 20%	細粒	17.3	4.9	31.2	0.0651
	中粒	17.2	5.0	25.1	0.0643
	粗粒	17.3	5.0	25.7	0.0645
ス 30%	細粒	16.3	4.0	21.2	0.0641
	中粒	16.1	3.9	21.2	0.0616
	粗粒	16.4	4.2	22.3	0.0657
抗 10%	細粒	18.3	6.1	35.0	0.0653
	中粒	18.2	5.9	36.9	0.0667
	粗粒	18.3	5.8	38.1	0.0656
火 20%	細粒	17.0	5.2	26.0	0.0644
	中粒	16.9	4.9	23.9	0.0651
	粗粒	17.3	4.9	22.9	0.0686
石 30%	細粒	16.4	4.5	19.3	0.0641
	中粒	16.6	4.7	17.7	0.0668
	粗粒	16.3	4.2	15.5	0.0678

細粒…0.3mm以下 中粒…0.6mm以下 粗粒…2.0mm以下

乾燥条件：温度60℃ 相対湿度40%

るが，シラス，抗火石の調合量が増えるに従って強度が低下し，シラスよりも抗火石の方が低下する割合が大きくなった。また，粒径による強度の差はシラスの場合は認められなかったが，抗火石の場合はわずかに影響が認められた。この原因としてはシラスの場合100 μ m以下の細かい粒子が多く平均粒径（中央値）が小さいのに対し，抗火石は100 μ m以上の粗い粒子が大半を占め，平均粒径が大きくなっているため調合量が多くなるに従って強度の低下が著しくなったと考えられる。また，粒径の影響についてもシラスは，粗，中，細粒間の粒径による強度の差が比較的小さいのに対し，抗火石の方はその間の差が大きいため調合量の増加とともに粒径の大きいもののほど強度の低下が著しくなったと思われる。

3.1.4 乾燥速度

温度60℃，相対湿度40%の雰囲気における恒率乾燥速度をみると抗火石調合素地がやや大きいものの，配合粘土，シラス調合素地ともほとんど差はない。したがって，成形水分の少ない分だけ，シラス，抗火石調合素地の方が乾燥時間は短くなった。

3.1.5 焼成及び全収縮率

焼成収縮率はシラスの場合，調合量の増加とともに増大するが，抗火石は調合量の影響は明確ではなかった。しかし，全収縮率は両者とも似た値となり，調合量の増加に従って減少した。

一方粒径の影響は明確に現われ，粒径が大きいほど焼成収縮率，全収縮は小さくなった。

3.1.6 焼成曲げ強度

シラス，抗火石とも調合量の増加にしたがって焼成曲げ強度は低下したが，抗火石の方が低下の割合が大きかった。粒径の影響は明確で，粗くなるほど強度は低下した。しかし，さらに粒径を小さくすることにより，焼成曲げ強度，乾燥曲げ強度を上げることは可能である²⁾。

焼成曲げ強度は，三河地区の瓦の強度³⁾との比較から，1,100℃焼成で130 kgf/cm²を下限とした。これを満たすのは，シラスの10%及び20%調合，抗火石の10%調合及び細粒の20%調合であった。

3.1.7 吸水率

シラス，抗火石調合素地はともに配合粘土よりも吸水率が大きくなった。しかし，シラス20%調

表3 焼成品の物生試験

試料	焼成収縮率(%)			全収縮率(%)			曲げ強度(kgf/cm ²)			吸水率(%)			飽和係数			かさ比重			釉薬表面の 性 (ハナタレ)
	1050°C	1100°C	1150°C	1050°C	1100°C	1150°C	1050°C	1100°C	1150°C	1050°C	1100°C	1150°C	1050°C	1100°C	1150°C	1050°C	1100°C	1150°C	
配合粘土	3.4	4.2	4.7	10.1	10.9	11.4	135	162	170	8.8	6.2	4.2	0.78	0.68	0.60	2.04	2.13	2.17	正 常
シ 10%	3.6	4.3	4.7	9.4	9.9	10.4	126	152	159	8.7	6.3	4.7	0.78	0.69	0.63	2.03	2.09	2.14	"
	3.5	4.3	4.7	9.3	9.9	10.4	128	141	162	8.9	6.7	4.9	0.79	0.71	0.64	2.02	2.08	2.13	"
	3.5	4.2	4.6	9.0	9.6	10.0	128	141	156	8.7	6.5	4.6	0.79	0.71	0.61	2.03	2.09	2.15	"
ラ 20%	3.9	4.6	4.8	8.6	9.3	9.5	110	130	149	8.9	6.6	5.3	0.79	0.69	0.66	2.01	2.06	2.10	"
	3.8	4.5	4.8	8.5	9.2	9.6	110	133	149	8.9	6.6	5.3	0.79	0.70	0.65	2.00	2.07	2.11	"
	3.5	4.4	4.7	8.2	9.2	9.3	107	130	138	9.1	6.5	5.1	0.78	0.70	0.63	2.00	2.07	2.11	やや多め
ス 30%	4.1	4.9	5.2	7.8	8.7	8.9	99	123	143	8.6	6.2	5.1	0.79	0.71	0.67	2.00	2.07	2.11	多 め
	4.0	4.9	5.2	7.7	8.6	8.9	101	118	147	8.4	6.1	4.8	0.79	0.72	0.66	2.02	2.09	2.14	"
	3.5	4.5	4.8	7.5	8.5	8.8	92	114	130	9.2	6.3	5.0	0.78	0.69	0.64	1.99	2.06	2.11	"
抗 10%	3.5	4.1	4.6	9.3	9.8	10.3	128	150	161	8.6	6.3	4.6	0.79	0.71	0.63	2.04	2.10	2.16	正 常
	3.4	4.0	4.5	9.1	9.7	10.2	115	131	152	8.7	6.6	4.6	0.80	0.73	0.63	2.04	2.09	2.16	"
	3.4	4.0	4.6	9.0	9.5	10.1	115	129	146	8.9	6.7	4.7	0.81	0.74	0.64	2.04	2.09	2.15	"
火 20%	3.4	4.3	4.6	8.4	9.4	9.6	99	129	143	9.1	6.6	5.1	0.80	0.72	0.65	2.00	2.07	2.12	"
	3.4	4.0	4.4	8.1	8.6	9.1	95	108	128	9.0	7.0	5.3	0.80	0.75	0.66	2.01	2.07	2.11	"
	3.2	3.9	4.4	8.0	8.7	9.2	87	100	124	9.4	7.2	5.4	0.82	0.75	0.69	2.00	2.06	2.11	"
石 30%	3.5	4.4	4.6	7.8	8.8	9.0	89	108	125	9.3	6.5	5.4	0.79	0.69	0.66	1.98	2.05	2.09	"
	3.2	4.0	4.3	7.5	8.3	8.7	72	90	102	9.7	7.4	5.9	0.80	0.74	0.69	1.96	2.03	2.07	"
	3.1	4.1	4.4	7.3	8.1	8.3	70	86	93	9.6	7.0	5.8	0.81	0.71	0.70	1.97	2.03	2.08	"

細……0.3mm以下, 中……0.6mm以下, 粗……2.0mm以下

合で吸水率は極大を示したのに対し、耐火石は割合量の増加とともに増加の傾向を示した。

3.1.8 釉面の状態

黄金色釉に発生する変色（通称「はなたれ」）はシラスを調合した場合、10%ではあまり目立たなかったが、20%になるとやや目立つようになり、30%では相当目立つようになった。したがって20%調合が一応の限界で粒径は小さいほど「はなたれ」は目立たない。一方、耐火石については全く問題は生じなかった。

以上各物性を比較・検討の結果、シラス・耐火石とも細粒の20%調合が比較的良好であったのでこの2種類を乾燥試験の対象として選定した。

3.2 乾燥試験

3.2.1 乾燥速度

配合粘土とシラス及び耐火石の細粒20%調合の3種類の試験体を2.1と同様に作成し、温度30、40、50及び60℃、相対湿度40、50及び60%の雰囲気における乾燥速度を測定した結果を表4に表わす。

表4 試験体の乾燥速度

温度 (℃)	湿度 (%)	試料	恒率乾燥 速度(g/g·h)	含水率10~5% に至る時間 (分)	含水率10~5% に至る平均乾燥 速度(g/g·h)	含水率5% に至る時間 (分)
30	60	1	0.0372	272	0.0110	542
		2	0.0350	235	0.0128	437
		3	0.0344	211	0.0142	417
	50	1	0.0399	242	0.0124	490
		2	0.0391	205	0.0146	388
		3	0.0393	196	0.0153	384
	40	1	0.0513	245	0.0122	450
		2	0.0470	207	0.0145	364
		3	0.0460	198	0.0152	338
40	60	1	0.0467	240	0.0125	480
		2	0.0426	196	0.0153	375
		3	0.0427	182	0.0165	369
	50	1	0.0541	184	0.0163	380
		2	0.0492	170	0.0176	319
		3	0.0492	148	0.0203	300
	40	1	0.0628	160	0.0188	318
		2	0.0596	141	0.0213	257
		3	0.0574	129	0.0233	250
50	60	1	0.0464	201	0.0149	413
		2	0.0445	168	0.0179	333
		3	0.0456	157	0.0191	326
	50	1	0.0693	123	0.0244	275
		2	0.0695	108	0.0278	222
		3	0.0704	98	0.0306	213
	40	1	0.0832	128	0.0234	260
		2	0.0836	114	0.0263	214
		3	0.0831	106	0.0283	214
60	60	1	0.0563	158	0.0190	339
		2	0.0507	133	0.0226	271
		3	0.0504	124	0.0242	262
	50	1	0.0739	105	0.0286	250
		2	0.0736	90	0.0333	199
		3	0.0720	80	0.0375	193
	40	1	0.0894	95	0.0316	213
		2	0.0862	81	0.0370	172
		3	0.0845	76	0.0395	169

試料1. 配合粘土

試料2. シラス（0.3mm以下）20%調合

試料3. 耐火石（0.3mm以下）20%調合

恒率乾燥速度は配合粘土素地が全体的にやや大きくなっているが、大きな差はない。しかし、含水率5%に至る時間を比較すると配合粘土が最も長く、大きく差がついてシラス、耐火石調合の順に短くなっている。これは成形水分が配合粘土に比較してシラス及び耐火石調合では3%程度低いこと、また含水率10%以下を一応減率乾燥期間と見て、含水率10%から5%に至る間の平均乾燥速度を比較するとはっきり材質の差が出て、耐火石調合が最も大きく、シラス調合、配合粘土の順になっているためである。例えば、温度30℃、相対湿度60%における測定結果を見ると、含水率5%に至る時間は配合粘土542分、シラス調合437分、耐火石調合417分、含水率10%から5%に至る間の平均乾燥速度は配合粘土0.0110 g/g・h、シラス調合0.0128 g/g・h、耐火石調合0.0142 g/g・hとなっている。

3.2.2 吸湿試験

3種類の試験体を110℃で24時間乾燥した後、温度及び相対湿度をそれぞれ60℃、40%及び60℃、80%の2つの条件に置いた時の吸湿率とひずみを測定した。結果を図3及び4に示す。吸湿率の増加とともにひずみも増大するが、途中でひずみは一定となり、以後は吸湿率のみが増加し、その時の温湿度における最大吸湿率まで続く。最大吸湿率は同一条件下では配合粘土が最も大きく、シラス、耐火石調合素地では小さくなっている。ひずみも同様の結果を示した。温度60℃、相対湿度80%における最大吸湿率は配合粘土が3.69%、シラス調合素地2.85%、耐火石調合素地2.93%となった。

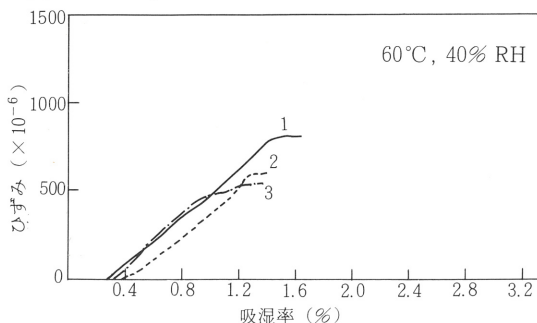


図3 吸湿率-ひずみ曲線

	最大吸湿率 (%)
1. 配合粘土	1.65
2. シラス20%調合素地	1.38
3. 耐火石20%調合素地	1.33

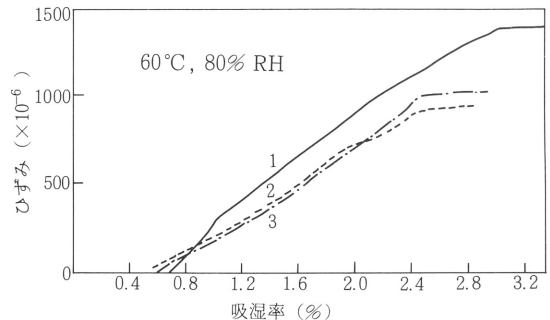


図4 吸湿率-ひずみ曲線

	最大吸湿率 (%)
1. 配合粘土	3.69
2. シラス20%調合素地	2.85
3. 耐火石20%調合素地	2.93

3.2.3 熱膨張試験

図5に配合粘土とシラス及び耐火石20%調合素地の熱膨張曲線を示す。シラス、耐火石の調合により熱膨張率は低下する。

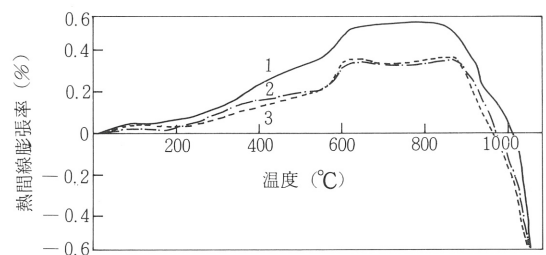


図5 熱膨張曲線図

1. 配合粘土 2. 耐火石20%調合素地 3. シラス20%調合素地

3.3 シラスの実用化試験

3.3.1 瓦工場における実証試験

シラス20%調合の坏土を調製し、瓦工場の製造ラインに流したが、その結果は次のとおりである。なお、使用したシラスは300μmの篩全通で調製したが、図6に示すとおり、物性試験、乾燥試験で使用したものと比較して相当細かくなっておりほとんどが250μmを通過した。平均粒径は50μmであった。

1. 坏土調製時の水分は17.5%を目標にしたが実際には19.0%で、やわらか目の土となった。
2. 成形品もやわらかく、配合粘土の普通水分の成形品よりも少しやわらかであった。
3. 乾燥は台車式炉上乾燥の斜掛け方式で行ったが、乾燥切れはなく、“ためし”⁴⁾の戻りが

少なかった。ためしの戻りが少ないということ
とは変形が少ないということになる。

4. 施釉工程の場合、ハンガーのチャッカー、
施釉時の釉泥漿の圧力による破損はなかつた。

また、施釉終了後の素地を台車積み工程へ
送るコンベア上での衝撃による破損もなかつた。
したがって、シラス 20%調合の瓦素地の
乾燥強度は十分あるものと考えられる。

5. 焼成後の強度、吸水率も通常の配合粘土の
ものと比較して全く遜色なかった。

実証試験の結果、一番問題になると思われた素
地の乾燥強度も実用上問題にならないことが分か
り実用化の目途がたった。

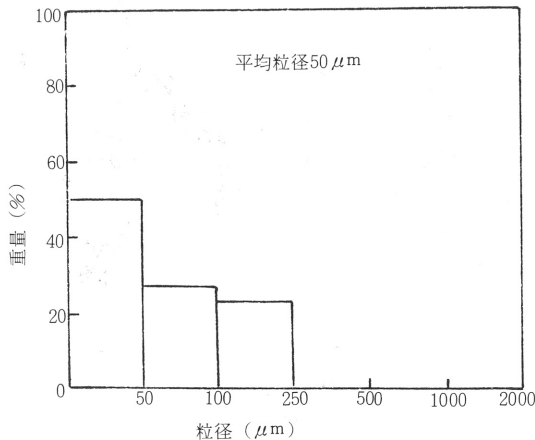


図6 試作瓦用シラスの粒径ヒストグラム

3.3.2 瓦生地の乾燥試験

図7に配合粘土の瓦生地の含水率、乾燥速度及
び収縮速度の関係を示す。ただし、温度 60℃、相

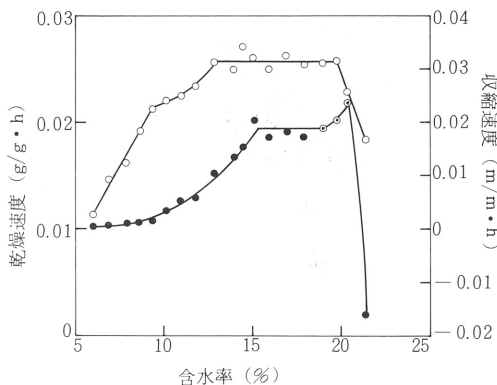


図7 瓦生地の乾燥特性曲線

○ 乾燥速度 ● 収縮速度 ○ 乾燥切れ発生

対湿度 40%の条件で測定した。収縮速度は乾燥初
期に急速に極大を示し、含水率 19%までは減少を
続ける。含水率 19%から 15%までは一定である
が、15%から再び減少し 0 に近づく。乾燥切れは
収縮速度の大きい含水率 19%以上で発生し、以後
は発生しない。しかし、含水率 15%までは乾燥切
れ発生時の収縮速度と同じであるから、切れ発生
の可能性はある。

次に配合粘土及びシラス 20%調合の瓦生地を
用い、種々の温度・湿度における恒率乾燥速度と
乾燥切れ発生の有無を調べた。結果を図8に示す。

この場合、瓦は剣を下にして直立させた状態で
測定した。図において、温度・湿度条件は、〔飽和
絶対湿度—絶対湿度〕に直し乾燥余力と名付け
た。乾燥余力と恒率乾燥速度との間には直線関係
が成立する。⁵⁾ この直線は原点を通るべきものであ
るが実際は縦軸に切片を有する直線となった。

この原因としては、乾燥余力の大きなところで
は温度が高くなるので瓦生地との温度差が大き
くなり、生地の昇温に時間がかかるためといったこ
となどが考えられる。乾燥余力の小さいところで
は原点を通る直線上にあると言える。

乾燥切れは乾燥余力 0.02 では発生していない
が、0.04 付近では配合粘土又はシラス 20%調合素
地のいずれか一方に発生し、0.06 以上では両者に
発生した。なお、乾燥切れはすべて含水率 19%以
上の初期の段階で発生した。

3.4 乾燥時間の比較

配合粘土及びシラス 20%調合の瓦生地が含水

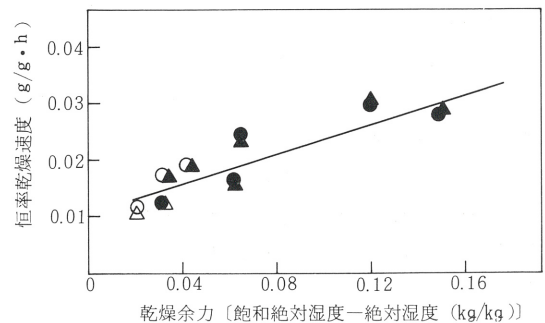


図8 乾燥余力と恒率乾燥速度の関係

〔配合粘土素地 切れ無し ○ 切れ有り ●〕
〔シラス20%調合素地 切れ無し △ 切れ有り ▲〕

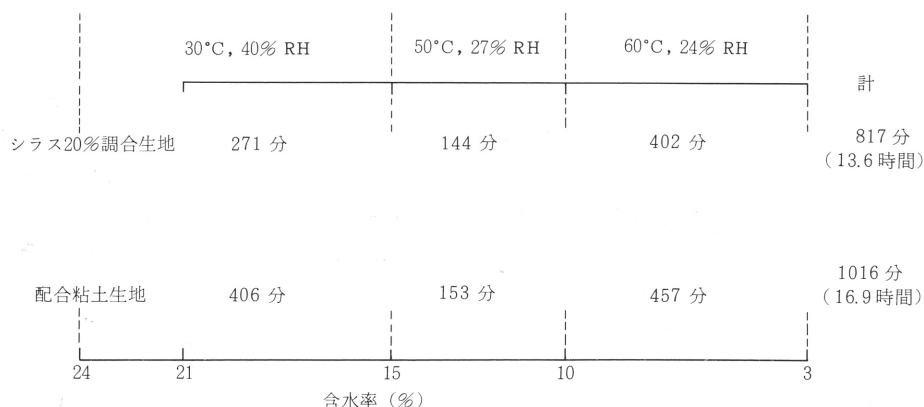


図9 瓦生地の推定乾燥時間

率3%に至る時間を比較したものを図9に示す。

ただし、乾燥時間は試験体及び瓦生地による試験結果から推定し、算出した。乾燥条件は乾燥切れの出ない範囲で最高の乾燥速度になるように設定した。

即ち、収縮速度の大きい含水率15%までは乾燥切れの出ない、温度30℃、相対湿度40%、減率乾燥期間に当る含水率10%から3%までは温度60℃、相対湿度24%とした。含水率15%から10%まではこの二つの条件の間の直線の変化とした。その平均的な条件は温度50℃、相対湿度27%である。

成形水分は含水率で、配合粘土生地24%、シラス20%調合生地21%とした。この仮定のもとでは含水率3%に至る時間は配合粘土生地で1016分(16.9時間)、シラス20%調合生地817分(13.6時間)となり、3.3時間は19.5%の短縮となった。

内容を検討すると配合粘土生地と比較してシラス20%調合生地では乾燥開始から含水率15%に至る時間は、成形水分が低いことから135分の短縮となる。含水率15%から10%に至る時間はほとんど変わらないが、含水率10%から3%に至る時間が55分の短縮となった。成形水分の減少と減率乾燥期間の乾燥速度の向上が乾燥時間短縮の大きな要因となっていることが分る。

4. まとめ

瓦用配合粘土にシラス、抗火石を各種の割合で調合し試験した結果次のことが分った。

1. シラス又は抗火石の調合量の増加に従って乾燥時間も短縮されるが、乾燥及び焼成性状を考慮すると両者とも20%調合が適当であった。
2. シラス、抗火石を瓦用配合粘土に調合すると成形水分の低減と減率乾燥期間の乾燥速度の向上に効果がある。
3. シラス20%調合の坏土を用いて実証試験を行ったところ乾燥素地の強度は従来のものも比較して遜色なく、変形も少なかった。
4. 瓦に乾燥切れの出ない範囲で乾燥条件を設定し乾燥時間を推定したところ、含水率3%にするのに、配合粘土素地で16.9時間、シラス20%調合素地で13.6時間と3.3時間の短縮となった。

6. 参考文献

- 1) 榊原ほか：愛常窯技報告，8，61～68，1982
- 2) 服部ほか：愛常窯技報告，11，1～6，1984
- 3) 愛窯技ニュース No.58，2～3，'83-10
- 4) 田中 稔：粘土瓦ハンドブック，技報堂
- 5) 桐栄良三：乾燥装置，日刊工業新聞社